

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**СУПУТНИКОВІ  
РАДІОНАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ**

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**

**Чернігів 2014**

УДК 629.052.3.783(075.8)  
ББК 39.571.5–5  
С89

*Рекомендовано до друку вченою радою Чернігівського національного технологічного університету (протокол № 9 від 27 жовтня 2014 р.).*

**Авторський колектив:** *Корнієнко І.В.*, канд. техн. наук, доцент (глава 6-9, 12); *Богом'я В.І.*, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., Заслужений винахідник України (глава 1, 3, 5); *Терещук О.І.*, канд. техн. наук, доцент (глава 10, 11, 13); *Корнієнко С.П.*, канд. техн. наук, доцент (глава 2, 4).

**Рецензенти:**

**Баранов Георгій Леонідович**, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, Заслужений діяч науки і техніки України, академік Міжнародної академії навігації та управління рухом, д-р техн. наук, професор (Національний транспортний університет).

**Бурачек Всеволод Германович**, лауреат Державної премії СРСР, академік Міжнародної академії проблем збереження життя, д-р техн. наук, професор.

**Азарсков Валерій Миколайович**, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, лауреат премії ім. М.К. Янгеля НАН України, д-р техн. наук, професор (Національний авіаційний університет).

**Супутникові** радіонавігаційні системи : навчальний посібник / авт. С89 кол. : І. В. Корнієнко, В. І. Богом'я, О. І. Терещук, С. П. Корнієнко. – Чернігів : Черніг. нац. технол. ун-т, 2014. – 280 с. : іл. 112, табл. 22, бібл. 55.

ISBN 978-966-7496-61-6

У навчальному посібнику викладено принципи побудови й функціонування супутникових радіонавігаційних систем, їх системного дослідження та моделювання, розкрита методологія системної оптимізації структури і стратегій функціонування цих систем, значну увагу приділено теоретичним основам навігаційних визначень у сучасних супутникових радіонавігаційних системах, наведено алгоритми оброблення навігаційних вимірювань і навігаційно-часових визначень.

Рекомендується студентам при вивченні дисципліни «GPS-технології» напрямів підготовки «6.080101 – Геодезія, картографія та землеустрій» і «6.060101 – Будівництво», аспірантам та магістрам при проведенні наукових досліджень щодо підвищення ефективності навігаційного обслуговування.

УДК 629.052.3.783(075.8)  
ББК 39.571.5–5

ISBN 978-966-7496-61-6

© Корнієнко І.В., Богом'я В.І.,  
Терещук О.І., Корнієнко С.П., 2014  
© Чернігівський національний  
технологічний університет, 2014

# ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| <b>ВСТУП</b> .....   | 7  |
| <b>РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ</b> .....  | 9  |
| 1.1. Загальне поняття про радіонавігацію.....  | 9  |
| 1.2. Принципи і методи позиціонування в радіонавігації.....                                    | 11 |
| 1.3. Поняття супутникових радіонавігаційних систем.....  | 16 |
| 1.4. Супутникова трilaterація.....   | 18 |
| 1.5. Вимоги до супутникових радіонавігаційних систем.....                                      | 24 |
| <b>РОЗДІЛ 2. ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ</b> .....                 | 27 |
| 2.1. Створення супутникових радіонавігаційних систем.....                                      | 27 |
| 2.1.1. Супутникові радіонавігаційні системи першого покоління.....                             | 27 |
| 2.1.2. Супутникові радіонавігаційні системи другого покоління.....                             | 30 |
| 2.2. Розроблення і впровадження супутникових радіонавігаційних систем в інших країнах.....     | 32 |
| 2.2.1. Європейська супутникова радіонавігаційна система Galileo.....                           | 32 |
| 2.2.2. Китайська супутникова радіонавігаційна система Compass (Beidou II).....                 | 33 |
| 2.2.3. Індійська супутникова регіональна система навігації.....                                | 34 |
| 2.2.4. Японська супутникова радіонавігаційна система QZSS (Quasi-Zenith Satellite System)..... | 35 |
| <b>РОЗДІЛ 3. СТРУКТУРА СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ</b> .....                         | 37 |
| 3.1. Узагальнена структура супутникових радіонавігаційних систем.....                          | 37 |
| 3.2. Узагальнена структура космічного сегмента.....  | 38 |
| 3.2.1. Структура космічного сегмента GPS.....  | 42 |
| 3.2.2. Структура космічного сегмента ГЛОНАСС.....  | 46 |
| 3.3. Наземний сегмент контролю та управління.....  | 53 |
| 3.3.1. Наземний сегмент контролю та управління GPS.....  | 55 |
| 3.3.2. Наземний сегмент контролю та управління ГЛОНАСС.....                                    | 57 |
| 3.4. Сегмент споживачів.....   | 59 |
| <b>РОЗДІЛ 4. СИСТЕМИ КООРДИНАТ У СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ</b> .....             | 65 |
| 4.1. Системи координат, які використовують у супутникових радіонавігаційних системах.....      | 65 |
| 4.2. Геоцентричні системи координат.....   | 67 |
| 4.3. Орбітальний рух супутника.....  | 72 |
| 4.3.1. Елементи орбіти супутника.....  | 72 |
| 4.3.2. Незбурений орбітальний рух супутника.....   | 74 |
| 4.3.3. Рух навігаційних космічних апаратів з урахуванням збурювальних факторів.....            | 74 |
| 4.4. Навігаційні характеристики навігаційних космічних апаратів.....                           | 76 |

|  |            |
|--|------------|
| 4.5. Вимірювані навігаційні параметри та їх геометричні властивості.....                   | 78         |
| 4.6. Моделювання характеристик супутникових радіонавігаційних систем .....                 | 83         |
| <b>РОЗДІЛ 5. СИСТЕМИ ЧАСУ В СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....</b>               | <b>90</b>  |
| 5.1. Функції часу в супутникових радіонавігаційних технологіях.....                        | 90         |
| 5.2. Системи часу .....  | 91         |
| 5.2.1. Системи астрономічного часу .....   | 92         |
| 5.2.2. Системи атомного часу.....  | 94         |
| 5.2.3. Час при пов'язанні рухомих та інерційних систем координат .....                     | 95         |
| 5.3. Системи відліку часу в супутникових радіонавігаційних системах.....                   | 96         |
| 5.3.1. Синхронізація бортових шкал часу .....  | 97         |
| 5.3.2. Синхронізація шкал часу споживачів.....   | 99         |
| <b>РОЗДІЛ 6. НАВІГАЦІЙНІ РАДІОСИГНАЛИ І ПОВІДОМЛЕННЯ... 101</b>                            | <b>101</b> |
| 6.1. Радіосигнали в супутникових радіонавігаційних системах .....                          | 101        |
| 6.1.1. Загальні поняття про навігаційні радіосигнали .....                                 | 101        |
| 6.1.2. Розширення спектра навігаційного радіосигналу.....                                  | 104        |
| 6.1.3. Принципи формування кодових послідовностей .....                                    | 107        |
| 6.1.4. Модуляція сигналу.....  | 109        |
| 6.2. Характеристики навігаційних радіосигналів супутникових радіонавігаційних систем ..... | 111        |
| 6.2.1. Частотні присвоєння навігаційних радіосигналів.....                                 | 111        |
| 6.2.2. Формування сигналів у супутникових радіонавігаційних системах GPS.....              | 113        |
| 6.2.3. Навігаційне повідомлення GPS .....  | 117        |
| 6.2.4. Формування сигналів у супутникових радіонавігаційних системах ГЛОНАСС .....         | 124        |
| 6.2.5. Навігаційне повідомлення ГЛОНАСС.....   | 125        |
| 6.2.6. Формування навігаційного радіосигналу .....   | 127        |
| 6.2.7. Вимоги до навігаційних радіосигналів .....  | 129        |
| <b>РОЗДІЛ 7. АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ НАВІГАЦІЙНИХ РАДІОСИГНАЛІВ..... 130</b>                     | <b>130</b> |
| 7.1. Навігаційні параметри радіосигналів .....   | 130        |
| 7.2. Алгоритми обробки сигналу.....  | 132        |
| 7.2.1. Селекція сигналів різних супутників.....  | 132        |
| 7.2.2. Пошук, захоплення і відстеження навігаційних радіосигналів .....                    | 137        |
| 7.2.3. Алгоритми вторинної обробки сигналу.....  | 139        |
| 7.3. Визначення радіонавігаційних параметрів .....   | 140        |
| 7.3.1. Далекомірні коди .....  | 140        |
| 7.3.2. Фазові виміри.....  | 142        |
| 7.3.3. Визначення вектора швидкості.....   | 143        |
| <b>РОЗДІЛ 8. РОЗВ'ЯЗУВАННЯ НАВІГАЦІЙНИХ ЗАДАЧ..... 146</b>                                 | <b>146</b> |
| 8.1. Методи розв'язування навігаційних задач .....   | 146        |
| 8.2. Методи і режими супутникових вимірювань .....   | 154        |
| 8.2.1. Методи супутникових вимірювань.....   | 155        |
| 8.2.2. Режими спостережень.....  | 160        |



|   |            |
|---|------------|
| <b>РОЗДІЛ 9. ПОМИЛКИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ.....</b>  | <b>167</b> |
| 9.1. Класифікація джерел помилок супутникових вимірювань.....   | 167        |
| 9.2. Неточне знання початкових даних.....   | 169        |
| 9.2.1. Неточність знання ефемерид.....  | 170        |
| 9.2.2. Неточне знання бортового часу.....   | 173        |
| 9.2.3. Похибка початкових координат ровера.....   | 174        |
| 9.3. Вплив зовнішнього середовища.....  | 174        |
| 9.3.1. Іоносферні часові спотворення.....   | 177        |
| 9.3.2. Тропосферні часові затримки.....   | 179        |
| 9.3.3. Багатопроменевість навігаційного радіосигналу.....   | 180        |
| 9.3.4. Затінення навігаційного радіосигналу.....  | 183        |
| 9.4. Інструментальні джерела помилок.....   | 185        |
| 9.4.1. Неточність знання положення фазового центра антени<br>приймального пристрою.....   | 185        |
| 9.4.2. Часова затримка радіотракту.....   | 187        |
| 9.4.3. Наявність шумів у радіотракті приймача.....  | 187        |
| 9.4.4. Похибки моменту приходу сигналу.....   | 188        |
| 9.5. Геометричний чинник.....   | 188        |
| <b>РОЗДІЛ 10. КІНЦЕВЕ ОПРАЦЮВАННЯ СУПУТНИКОВИХ<br/>ВИМІРІВ ТА ЇХ ЗРІВНЮВАННЯ.....</b>   | <b>193</b> |
| 10.1. Постобробка супутникових вимірювань.....  | 193        |
| 10.2. Обробка супутникових фазових вимірювань.....  | 195        |
| 10.2.1. Неоднозначності фазових вимірювань.....   | 195        |
| 10.2.2. Розв'язування неоднозначності фазових вимірів.....  | 198        |
| 10.2.3. Визначення початкових фаз коливань.....   | 202        |
| 10.3. Використання фазових різниць у задачах позиціонування.....  | 207        |
| <b>РОЗДІЛ 11. ПОБУДОВА ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ<br/>З ЗАСТОСУВАННЯМ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ<br/>СИСТЕМ.....</b>                 | <b>210</b> |
| 11.1. Створення геодезичних мереж методами супутникової<br>радіонавігації.....  | 210        |
| 11.2. Зрівнювання геодезичних мереж (вторинне зрівнювання).....   | 216        |
| 11.2.1. Корелатний метод зрівнювання.....   | 219        |
| 11.2.2. Параметричний метод зрівнювання.....  | 220        |
| 11.3. Розв'язування системи рівнянь поправок для мережі.....  | 221        |
| <b>РОЗДІЛ 12. ЗАСТОСУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ<br/>РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ.....</b>   | <b>224</b> |
| 12.1. Розв'язування топографо-геодезичних задач.....  | 224        |
| 12.1.1. Концепція геодезичного вимірювання супутникових<br>радіонавігаційних систем.....  | 224        |
| 12.1.2. Особливості проведення геодезичних і топографічних зйомок<br>з використанням супутникових радіонавігаційних систем..... | 226        |
| 12.1.3. Радіонавігаційне позиціонування під час проведення<br>аерозйомок.....   | 229        |
| 12.2. Застосування супутникових радіонавігаційних систем у задачах<br>моніторингу.....  | 230        |

|   |            |
|---|------------|
| 12.2.1. Геодинамічний моніторинг.....   | 231        |
| 12.2.2. Моніторинг деформацій інженерних споруд.....  | 233        |
| 12.2.3. Моніторинг навколишнього середовища.....  | 234        |
| 12.2.4. Моніторинг положення об'єктів.....  | 236        |
| 12.3. Суміщення методів супутникового радіонавігаційного<br>позиціонування з альтернативними методами координатних визначень..... | 239        |
| 12.3.1. Використання псевдосупутників.....  | 239        |
| 12.3.2. Використання інерціальної апаратури.....  | 240        |
| 12.3.3. Інтеграція супутникових радіонавігаційних систем<br>з електронними геодезичними приладами.....                            | 241        |
| 12.3.4. Спільне застосування висотомірів і приймачів супутникових<br>радіонавігаційних систем.....                                | 242        |
| 12.3.5. Приклади інтеграції приймачів супутникових<br>радіонавігаційних систем з іншими приладами.....                            | 243        |
| <b>РОЗДІЛ 13. ПЛАНУВАННЯ Й ОРГАНІЗАЦІЯ СУПУТНИКОВИХ<br/>ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ.....</b>   |            |
| 13.1. Особливості супутникових геодезичних вимірювань.....  | 245        |
| 13.2. Планування супутникових геодезичних вимірювань.....   | 247        |
| 13.2.1. Оцінювання наявного польового обладнання.....   | 247        |
| 13.2.2. Розроблення стратегії побудови геодезичних мереж.....   | 251        |
| 13.2.3. Обґрунтування режимів супутникових геодезичних<br>вимірювань.....   | 253        |
| 13.2.4. Оцінювання і рекогнозування пунктів проведення зйомки.....  | 256        |
| 13.2.5. Планування графіка спостережень.....  | 258        |
| 13.2.6. Параметри збору даних.....  | 262        |
| 13.2.7. Прив'язування до національної системи координат.....  | 263        |
| 13.3. Практичні супутникові геодезичні вимірювання.....   | 264        |
| 13.4. Обробка даних супутникових спостережень.....  | 267        |
| 13.4.1. Вивантаження даних із супутникового геодезичного приймача.....  | 267        |
| 13.4.2. Обробка даних.....  | 268        |
| 13.4.3. Контроль якості обчислень векторів базових ліній.....   | 269        |
| 13.4.4. Перетворення координат пунктів у систему координат.....   | 270        |
| 13.5. Підготовка звіту про супутникову геодезичну зйомку.....   | 272        |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>  | <b>274</b> |

## ВСТУП

Потреба людини у визначенні власного місця розташування існує з давніх часів. Одним із найбільш ефективних засобів вирішення цього питання є сучасні супутникові радіонавігаційні системи.

Системи супутникової навігації та їх застосування є однією з галузей світової економіки, що найбільш динамічно розвивається. Якщо до 2005 р. загальний оборот її продукції становив приблизно 8 млрд євро, то до 2013 р. він перевищив 14 млрд євро. Устаткування супутникової радіонавігації знайшло широке застосування для повітряно-морських суден та космічних апаратів. Воно стало звичним засобом у землеустрої, при моніторингу, зйомках місцевості та геодезичних роботах, промисловому та цивільному будівництві. Значного поширення набуло використання супутникової апаратури для автомобільної навігації.

Об'єднання супутникових навігаційних і мобільних телекомунікаційних технологій визначається прагненням забезпечити користувача точним знанням місця для його звернення до інформаційних джерел та ефективної роботи служб порятунку. Таким чином, супутникові приймачі почали впроваджуватися в галузь зв'язку, обробки і передачі даних, інформаційних технологій та Інтернету.

У той же час розвиток супутникових радіонавігаційних систем не стоїть на місці. Знаходяться в стадії розвитку та модернізації такі відомі супутникові радіонавігаційні системи, як GPS, ГЛОНАСС; намічено створення Європейської супутникової радіонавігаційної системи Галілео; знаходяться на стадії випробування диференціальні підсистеми – Північноамериканська WAAS і Європейська EGNOS; будується аналогічна японська підсистема MSAS; поширюється мережа морських і геодезичних диференціальних підсистем. Розробляються і з'являються на ринку нові більш досконалі зразки апаратури користувачів, удосконалюються способи її застосування.

Знання принципів функціонування супутникових радіонавігаційних систем, алгоритмів обробки навігаційних радіосигналів, кінцевого опрацювання супутникових вимірів та їх зрівнювання, визначення помилок позиціонування допоможуть студентам опанувати сучасні методи визначення місця розташування об'єктів та використовувати ці уміння і навички для більш ефективної роботи.

Водночас слід зазначити, що в іноземній літературі одночасно використовуються терміни «глобальні навігаційні супутникові системи» (Global Navigation Satellite Systems в англомовній термінології

та ГНСС у російськомовній термінології) і глобальні системи позиціонування (GPS-Global Position System). Відповідно, з'являється проблема термінології, яка посилюється через недосконалість діючих ДСТУ та існування русизмів при технічних перекладах з російської мови.

На думку авторів, термін «глобальні навігаційні супутникові системи» не є коректним, тому що термін «глобальні» є такою властивістю супутникових радіонавігаційних систем, як «цілісні», «точнопозиційні», «безперервного обслуговування». Більш логічним є припущення, що вищенаведені супутникові навігаційні системи є супутниковими радіонавігаційними системами, оскільки визначення місцеположення об'єкта (рішення навігаційної задачі) відбувається за допомогою радіосигналу.

Навчальний посібник «Супутникові радіонавігаційні системи» розроблений відповідно до вимог галузевого стандарту Міністерства освіти і науки України за напрямками «6.080101 – Геодезія, картографія та землеустрій», «6.060101 – Будівництво» і призначений для допомоги студентам у вивченні дисципліни «GPS-технології» та аспірантам і магістрам з метою проведення наукових досліджень.

У навчальному посібнику на досить високому теоретичному і науковому рівні викладено принципи побудови й функціонування супутникових радіонавігаційних систем, їх системного дослідження та моделювання, розкрита методологія системної оптимізації структури і стратегій функціонування цих систем.

На відміну від інших публікацій, у навчальному посібнику значну увагу приділено теоретичним основам навігаційних визначень у супутникових радіонавігаційних системах, наведено алгоритми оброблення навігаційних вимірювань.

Характерною ознакою навчального посібника є також достатньо глибокий аналіз сучасного стану навігаційного обслуговування з використанням супутникових радіонавігаційних систем.

Автори навчального посібника висловлюють щире подяку професорсько-викладацькому складу кафедри геодезії, картографії та землеустрою Чернігівського державного інституту економіки і управління та кафедри судноводіння та керування судном Київської державної академії водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного за поради та побажання при підготовці навчального посібника до видання.

## Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

*Основним принципом функціонування супутникових радіонавігаційних систем вважається принцип визначення координат наземного, повітряного, або морського об'єкта навігації за допомогою радіосигналів, які безперервно випромінюють навігаційні космічні апарати.*

### 1.1. Загальне поняття про радіонавігацію

Винахід радіо наприкінці позаминулого сторіччя слугував розвитку нового напрямку навігації, який одержав назву радіонавігація. Під **радіонавігацією** розуміють спосіб визначення місця розташування рухомого об'єкта (морських і повітряних суден, наземного транспорту та космічних апаратів) за допомогою радіотехнічних пристроїв, розташованих на об'єкті і в навколишньому просторі у точках з відомими координатами [1].

Ідея, що була закладена в основу радіонавігації, ґрунтувалася на визначенні напрямку приходу радіохвилі від джерела радіовипромінювання. Подібний підхід вимагав розроблення спеціального устаткування, що дозволяло б з заданою точністю визначати азимут на радіовипромінювач, що в радіонавігації отримав назву радіомаяка.

Джерело радіовипромінювання і приймач радіосигналів обладнують спеціальними антенами. **Антенами** називають пристрої, призначені для випромінювання і прийому електромагнітних хвиль. Передавальна антена призначена для перетворення енергії високочастотних коливань в енергію електромагнітних хвиль. Приймальна антена призначена для перетворення енергії електромагнітних хвиль в енергію високочастотних коливань. Радіосигнал, за допомогою якого відбувається орієнтування у просторі, отримав назву **навігаційного радіосигналу** [2].

Розроблені спрямовані антени (діаграми спрямованості яких подібні наведеним на рис. 1.1) дозволяють орієнтуватися на радіомаяки, які працюють за межами оптичної видимості, і визначають напрямок (курс) на радіомаяк. Для цього використовують антени двох типів: перший тип антени має в горизонтальній площині кру-

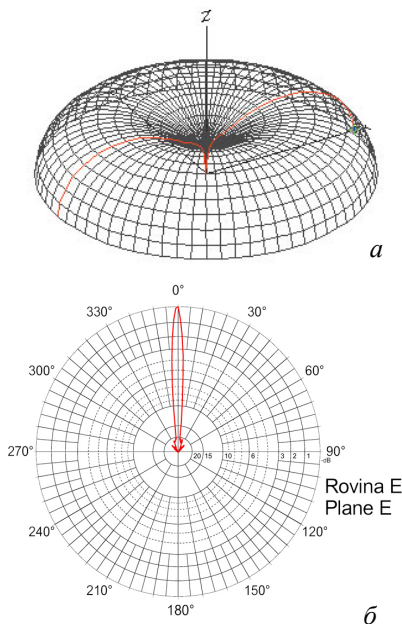


Рис. 1.1. Діаграми спрямованості антен: а – радіомаяка; б – приймача радіосигналів (у горизонтальній площині)

Принцип визначення координат за допомогою кутомірних визначень одержав назву триангуляції. Найбільший розвиток і застосування цей принцип у поєднанні з використанням навігаційних радіосигналів знайшов у морській навігації, авіації (для прокладання курсу, корегування траєкторії польоту під час заходження на посадку), у системах наведення зброї та ін. Точність роботи, наприклад, бортового авіаційного радіокомпаса дозволяє пілотам гарантовано вийти на таку відстань до аеродрому, де встановлений курсовий радіомаяк (КРМ), при якому можлива подальша візуальна орієнтація у просторі (рис. 1.2), а точність цілевказання перетворила звичайні дистанційно керовані ракети у високоточну зброю.

гову характеристику спрямованості, тобто в горизонтальній площині коефіцієнт підсилення антени<sup>1</sup> однаковий в усіх напрямках (рис. 1.1, а). Антена приймача сигналу має спрямовані властивості, тобто коефіцієнт підсилення антени в різних напрямках нерівнозначний. Завдяки спрямованим властивостям антен на передавач визначався за рівнем амплітуди сигналу на виході приймача. Обчислений кут, як різниця між значеннями радіо- та магнітного компаса, одержав назву радіонавігаційного параметра.

**Радіонавігаційний параметр (РНП)** – фізична величина, що визначається як результат вимірів радіонавігаційної системи.

<sup>1</sup> Коефіцієнт підсилення антени – відношення потужності антени на вході еталонної антени до потужності, що підводиться до входу цієї антени, за умови, що обидві антени створюють у цьому напрямі на однаковій відстані рівні значення напруженості поля, або таку ж щільність потоку потужності [3]. Коефіцієнт підсилення антени є безрозмірною величиною, може виражатися у децибелах.

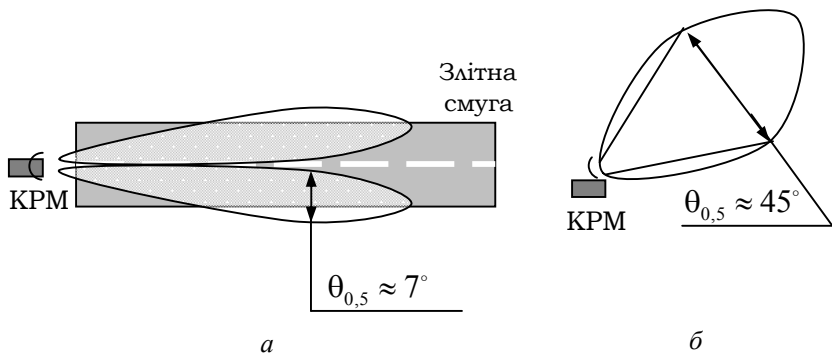


Рис. 1.2. Діаграма спрямованості антени курсового радіомаяка:  
 а – у горизонтальній площині; б – у вертикальній площині

Суттєвою вадою кутомірної радіонавігації залишається складність формування вузькоспрямованих властивостей антен при компактних вагових і габаритних показниках і невеликій вартості. Розв’язуючи задачу визначення курсу на радіомаяк, традиційні радіокомпаси (і, відповідно, триангуляційні методи) залишилися непридатними для визначення точного позиціонування об’єкта на місцевості, тобто визначення його координат. У зв’язку з цим розвиток отримав інший метод позиціонування об’єктів, що має назву **трилатерація**. Цей метод також ґрунтується на використанні навігаційних радіосигналів, але при цьому основним РНП виступає відстань від приймача навігаційного радіосигналу до джерела випромінювання.

## 1.2. Принципи і методи позиціонування в радіонавігації

**Позиціонування** – реалізація можливих способів використання цієї системи для визначення параметрів просторового стану об’єкта навігації [4]. Такими параметрами можуть бути координати приймача, вектор швидкості його переміщення, просторовий вектор між двома приймачами, точний час позиціонування тощо, які є окремими випадками позиціонування.

Залежно від масштабів переміщень об’єкта навігації координати можуть бути місцевими, глобальними і космічними. Місцеві системи координат використовуються як системи відліку при порівняно невеликих переміщеннях об’єкта навігації, коли кривизною Землі можна нехтувати і її поверхню вважається плоскою [5].

За своєю формою вони бувають декартовими, циліндричними і сферичними. Глобальні системи координат застосовуються для навігації, що охоплює всю земну поверхню, і поділяються на географічні, геоцентричні, ліві і праві ортодромічні [5].

У радіонавігації при позиціонуванні об'єкта навігації вводяться поняття поверхні положення і лінії положення.

**Поверхня положення об'єкта навігації** – геометричне місце точок у просторі, які мають те ж саме значення РНП.

**Лінія положення об'єкта навігації** – лінія перетину двох поверхонь положення.

У просторі точка положення об'єкта навігації задається перетином як мінімум трьох поверхонь положення (рис. 1.3, а), або поверхні і лінії положення, яка не лежить на цій поверхні (рис. 1.3, б).

У загальному випадку миттєве положення об'єкта у просторі визначається трьома координатами у тій або іншій системі координат. Зміна положення об'єкта у просторі протягом часу задається похідними координат: першою – швидкість, другою – прискорення. У подальшому отримали розвиток методи одержання інших РНП, що визначаються за допомогою радіохвиль, як-то відстань між передавачем та приймачем радіосигналу, різниця або сума відстаней, доплерівський зсув частоти тощо.

Відстань між передавачем та приймачем визначається за часом поширення сигналу, який обчислюється за набігом фази сигналу за час проходження радіохвилями відстані до приймача. Оскільки відносний набіг фази прямо пропорційний часу проходження сигналу, то за різницею фаз між внутрішнім (опорним) сигналом приймача і сигналом, що приймається, обчислюється відстань до передавача.

**Геометричні параметри положення об'єкта навігації і радіомаяка, які відповідають радіонавігаційним, прийнято називати навігаційними параметрами.** Так, затримці сигналу  $t$  від-

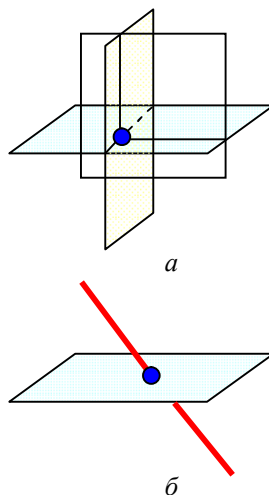


Рис. 1.3. Визначення точки положення:  
а – перетин 3 поверхонь положення;  
б – перетин лінії і поверхні положення



повідває дальність  $D = ct$ , де  $c$  – швидкість поширення радіохвиль (швидкість світла); доплерівському зсуву частоти  $f_d$  відповідає радіальна швидкість зближення (віддалення)  $V_r = f_d \lambda$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі випромінюваного радіосигналу.

**Функціональний зв'язок між навігаційними параметрами і вектором споживача називають навігаційною функцією.** Конкретний вид функції визначається багатьма чинниками: системою координат, характером руху споживача тощо.

Розв'язання задачі координатного визначення полягає у геометричному обчисленні місця знаходження об'єкта навігації за набором одержаних РНП. Найбільшого поширення дістали такі методи визначення координат об'єкта навігації [5]:

- кутомірний;
- далекомірний;
- різницево-далекомірний;
- комбінований кутомірно-далекомірний.

**Кутомірний метод** полягає у визначенні координат об'єкта навігації з використанням спрямованих властивостей антен. При цьому для визначення місця розташування необхідно приймати сигнали від двох радіомаяків з визначеним положенням у просторі (рис. 1.4).

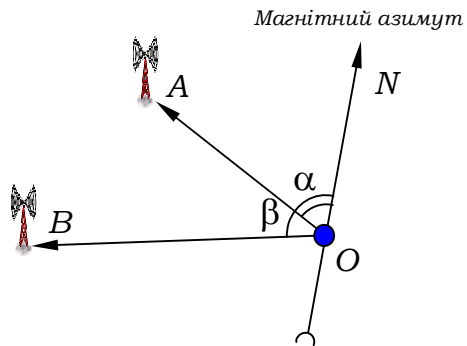


Рис. 1.4. Сутність кутомірного методу

За наявності двох РНП  $\alpha$  і  $\beta$ , та відомих координатах радіомаяків **A** і **B** нескладно обчислити єдине можливе місце розташування об'єкта навігації **O**.

**Далекомірний метод** заснований на вимірюванні відстані **D** між точками випромінювання і прийому сигналу. При цьому відстань між точкою випромінювання сигналу і точкою прийому сигналу обчислюється як добуток швидкості поширення сигналу і часової різниці часу випромінювання і прийому сигналу.

Обчислена дальність утворює поверхню положення (лінію положення), якщо відома одна з координат об'єкта навігації, наприклад, висота (рис. 1.5). Поверхнею положення далекомірної системи є поверхня сфери з радіусом  $D$ . Лініями положення на поверхні Землі будуть кола (лінії перетину сфери положення з поверхнею землі). При цьому місцеположення об'єкта навігації визначається як точка перетину двох ліній положення. Оскільки кола перетинаються в двох точках (рис. 1.5, а), то виникає неоднозначність відліку, яка характеризується точками  $O$  і  $O'$ .

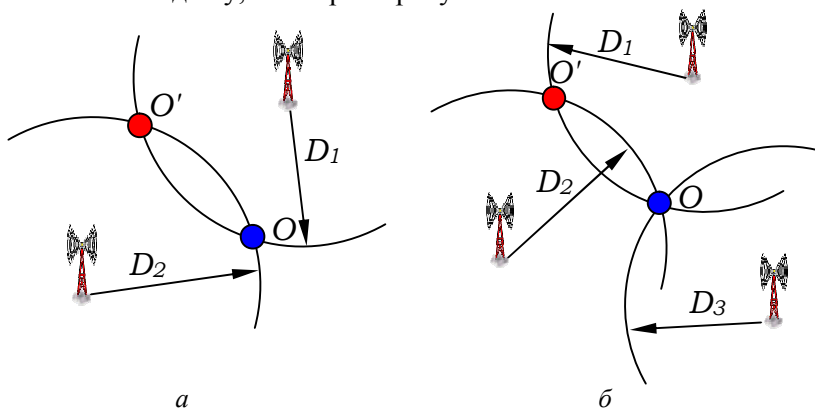


Рис. 1.5. Сутність далекомірного методу

Для виключення неоднозначності застосовують додаткові РНП, наприклад, вимір відстані до третьої точки випромінювання (рис. 1.5, б).

**Різницево-далекомірний метод** ґрунтується на прийманні сигналів та вимірюванні РНП як мінімум від трьох радіомаяків з відомими координатами. Цей метод є ефективним за наявності невідомості щодо синхронізації шкал часу передавача та приймача. Сутність методу полягає у вимірі часу запізнення приходу сигналу від одного радіомаяка відносно сигналу іншого (рис. 1.6, а).

Відстань між радіомаяками  $d$  є базою різницево-далекомірної радіонавігаційної системи. При цьому радіомаякам, залежно від черговості отримання від них сигналу, привласнюють назви ведучого ( $A$ ) і веденого ( $B$ ). Часова різниця у прийомі сигналів, пропорційна різниці відстані від об'єкта навігації до радіомаяків, становитиме:

$$\frac{t_A}{t_B} = \frac{D_A}{D_B},$$

де  $t_A, t_B$  – відповідно час приходу сигналу від радіомаяків  $A$  і  $B$ ;  
 $D_A, D_B$  – відповідно відстань від об'єкта навігації до радіо-  
 маяків  $A$  і  $B$ .

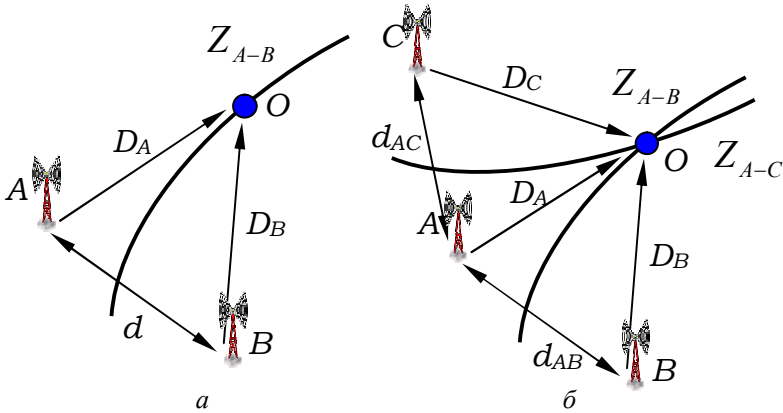


Рис. 1.6. Сутність різницево-далекомірного методу

Відстані  $D_A$  і  $D_B$  можна визначити як:

$$D_A = D_A^i + \Delta D_A = ct_A^i + c\Delta t_A;$$

$$D_B = D_B^i + \Delta D_B = ct_B^i + c\Delta t_B,$$

де  $D_A^i, D_B^i$  – істинні дальності до радіомаяків  $A$  і  $B$ ;

$\Delta D_A, \Delta D_B$  – похибка обчисленої відстані, обумовлена розбіжністю шкал часу радіомаяків  $A$  і  $B$  і навігаційного приймача;

$t_A^i, t_B^i$  – істинний час поширення радіохвиль від радіомаяків  $A$  і  $B$ ;

$\Delta t_A, \Delta t_B$  – значення розбіжності шкал часу між радіомаяками  $A$  і  $B$  і навігаційним приймачем.

За умови синхронізації шкал часу радіомаяків значення  $\Delta t_A = \Delta t_B$  і відповідно  $\Delta D_A = \Delta D_B$ . Таким чином:

$$D_A - D_B = D_A^i - D_B^i,$$

тобто різниця, утворена вимірними відстанями (з розбіжностями часових шкал радіомаяків і приймача), дорівнюватиме різниці істинних відстаней.

Результатом виміру різниці часу приходу сигналу є обчислення гіперболи  $Z_{A-B}$  – лінії положення об'єкта навігації  $O$ . Неоднозначність позиціонування розв'язується проведенням додаткового виміру різниць сигналів від інших радіомаяків (рис. 1.6, б). Точкою позиціонування об'єкта буде точка перетину двох (чи більше) гіпербол.

**Комбінований кутомірно-далекомірний метод** дозволяє знайти місце розташування об'єкта навігації з однієї точки (відносно одного радіомаяка). Цей метод широко використовується в авіаційних радіосистемах ближньої навігації. При цьому методі вимірюється похила дальність  $D$ , азимут  $\alpha$  і кут місця  $\beta$  (кут між напрямом на об'єкт і горизонтальною площиною) (рис. 1.7). Завдяки перерахунку основних координат  $D$ ,  $\alpha$  і  $\beta$  можна позиціонувати об'єкт навігації.

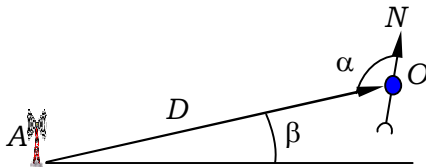


Рис. 1.7. Сутність кутомірного методу

Розглянуті методи визначення місця розташування об'єкта навігації відносно точок з відомими координатами за допомогою поверхонь і ліній положення називають **позиційними**.

Крім позиційних методів, у навігації застосовують методи обчислення шляху інтеграцією вимірних швидкостей (доплерівським або повітряним вимірником) або прискорення.

### 1.3. Поняття супутникових радіонавігаційних систем

**Супутникова радіонавігаційна система (СРНС)** – комплексна електронно-технічна система, яка складається з сукупності наземного і космічного устаткування і призначена для розв'язування навігаційної задачі.

**Навігаційною (навігаційно-часовою) задачею в СРНС прийнято називати знаходження просторово-часових координат об'єкта навігації (географічних координат і висоти) і складових вектора його руху (швидкості, напрямку руху, прискорення) сукупно званих вектором об'єкта навігації (споживача).**

Об'єктом навігації може бути наземний, надводний або повітряний об'єкт. У результаті розв'язування навігаційної задачі в загальному випадку повинні бути знайдені просторові координати об'єкта навігації ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), поправка  $t$  до шкали часу навігаційного приймача щодо шкали часу СРНС і складові вектора швидкості як похідні від координат об'єкта навігації у часі.

Крім визначення навігаційних параметрів об'єктів навігації, СРНС забезпечує [2]:

- локальну високоточну навігацію наземних рухомих об'єктів (сухопутних, морських, повітряних) на основі диференційних методів навігації із застосуванням стаціонарних наземних перманентних (опорних) станцій і навігаційних космічних апаратів;
- високоточне взаємне геодезичне прив'язування віддалених наземних об'єктів;
- взаємну синхронізацію стандартів частоти і часу на віддалених наземних об'єктах;
- неоперативну автономну навігацію низько- і середньоорбітальних космічних об'єктів;
- визначення орієнтації об'єкта на основі радіоінтерферометричних вимірювань на об'єктах за допомогою навігаційних радіосигналів, що приймаються рознесеними у просторі антенами.

У системах супутникового позиціонування навігаційні космічні апарати (НКА) виконують роль радіомаяків. Суттєвою відмінністю СРНС від наземних систем радіонавігації є непостійність просторово-часових характеристик положення НКА. Позиціонування споживача вимагає знання координат НКА в кожний момент часу, які рухаються з великими і непостійними щодо споживача швидкостями, що загалом утворює складну технічну й обчислювальну задачу.

Основними методами позиціонування, що використовуються в СРНС, є далекомірний, різницево-далекомірний і доплерівський методи або методи, похідні від зазначених. Позиціонування спо-

живача здійснюється обчисленням у навігаційній апаратурі споживача (НАС) затримки сигналу і доплерівського зсуву несучої частоти – РНП, виміряних одночасно від декількох НКА (одночасний вимір РНП одержав назву *методу зарубки*). Вимірювання проводиться в *беззапитовому режимі* – передавання радіосигналу здійснюється тільки в напрямку від НКА до НАС, при цьому випромінювання навігаційного радіосигналу здійснюється постійно. Сукупність навігаційних радіосигналів утворюють навігаційне поле. Беззапитовий режим дозволяє використовувати систему при необмеженій кількості споживачів СРНС.

Для точного визначення часу затримки проходження радіосигналу від НКА до навігаційного приймача їх внутрішні шкали часу повинні бути синхронізовані. Для корегування та чіткої синхронізації шкали часу навігаційного приймача в ньому, з навігаційного сигналу виділяється навігаційне повідомлення, яке містить мітки часу, прогнозовані параметри орбіти, їх похідні й альманахи (набір даних про поточний стан конкретного НКА). Знаючи прогнозовані параметри орбіти і точні координати НКА в опорні моменти часу, споживач може обчислити координати НКА в довільний момент часу. Прогнозовані параметри орбіти та їх похідні називаються *ефемеридами*. Прогнозування орбіт НКА здійснюється в наземному командно-вимірювальному комплексі, і в подальшому результат завантажується в НКА.

#### 1.4. Супутникова трилатерація

До основних геодезичних супутникових методів позиціонування відносяться глобальна триангуляція, яка заснована на використанні куткових вимірювань, і глобальна супутникова трилатерація, що ґрунтується на вимірюванні відстаней до супутників із застосуванням випромінювань електромагнітних хвиль [6].

При розробці методів всесвітньої супутникової триангуляції, які почали розвиватися одразу ж після запуску в 1957 р. першого радянського штучного супутника Землі, перевага була віддана методам фотографування супутників на фоні зірок. Були розроблені спеціальні метричні фотокамери в поєднанні з відповідними фотограметричними методами, що дозволяють одержувати на основі цих знімків необхідну інформацію про орієнтирні напрями і використовуються при побудові глобальної геодезичної мережі.

Характерна для цього методу апаратура виявилася важкою і кошовною, самі спостереження були малопродуктивними, оскільки доводилося вибирати такі періоди часу, коли дотримувалися умови чистого неба одночасно як мінімум на двох пунктах, що знаходились на великих відстанях. При цьому точність вимірювань виявилася порівняно невисокою. Через перераховані вище недоліки цей метод достатньо швидко був витіснений глобальною супутниковою трилатерацією. Останній метод, заснований на використанні супутникових далекомірних систем, широко застосовується нині для побудови глобальних, регіональних і локальних геодезичних мереж.

**Трилатерація (від лат. *trilaterus* – трибічний)** – метод визначення положення геодезичних пунктів через побудову на місцевості системи суміжних трикутників, у яких вимірюються довжини їх сторін [7].

**Супутникова трилатерація** – позиціонування об'єкта навігації далекомірним методом, в якому визначення координат об'єкта навігації здійснюється на основі обчислення точки перетину поверхонь положення, утворених відстанями до декількох НКА з відомими координатами.

Процедура позиціонування методом супутникової трилатерації полягає в наступному: обчисливши координати супутника  $A$ , знаючи час проходження сигналу від НКА до приймача та швидкість поширення радіохвиль, НАС обчислює РНП – точну відстань  $D_A$  від НКА до фазового центра антени навігаційного приймача. Отримана відстань утворює поверхню положення об'єкта навігації відносно

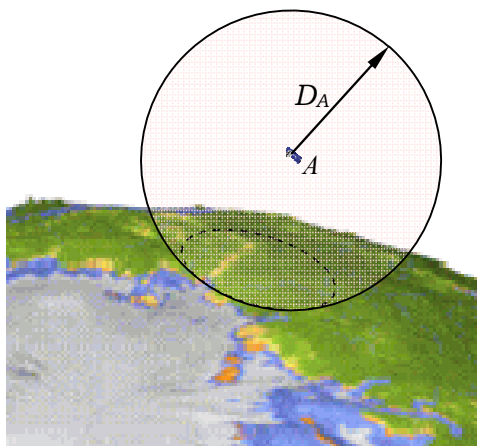


Рис. 1.8. Поверхня положення об'єкта навігації відносно супутника  $A$

НКА, яка являє собою сферу з центром, що збігається з фазовим центром передавальної антени НКА (рис. 1.8).

У системах першого покоління на основі ефекту Доплера виміряли різниці відстаней від приймача до двох положень супутника на орбіті.

Поверхнями положень були гіперболоїди обертання. У сучасних системах вимірюють дальності до навігаційного приймача і швидкості змін відстаней унаслідок переміщень НКА відносно користувача. Виміряними швидкостям відповідають конічні поверхні положення (конуси), а виміряними відстаням – сферичні (сфери). У геодезії переважним чином використовують далекомірні методи позиціонування.

Обчислена відстань  $D_B$  від приймача до супутника  $B$  утворює іншу поверхню положення споживача, яка при перетинанні з поверхнею положення від супутника  $A$  утворює коло  $X$  можливого положення споживача (рис. 1.9).

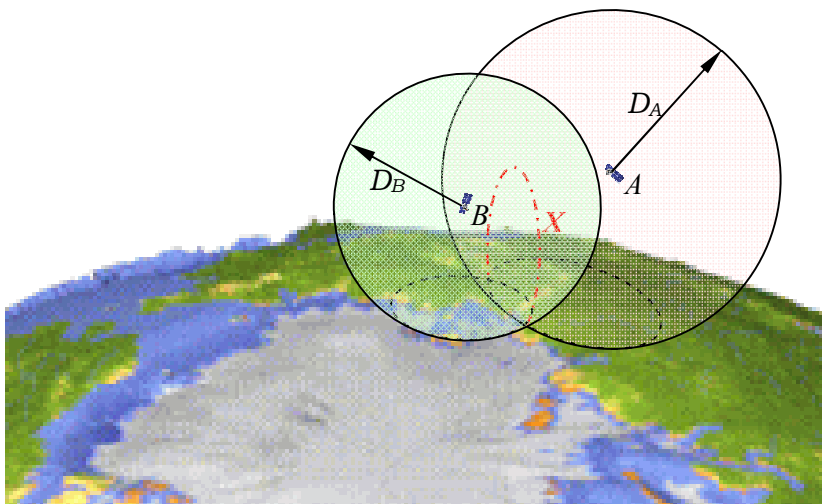


Рис. 1.9. Лінія положення об'єкта навігації  $X$  відносно супутників  $A$  і  $B$

Відстань  $D_C$  до третього супутника  $C$  утворює третю поверхню положення, яка перетинає лінію поверхні  $X$  у двох точках  $x_1$  і  $x_2$  (рис. 1.10).



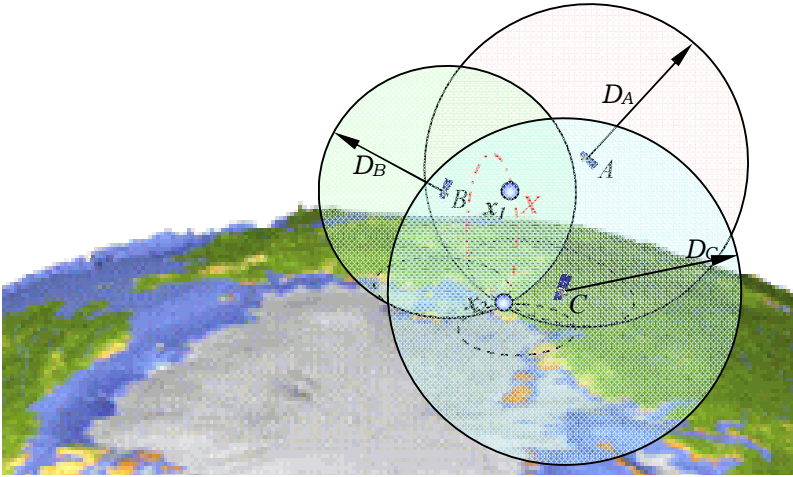


Рис. 1.10. Точки положення об'єкта навігації –  $x_1$  і  $x_2$  відносно супутників  $A$ ,  $B$  і  $C$

Отже, у позиціонуванні споживача залишається певна невизначеність, яка знімається або додатковим виміром до четвертого НКА (рис. 1.11), або наявністю висотної координати навігаційного приймача. У випадку четвертого виміру формується поверхня положення, на якій лежить лише одна з двох точок  $x_1$  або  $x_2$ .

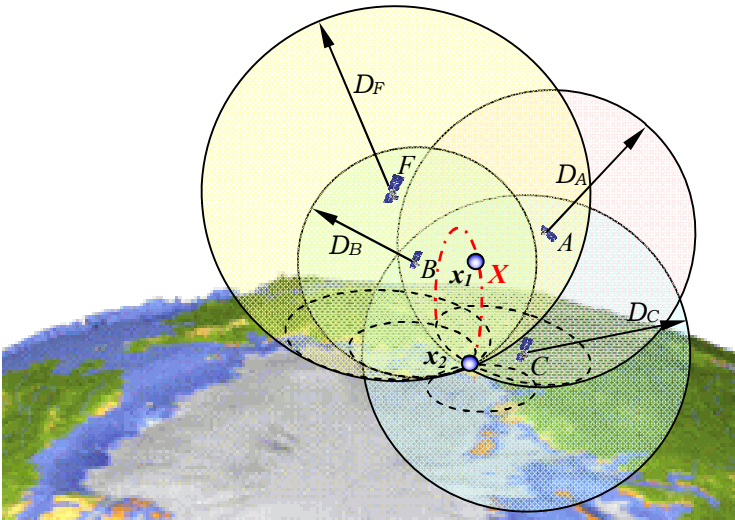


Рис. 1.11. Точне позиціонування об'єкта навігації далекомірним методом за чотирма супутниками

Математично тривимірна проблема трилатерації є знаходженням координат точки перетину чотирьох сфер, які визначаються за допомогою розв'язування системи рівнянь (рис. 1.12). Щоб спростити обчислення і розуміння розв'язку, розглянемо площину, утворену центрами трьох з чотирьох сфер, при цьому для всіх центрів сфер  $z = 0$ . Вважатимемо, що один з центрів сфер ( $A$ ) збігається з початком координат, другий ( $B$ ) – лежить на осі  $x$  (рис. 1.13). Прийнята система координат у подальшому зводиться до початкової зворотними перетвореннями.

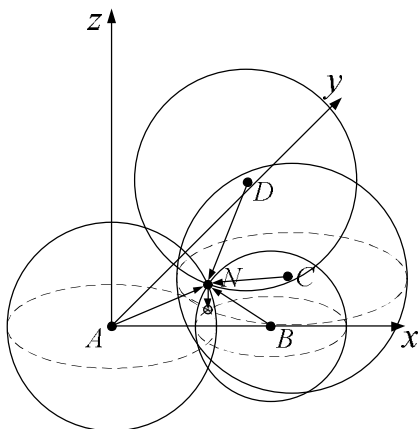


Рис. 1.12. Представлення задачі трилатерації

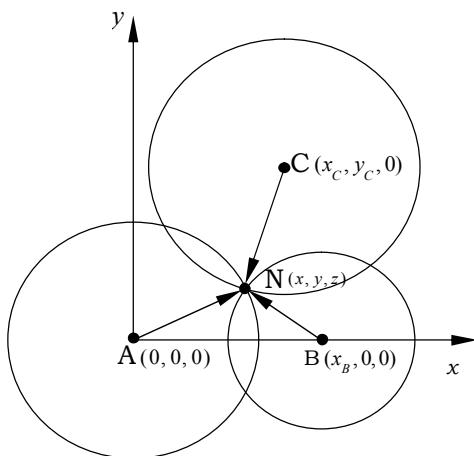


Рис. 1.13. Площина, утворена центрами сфер

Рівняння для радіусів трьох сфер становитимуть:

$$r_A^2 = (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + (z - z_A)^2; \quad (1.1)$$

$$r_B^2 = (x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2; \quad (1.2)$$

$$r_C^2 = (x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2, \quad (1.3)$$

де  $r_A, r_B, r_C$  – радіуси трьох сфер;

$x, y, z$  – координати шуканої точки  $N$ ;

$x_A, y_A, z_A; x_B, y_B, z_B; x_C, y_C, z_C$  – відповідно координати центрів сфер  $A, B$  і  $C$ .

Відповідно до прийнятого розташування центрів сфер у прийнятій системі координат їх координати  $x_A = 0; y_A = 0; z_A = 0; y_B = 0, z_B = 0; z_C = 0$ , підставляючи які до (1.1) – (1.3), маємо:

$$r_A^2 = x^2 + y^2 + z^2; \quad (1.4)$$

$$r_B^2 = (x - x_B)^2 + y^2 + z^2; \quad (1.5)$$

$$r_C^2 = (x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + z^2, \quad (1.6)$$

Для розв'язання задачі потрібно знайти координати точки  $N(x, y, z)$ , які задовольняють рівнянням (1.4)–(1.6).

Спочатку віднімемо рівняння (1.5) з рівняння (1.4) і знайдемо  $x$ :

$$x = \frac{r_A^2 - r_B^2 + x_B^2}{2x_B}. \quad (1.7)$$

Підставляючи вираз (1.7) у рівняння першої сфери (1.4), одержуємо рівняння кола, яке є шуканим перетином перших двох сфер:

$$y^2 + z^2 = r_A^2 - \frac{(r_A^2 - r_B^2 + x_B^2)^2}{4x_B^2}. \quad (1.8)$$

Підставляючи рівняння (1.8) у рівняння третьої сфери (1.6), знаходимо  $y$ :

$$r_C^2 = (x - x_C)^2 - 2yy_C + y_C^2 + r_A^2 - \frac{r_A^2 - r_B^2 + x_B^2}{2x_B}.$$

З урахуванням (1.7) маємо:

$$y = \frac{r_A^2 - r_C^2 - x^2 + (x - x_C)^2 + y_C^2}{2y_C} = \frac{r_A^2 - r_C^2 + x_C^2 + y_C^2}{2y_C} - \frac{x_C}{y_C} x.$$

Знаючи координати  $x$  і  $y$ , можна знайти координату  $z$ :

$$z = \pm \sqrt{r_A^2 - x^2 - y^2}. \quad (1.9)$$

Знак  $\pm$  у виразі (1.9) визначає дві точки, що лежать на одній відстані від площини, утвореної центрами трьох сфер. Невизначеність двох точок усувається виміром четвертого РНП (рис. 1.11). У випадку, якщо координата  $z = 0$ , тобто точка  $N$  знаходиться на утвореній площині, вимір четвертого РНП не потрібний.

Розв'язування задач позиціонування на практиці набагато складніший, що пов'язано з наявністю різноманітних перешкод, які впливають на точність виміру РНП, погрішність знання ефемерид НКА, розбіжність шкал часу НКА, і навігаційного приймача тощо. Подолання цих перешкод і складнощів полягає у площині організаційних і технічних методів та способів. Але, навіть маючи найсучасніший приймач для цивільного застосування, максимальна точність, на яку можна розраховувати, становить від 2 до 5 метрів, для геодезичного устаткування – до 1 метра, для військового застосування – до декількох сантиметрів [8].

### 1.5. Вимоги до супутникових радіонавігаційних систем

Цільове призначення СРНС, як системи глобального позиціонування об'єктів різного призначення і різних властивостей, які можуть відноситись до збройних сил, сил національної безпеки, служб порятунку, підрозділів міністерства надзвичайних ситуацій, навігаційних служб повітряного, річкового і морського флоту, наземних навігаційних служб, науковців, будівельників, геологів, геодезистів та багато інших, включаючи пересічних громадян, які використовують СРНС у приватних інтересах, полягає у задоволенні потреб споживачів у позиціонуванні в будь-який момент часу і з певною точністю. Різноманітність цільового використання СРНС різними користувачами, різні вимоги до часу розв'язування задачі позиціонування, вимоги точності і, навпаки, примусове обмеження потенційно можливої точності до деяких

категорій користувачів тощо висувають до СРНС систему жорстких функціональних вимог.

Отже, система вимог до СРНС включає:

- **глобальність застосування системи** – можливість позиціонування об'єкта навігації у будь-якій точці земної кулі або навколоземного простору;

- **стійкість** – незалежність функціонування системи від гідрометеорологічних умов, підстилаючої поверхні, рельєфу, навколишньої рослинності, забудови, часу доби і року, наявності радіозавад тощо;

- **безперервність обслуговування** – вірогідність працездатності системи протягом часу виконання задачі;

- **доступність навігаційного сигналу** – вірогідність працездатності СРНС перед і у процесі виконання тієї або іншої задачі;

- **точність позиціонування** – задоволення потреб користувачів у точності позиціонування в межах визначеної похибки. Залежно від цільового призначення СРНС можуть встановлюватися певні вимоги до точності позиціонування (табл. 1.1) [9];

- **цілісність** – вірогідність виявлення відмови системи протягом часу, рівного або менше заданого.

Таблиця 1.1

*Вимоги користувачів*

| <b>Група користувачів</b>  | <b>Вимоги точності позиціонування, м</b> |
|--|--|
| Силові міністерства під час проведення спеціальних операцій та навчань   | 0,2–5                                    |
| Морський і річковий транспорт  | 1–2                                      |
| Гідрографічні служби   | 0,2–0,5                                  |
| Наземний транспорт усіх органів державної влади (автомобільний і залізничний), міський транспорт   | 1–2                                      |
| Мінприроди, Держкомзем (геодезичні роботи, кадастр, картографування, геологорозвідка, землевпорядкування, ГІС тощо)  | 0,02–2                                   |
| МНС, Мінбуд, Держводгосп (контроль перемішень ґрунту в сейсмонезбезпечних і зсувонезбезпечних регіонах, моніторинг будівельних споруджень, водопостачальних та водозахисних об'єктів тощо) | 0,01–0,1                                 |
| Агропідприємства (при виконанні робіт за технологією прецизійного землеробства)  | 0,2–0,5                                  |

Останнім часом висувається вимога *сумісності* різних СРНС, що дозволяє створювати надмірність навігаційних спостережень і обирати оптимальне сузір'я НКА для підвищення точності позиціонування.

### ***Питання для самоконтролю***

- 1. Які фізичні принципи покладені в основу радіонавігації?*
- 2. Що називається радіонавігаційним параметром?*
- 3. Які просторові характеристики об'єкта навігації визначаються при позиціонуванні?*
- 4. У чому різниця між радіонавігаційними і навігаційними параметрами?*
- 5. Які основні методи позиціонування набули розвитку в радіонавігації?*
- 6. В яких методах вимагається чітка синхронізація шкал часу радіомаяка і приймача?*
- 7. У чому сутність супутникової трилатерації?*
- 8. Які основні вимоги висуваються до СРНС?*

## **Розділ 2. ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

*Створенню супутникових радіонавігаційних систем у другій половині минулого сторіччя слугувало два основні факти – виведення на орбіту першого штучного супутника Землі та гонка озброєнь між двома наддержавами.*

### **2.1. Створення супутникових радіонавігаційних систем**

#### **2.1.1. Супутникові радіонавігаційні системи першого покоління**

Сама ідея використання штучних супутників Землі для позиціонування наземних, повітряних та космічних об'єктів виникла та набула розвитку після запуску 4 жовтня 1957 році першого штучного супутника. Як свідчать історичні дані, головним поштовхом до створення і розвитку СРНС слугувала гонка озброєнь 60–70-х років минулого сторіччя між двома наддержавами, а саме СРСР та США. Військові доктрини обох країн передбачали нанесення ядерних ударів по важливих військових та індустріальних центрах противника. Відповідно до цього, під час розроблення проекту системи, цільовим призначенням висувалося орієнтування та наведення на ціль балістичних ядерних ракет, стратегічних бомбардувальників та стратегічних ракетних підводних човнів.

В основу принципу координатних визначень обох систем була покладена ідея обчислення координат об'єкта позиціонування на основі доплерівського зсуву несучої частоти передавача штучного супутника землі з відомими миттєвими координатами. Ідея була запозичена у технічних систем стеження за супутниками, які використовувались як у СРСР, так і у США.

Наукові основи СРНС були розроблені державами наприкінці 50-х – початку 60-х років. Основними проблемами, які розглядалися на той час, були забезпечення заданої точності позиціонування, глобальності застосування та надійності функціонування системи.

Важливим технічним проривом того часу було розроблення і запровадження атомних стандартів частоти і часу, що відбулася у 1960 році, і це дозволило в майбутньому перейти до задачі часової (і частотної) синхронізації передавачів та приймачів навіга-

ційного радіосигналу, а отже, і підвищення точності визначення доплерівського зсуву несучого радіосигналу і часової затримки поширення радіосигналу.



*Рис. 2.1. Навігаційний космічний апарат «Оскар» системи «Transit»*

У 1963 році у Радянському Союзі почали дослідно-конструкторські роботи над вітчизняною СРНС «Цикада». Але вже у 1964 році у США була створена доплерівська СРНС першого покоління NNSS (Navy Navigation Satellite System), яка пізніше отримала назву «Transit» у складі п'яти навігаційних супутників Oscar і Nova (рис. 2.1), розташованих на полярних орбітах [10].

Для позиціонування об'єктів навігації використовувався так званий інтегральний доплерівський метод, який у геометричному сенсі еквівалентний різницево-далекомірному методу. Для обчислення координат використовувалися: виміряні радіонавігаційні параметри; орбітальні параметри НКА; поточні значення курсу і швидкості судна. Для здійснення навігаційних вимірювань кожен супутник передавав безперервний навігаційний радіосигнал на двох фіксованих когерентних частотах в УКХ-діапазоні. Приймальна апаратура, яка розміщувалася на судні-користувачі (рис. 2.2), періодично, з певним інтервалом (моменти  $t_1 \dots t_4$ ), реєструвала доплерівський зсув частоти при проходженні супутника в зоні видимості (відхилення частоти навігаційного радіосигналу від номінального значення, величина якого залежить від швидкості зміни відстані між радіомаяком і приймачем). Доплерівський зсув дозволяє визначити різницю відстаней між приймачем та низкою послідовних положень НКА у фіксовані моменти часу. Кожній різниці відстаней у просторі відповідає поверхня положення – гіперболоїд обертання, який при перетині з поверхнею Землі утворює навігаційну ізолінію типу гіпербола, за множиною яких визначалося місцезнаходження споживача.



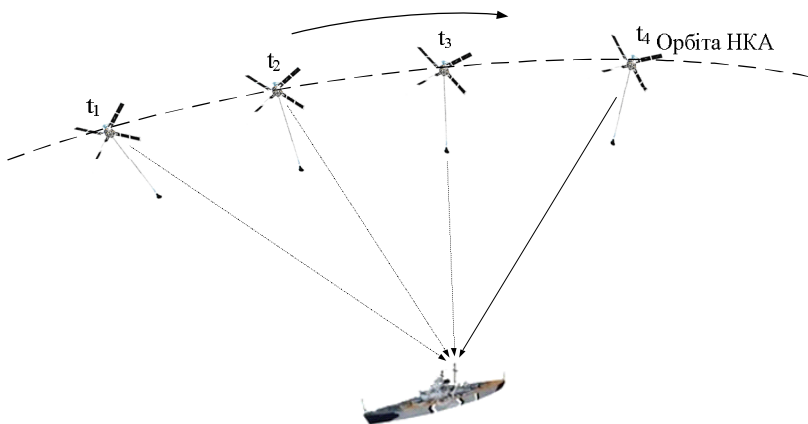
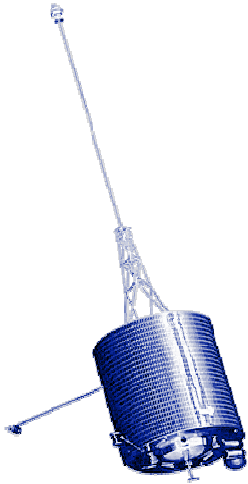


Рис. 2.2. Визначення координат доплерівським методом у системі «Transit»

Висота орбіт у системі «Transit» становить 1075 км, період обертання НКА – 107 хв, нахил орбіти до площини екватора близький до  $90^\circ$ , ексцентриситет – у межах 0,003–0,02. Зона дії системи «Transit» знаходилась у межах  $\pm 88^\circ$  діапазону широт. Точність позиціонування становила до 200 метрів, інтервал координатних визначень – близько півтори години. Пізніше кількість супутників була доведена до 6-7. У 1967 році система «Transit» була відкрита для цивільного використання, причому кількість цивільних користувачів системи суттєво перевищувала кількість військових. Супутникова система «Transit» проіснувала до 1996 року.

Визначною подією того часу, що вплинула на створення сучасних СРНС, було розпочате у 1964 році ВПС США розроблення програми використання сигналів з кодовим розширенням спектра для задач позиціонування об'єктів. Для розширення спектра запропоновані псевдовипадкові послідовності, які надають можливість кореляційного розділення навігаційних радіосигналів різних НКА, які передаються на одній несучій частоті.

У 1979 році здана в експлуатацію Радянська СРНС першого покоління «Цикада», яка мала у своєму складі 4 навігаційні космічні апарати (рис. 2.3) на колових орбітах з висотою 1000 км, нахилом  $83^\circ$  до площини екватора, площини орбіт нахилені на  $45^\circ$  один до одного. Завдяки таким параметрам орбіт НКА забезпечувалась глобальність позиціонування. Аналогічно до системи «Транзит»



*Рис. 2.3. Навігаційний космічний апарат «Космос-192» системи «Цикада»*

кожен супутник передавав безперервний навігаційний радіосигнал на двох фіксованих когерентних частотах в УКХ-діапазоні (близьких до 150 і 400 МГц), що забезпечувало введення поправки на затримку поширення сигналу в іоносфері.

Час проходження навігаційного супутника у зоні видимості становив 15 хвилин, а час координатних визначень не перевищував 6 хвилин. Внаслідок розташування супутників у приполярних орбітах та невеликій кількості супутників перерви між позиціонуванням становили до повтори години. Також до недоліків системи відносять необхідність задання швидкості приймача, одержання лише планових координат з похибкою близько 100 метрів. Надалі супутники системи "Цикада" були дообладнані супутниковою пошуково-рятувальною системою «Коспас-Сарсат».

Загальними недоліками супутникових навігаційних систем першого покоління можна вважати часові обмеження на позиціонування об'єктів, складність і тривалість координатних обчислень, обмеження на глобальність застосування, неможливість обчислення висотних координат.

### ***2.1.2. Супутникові радіонавігаційні системи другого покоління***

Подальше існування програм супутникового позиціонування обох країн набуло розвитку в супутникових радіонавігаційних системах другого покоління. Основною вимогою до призначення цих систем була глобальна оперативна навігація приземних рухомих об'єктів, до яких відносили наземні (сухопутні, морські, повітряні) і низькоорбітальні космічні. Вимога глобальності й оперативності означає для споживачів можливість визначити координати навігаційного приймача та складові вектора швидкості в будь-який момент часу та у будь якій точці земної кулі. Можливість глобального позиціонування далекомірним методом (який у цих системах обраний за базовий) передбачає наявність у зоні радіовидимості не менше 4 НКА, при цьому висота орбіт,

при якій забезпечується максимальна зона радіовидимості, становить не менше 20 000 км. Подальше збільшення висоти не приводить до збільшення зони радіовидимості, але потребує збільшення кількості НКА. За таким принципом для гарантованої видимості кількість НКА космічного угруповання має становити не менше 18 одиниць, але з метою підвищення точності та надійності вимірів кількість НКА збільшили до 24.

У 1973 році розробки військово-повітряних сил та військово-морських сил США були об'єднані у загальну програму, яка одержала назву «GPS-NAVSTAR» (Global Positioning System – Navigation System using Timing And Ranging). Застосування далекомірною методу позиціонування стало можливим завдяки використанню на борту навігаційних апаратів високостабільних рубідієвих та цезієвих генераторів частоти. Введення атомних стандартів дозволило вирішити основну проблему цього методу, а саме взаємну синхронізацію бортових шкал часу космічного угруповання НКА з точністю до наносекунд, розсинхронізація яких стає причиною обчислення хибних поверхонь положення і, відповідно, помилок у позиціонуванні.

Перший етап розроблення системи GPS закінчився у 1979 році. Була розроблена концепція функціонування системи, яка мала складати 24 діючі НКА, і проведена експериментальна перевірка, яка полягала у запуску на орбіту і тестування чотирьох НКА. Новий метод позиціонування дозволяв одержувати три координати положення та вектор руху навігаційного приймача у реальному часі. Повномасштабна розробка і випробування системи були закінчені до 1985 року. За цей час було виведено на орбіти ще 7 НКА. Починаючи з 1983 року був відкритий доступ до системи GPS для потреб цивільної авіації. Для забезпечення потреб цивільних користувачів уряд США укладав контракти з приватними фірмами на виготовлення навігаційних приймачів. У 1990 році з метою запобігання використанню GPS противником було введено обмеження (штучна похибка) на точність позиціонування.

Повнофункціональне введення системи у дію відбулося 1993 року, коли на орбітах знаходилось 24 діючі НКА. Проектні три резервні НКА були запуснені до 1995 року. Система передбачала, крім військового застосування, також і безоплатне цивільне використання. У 2000 році розпорядженням Президента США було знято об-

меження на використання сигналів підвищеної точності для цивільних потреб, що дозволило одержати суттєві інвестиції в систему від продажу GPS апаратури та послуг. Станом на кінець 2013 року космічне угруповання НКА складало 32 НКА, з них 31 НКА діючий та 1 – на етапі введення в експлуатацію. Подальший розвиток системи передбачає виведення на орбіту 48 НКА, що забезпечить точність оперативного позиціонування в межах 0,9 метрів.

Розвиток системи ГЛОНАСС (ГЛОбальна НАвігаційна Супутникова Система) у СРСР здійснювався аналогічним чином, але з певною часовою затримкою. У грудні 1976 року було прийнято рішення про створення «Єдиної космічної навігаційної системи». Перший НКА ГЛОНАСС (Космос-1413) був виведений на орбіту 1982 року. В 1993 році система була прийнята до експлуатації, а в 1995 року здійснено її повне розгортання до проектної чисельності орбітального угруповання космічного сегмента у складі 24 НКА. Термін дії НКА першого покоління становив близько 3 років, що вимагало суттєвих витрат на оновлення космічного угруповання. Цей фактор та недостатнє фінансування суттєво вплинули на кількість космічного угруповання, яке з 1998 року до 2000 року скоротилася до 9 НКА.

Відновлення системи почалось у 2001 році. Для подолання цієї проблеми були розроблені НКА другого покоління Глонасс-М з гарантованим терміном експлуатації 7 років. Перший НКА Глонасс-М був запущений у 2004 році, але сподівання на гарантований термін не виправдались, і фактично термін його експлуатації становив у середньому від 3,5 до 5 років. Наприкінці 2008 року 18 НКА забезпечували покриття території Російської Федерації, у 2010 році – 23 НКА, а станом на кінець 2013 року на орбітах знаходились 28 НКА, з них 24 діючі, 3 резервні та 1 на етапі введення в експлуатацію.

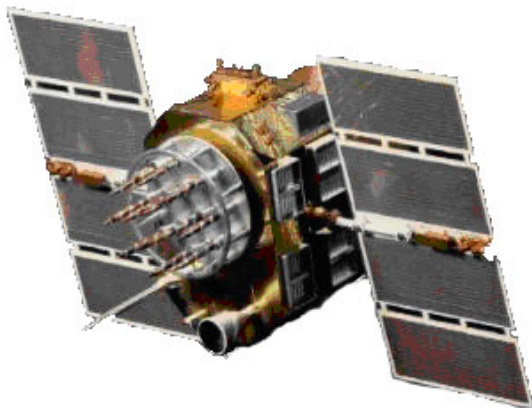
## **2.2. Розроблення і впровадження супутникових радіонавігаційних систем в інших країнах**

### **2.2.1. Європейська супутникова радіонавігаційна система *GALILEO***

У 1999 році країнами Європейського Союзу (Німеччиною, Великобританією, Францією та Італією) закінчена розробка та презентована Концепція Європейської глобальної навігаційної супутникової системи Galileo. У 2002 році прийнято рішення про

початок дослідницько-конструкторських робіт, очолюваних Європейським космічним агентством.

Концепцією створення СРНС Galileo передбачено створення космічного угруповання у складі 30 НКА (27 постійно діючих і 3 резервні). Перший демонстраційний НКА (розробки Великобританії) GIOVE-A (Galileo In-Orbit Validation Element) був запущений у 2005 році з метою випробування бортової апаратури і тестування далекомірних сигналів у всіх частотних діапазонах (рис. 2.4).



*Рис. 2.4. Навігаційний космічний апарат GIOVE-A системи «Galileo»*

Протягом 2011–2012 років було виведено на орбіти 4 НКА Galileo IOV (In-Orbit validation), які утворили перше сузір'я СРНС Galileo, за допомогою яких 12 березня 2013 року було виконано перше позиціонування об'єкта з точністю 10–15 метрів.

Очікується, що розгортання СРНС Galileo розпочнеться з 2015 року і триватиме до 2020. Загалом у проекті Galileo, крім країн ЄС, беруть участь Китай, Ізраїль, Південна Корея, Україна, Росія тощо.

### ***2.2.2. Китайська супутникова радіонавігаційна система Compass (Beidou II)***

З 2000 року почалося розгортання регіональної СРНС Beidou-1 (кит. *beidou*, буквально – Північний Ківи, китайська назва сузір'я Великої Ведмедиці) у складі 4 НКА на геостационарних орбітах (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Навігаційний космічний апарат «Beidou»

У 2006 році КНР оголосила про створення глобальної СРНС Compass (Beidou II), проектна структура якої передбачає 5 НКА на геостаціонарних орбітах та 27 НКА на середньовисотних орбітах у трьох площинах. На кінець 2013 року склад космічного угруповання налічував 16 НКА, який забезпечував точність позиціонування в зоні покриття (Азіатсько-Тихоокеанський регіон) до 10 метрів. Точність таймінгу (синхронізації віддалених об'єктів) становить близько

50 наносекунд. У 2014 році планується виведення на орбіту в тестовому режимі НКА нового покоління Beidou-2, що засвідчить про початок фінальної стадії розгортання системи. До 2020 року уряд КНР планує розгортання космічного угруповання у складі 35 НКА, що забезпечить глобальність функціонування.

### 2.2.3. Індійська супутникова регіональна система навігації

У 2006 році представлений проект розгортання Індійської супутникової регіональної системи навігації (IRNSS), яка складається з 7 НКА на геосинхронних орбітах (з них 4 на похилих орбітах з нахилом  $29^\circ$ ) (рис. 2.6). Наземний сегмент контролю та керування IRNSS буде мати станцію моніторингу, станцію резервування, станцію контролю й управління бортовими системами.

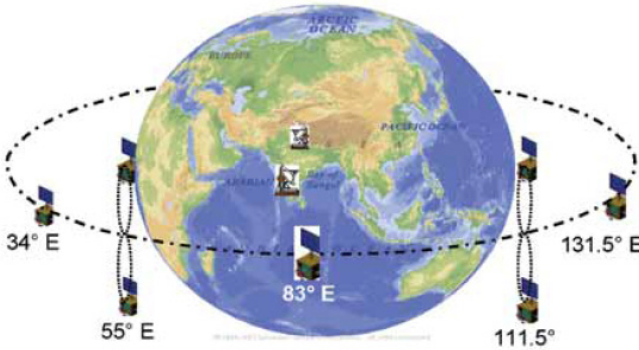


Рис. 2.6. Структура космічного сегмента системи «IRNSS»

Відповідальною за розгортання IRNSS призначена державна компанія ISRO, яка буде перебувати цілком під контролем Індійського уряду. Навігаційні приймачі, які будуть приймати сигнали IRNSS, також будуть розроблятися і випускатися індійськими компаніями. Планується, що точність позиціонування IRNSS сягатиме близько 20 метрів для регіону Індійського океану (близько 1500 км навколо Індії) і менше 10 метрів – безпосередньо для Індії і територій суміжних держав, охоплених цією системою навігації.

Перший НКА IRNSS-1A виведений на орбіту 1 липня 2013 року (рис. 2.7) [11]. Повне розгортання системи планується у 2015 році.

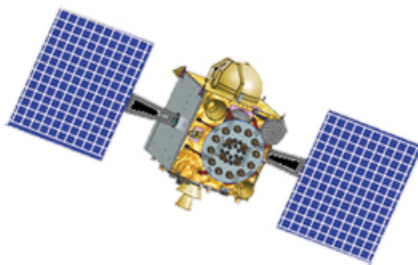


Рис. 2.7. Навігаційний космічний апарат IRNSS-1A системи «IRNSS»

#### **2.2.4. Японська супутникова радіонавігаційна система QZSS (Quasi-Zenith Satellite System)**

Система QZSS створювалася як регіональна система синхронізації часу й одна із систем диференційної корекції для системи GPS, надання послуг зв'язку і мобільних додатків. З погляду навігації система призначена для покращення характеристик GPS на території Японії та суміжних територіях. Космічний сегмент утворюється трьома супутниками, які мають знаходитись на високій еліптичній орбіті, що дозволяє більшу частину часу доби знаходитись з кутом піднесення більшим ніж  $70^\circ$ . Орбіти НКА обрані таким чином, що підсупутникові траси описують на поверхні землі ту ж саму траєкторію (рис. 2.8).



Рис. 2.8. Підсупутникова траса

Перший супутник «Митибики» запущений у 2010 році. Сигнали супутників повністю сумісні з сигналами GPS (L1 – 1575,42 МГц; L2 – 1227,60 МГц; L5 – 1176,45 МГц).

У системі QZSS використовується система синхронізації часу віддалених наземних об'єктів (TKS – timekeeping system), за якої супутники є ретрансляторами сигналів, що передаються з наземних станцій. Такий підхід суттєво здешевшує і полегшує супутники, оскільки вони не містять атомних стандартів частоти і часу, що є безумовною перевагою перед іншими СРНС.

До 2017 року планується введення в дію трьох додаткових супутників. Очікується, що система підвищить ефективність розв'язків навігаційних задач, які вимагають позиціонування об'єктів з високою точністю (до 10 см) і надійністю даних.

### ***Питання для самоконтролю***

- 1. Коли були створенні перші СРНС?*
- 2. Який принцип позиціонування був закладений у перші СРНС?*
- 3. Які основні недоліки СРНС першого покоління?*
- 4. Який метод позиціонування обраний базовим у СРНС другого покоління?*
- 5. Перелічіть сучасні створені та створювані СРНС.*



### Розділ 3. СТРУКТУРА СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

*На сьогодні існує дві діючі повнофункціональні глобальні супутникові радіонавігаційні системи: GPS і ГЛОНАСС, структури яких майже однакові. Крім того, за цією ж структурою будуються інші СРНС, що плануються до розгортання та введення в дію найближчим часом. Відповідно до цього, у цьому розділі розглядаються структури лише діючих, повністю розгорнутих СРНС GPS і ГЛОНАСС.*

#### 3.1. Узагальнена структура супутникових радіонавігаційних систем

В основі концепції визначення координат СРНС другого покоління (GPS і ГЛОНАСС) лежать принципи **глобальності** – позиціонування об'єкта в будь-якій точці земної кулі з заданою точністю, **незалежності** – обчислення координат безпосередньо в апаратурі споживачів, і **беззапитовості** – обчислення координат безпосередньо в навігаційному приймачі виключно на підставі прийнятих сигналів від супутників з наперед відомими координатами (тобто апаратура споживачів є пасивною, не випромінює жодних радіосигналів), що робить приймачі компактними та прихованими для засобів радіовиявлення (з позиції військового застосування) та робить пропускну спроможність СРНС необмеженою (кількість навігаційних приймачів може бути необмеженою).

Ці три принципи та інші вимоги, до яких відносяться стійкість, безперервність обслуговування, точність позиціонування, доступність навігаційного сигналу, цілісність, визначають узагальнену структуру СРНС, яка включає три основні сегменти (рис. 3.1):

- космічний сегмент (підсистема навігаційних космічних апаратів, угруповання навігаційних супутників);
- наземний сегмент контролю та управління<sup>2</sup> (контрольний сегмент, наземний командно-вимірювальний комплекс);
- сегмент споживачів.

---

<sup>2</sup> На думку авторів, термін "управління" більш логічно визначає процес здійснення дистанційного впливу на космічний апарат, ніж термін "керування", який теж використовується в галузі експлуатації космічної техніки. Крім того, з 1 жовтня 2004 року діє ДСТУ 4220-2003 «Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) з космосу. Терміни та визначення понять», де визначено для користування термін "наземний автоматизований комплекс управління (космічними апаратами)".

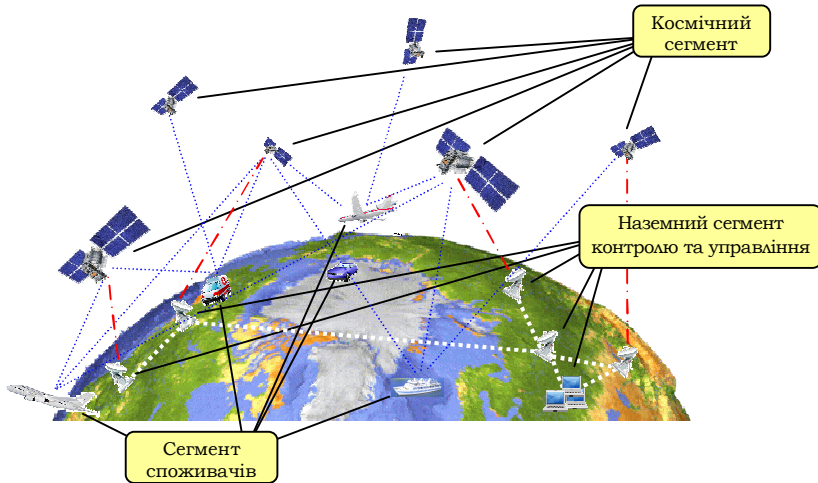


Рис. 3.1. Узагальнена структура СРНС

Наведені в дужках різні назви тих самих сегментів зустрічаються в різних літературних джерелах, проте вони визначають той самий набір технічних засобів, який розв'язує ті самі задачі.

Визначені підсистеми функціонують як єдине ціле (відповідно до принципу цілісності) з метою визначення просторово-часового вектора споживача.

Крім основних сегментів, також існують підсистеми, які виконують роль функціонального доповнення СРНС, а саме:

- диференційна підсистема (призначена для підвищення точності позионування об'єктів);
- допоміжні засоби (канали супутникового та наземного зв'язку, засоби виводу супутників на орбіту тощо).

Наведені підсистеми дозволяють значно підвищити точність обсервації, виявляти та ідентифікувати порушення в режимах роботи систем, своєчасно попереджати споживачів та підтримувати режим диференційних вимірювань.

### 3.2. Узагальнена структура космічного сегмента

Космічний сегмент включає угруповання НКА, які рівномірно розподілені по орбітах навколо земної поверхні і призначені для створення навігаційного поля.

Космічні апарати можуть перебувати у трьох функціональних станах: діючому, резервному або на технічному обслуговуванні.

Резервні космічні апарати призначені для оперативної заміни супутників, що вийшли з ладу (виведені на технічне обслуговування), або для нарощування космічного угруповання супутників і збільшення ступеня покриття певного регіону. До складу космічного сегмента також відноситься космодром.

Основними функціями космічного сегмента є:

- формування глобального навігаційного поля, яке створюється з множини безперервно випромінюваних навігаційних радіосигналів, які є основою для обчислення координат навігаційними приймачами, контролю ефемерид супутників та моніторингу справності бортових систем;
- приймання та відпрацювання командно-програмної інформації, яка передається радіотехнічними засобами наземного сегмента контролю та управління;
- підтримка точного часу за допомогою декількох бортових атомних стандартів частоти та синхронізація часових шкал просторо-віддалених об'єктів.

Орбіти і координати НКА обчислюються постійно і з високою точністю. ***Орбіта*** – траєкторія, по якій рухається небесне тіло щодо центрального тіла і яке завжди знаходиться в тій самій площині. Координати будь-якого НКА з космічного угруповання відомі у будь-який момент часу і вкладаються у навігаційне повідомлення, яке передається у складі навігаційного радіосигналу. Координати навігаційних супутників у конкретний момент часу в супутниковій навігації називаються ***ефемеридами*** НКА. ***Навігаційне повідомлення*** – повідомлення, що передається навігаційним супутником по радіолініях і містить далекомірні компоненти для виміру дальності і компоненти службових повідомлень (ефемериди, час, вектор швидкості тощо).

Радіопередавачі супутників безперервно випромінюють радіонавігаційні сигнали у напрямку до Землі. Ці сигнали приймаються навігаційним приймачем, що знаходиться в певній точці земної поверхні, координати якої потрібно визначити. Структура космічного сегмента забезпечує постійний радіозв'язок для споживачів з НКА певної кількості. Кількість видимих супутників і параметри їх сигналів є основними чинниками для точності обчислення координат. Здебільшого, кількість видимих супутників повинна становити 4–5, але на практиці структура сузір'я буду-

ється з розрахунку мінімум 6 видимих НКА [12]. Діючі середньо-висотні орбіти супутників (близько 20 000 км) забезпечують радіовидимість супутника майже на половині поверхні землі і дозволяють створювати необхідну надмірність та обирати оптимальне *сузір'я супутників* – група НКА, яка знаходиться у зоні радіовидимості навігаційного приймача і визначена ним як опорні для позиціонування.

НКА являють собою достатньо складну технічну систему, на яку покладено виконання таких основних функцій:

- випромінювання високостабільних навігаційних радіосигналів;
- приймання, зберігання і передавання цифрової навігаційної інформації;
- формування, цифрування і передача сигналів точного часу;
- ретрансляція або випромінювання сигналів для проведення траєкторних вимірювань з метою контролю орбіти і визначення поправок до бортової шкали часу;
- приймання та оброблення разових команд;
- приймання, запам'ятовування і виконання тимчасових програм керування режимами функціонування НКА на орбіті;
- формування телеметричної інформації про стан бортової апаратури і передавання її для оброблення й аналізу в наземному комплексі управління;
- приймання і виконання кодів/команд корекції і фазування бортової шкали часу;
- формування і передавання «ознаки несправності» при виході важливих контрольованих параметрів за межі норми.

До складу бортової апаратури входять:

- навігаційний комплекс;
- комплекс управління;
- система орієнтації та стабілізації;
- система корекції;
- система терморегулювання;
- система електропостачання.

***Навігаційний комплекс*** забезпечує функціонування супутника як елемента системи навігації. До складу комплексу входять: хронізатор (високостабільний генератор частоти), формувач наві-

гаційних радіосигналів, бортовий комп'ютер, приймач навігаційної інформації і передавач навігаційних радіосигналів. **Хронізатор** забезпечує видачу високостабільних синхрочастот на бортову апаратуру, формування, зберігання, корекцію і видачу бортової шкали часу. **Формувач навігаційних радіосигналів** забезпечує формування псевдовипадкових багатокомпонентних фазоманіпульованих навігаційних радіосигналів, які містять далекомірний код і навігаційне повідомлення.

**Комплекс управління** забезпечує управління системами супутника і контролює правильність їх функціонування. До складу комплексу входять: командно-вимірювальна система, блок управління бортовою апаратурою і система телеметричного контролю. **Командно-вимірювальна система** забезпечує вимірювання дальності в запитовому режимі, контроль бортової шкали часу, управління системою по разових командах і часових програмах, запис навігаційної інформації в бортовий навігаційний комплекс і передачу телеметрії. **Блок управління** забезпечує розподіл живлення на системи і прилади супутника, логічну обробку, розмноження і посилення разових команд. **Система телеметричного контролю** призначена для контролю систем і устаткування НКА в режимі штатної експлуатації.

**Система орієнтації і стабілізації** забезпечує заспокоєння супутника після відділення від ракети-носія, початкову орієнтацію сонячних батарей на Сонце і поздовжньої осі супутника на Землю, потім орієнтацію поздовжньої осі супутника на центр Землі і націлювання сонячних батарей на Сонце, а також стабілізацію супутника у процесі корекції орбіти. В системі використовується прилад для орієнтації на центр Землі (на основі інфрачервоної побудови місцевої вертикалі) і прилад для орієнтації на Сонце. Похибка орієнтації на центр Землі не більше  $3^\circ$ , а відхилення нормалі до поверхні сонячної батареї від напрямку на Сонце – не більш  $5^\circ$ .

**Система корекції** забезпечує приведення супутника в задане положення у площині орбіти і його утримання в цих межах по аргументу широти. Система включає рухову установку і блок управління нею. Рухова установка складається з двигунів орієнтації і двигунів корекції.

**Система терморегулювання** забезпечує необхідний тепловий режим супутника. Регулювання тепла, що відводиться з гермокон-

тейнера, здійснюють жалюзі, які відкривають або закривають радіаційну поверхню залежно від температури газу. Відведення тепла від приладів здійснюється циркулюючим газом за допомогою вентилятора.

**Система електропостачання** включає сонячні батареї, акумуляторні батареї, блок автоматики і стабілізації напруги.

Для забезпечення надійності на НКА встановлюються по два або по три комплекти основних бортових систем.

### 3.2.1. Структура космічного сегмента GPS

Проектне угруповання навігаційних космічних апаратів GPS складається з 24 діючих супутників і не менш 3 резервних, які мають рівномірний розподіл по шістьох орбітах (рис. 3.2).

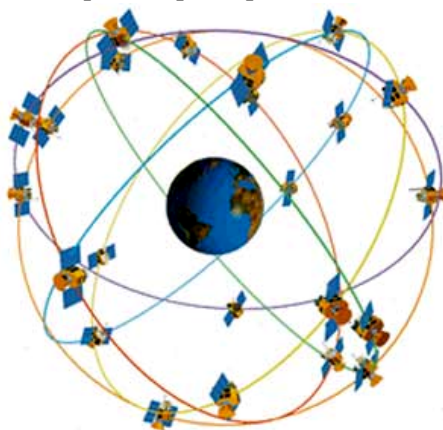


Рис. 3.2. Орбітальна структура СРНС GPS

Орбіти нахилені до площини екватора під кутом  $55^\circ$ , кут між площинами орбіт становить  $60^\circ$ . Висота орбіт близько 20 180 км. Період обігу навігаційних супутників становить близько 12 годин (11 год 58 хв). Орбіти супутників космічного угруповання GPS синхронні (мають слід на поверхні землі у вигляді двох витків підсупутникової траси – проекції супутника на поверхню

землі), що приводить до того, що неоднорідне магнітне поле землі по-різному впливає на супутники угруповання і вимагає постійного корегування положення на орбіті окремих супутників. Ідентифікація супутників може проводитися за номером запуску в системі GPS (SVN номер), за номером псевдовипадкової послідовності (PRN), за номером у каталозі NASA, за міжнародним номером, а також за положенням в угрупованні. В останньому випадку використовується двосимвольний код: буква (від А до F) означає орбітальну площину, а цифра – номер супутника на площині (від 1 до 4 у повному проектному угрупованні). У кожній орбітальній площині є запасні слоти, для яких зарезервовані позначення А5, В5 тощо.

Розподіл супутників по орбітах підібраний таким чином, що в зоні видимості над кожною точкою земної поверхні постійно знаходиться сузір'я як мінімум з п'яти супутників. Виняток становлять полярні і приполярні області. Супутники можуть змінювати своє положення на орбіті за командою з Землі для заміни супутників, які вийшли з ладу або збільшення покриття на певній території.

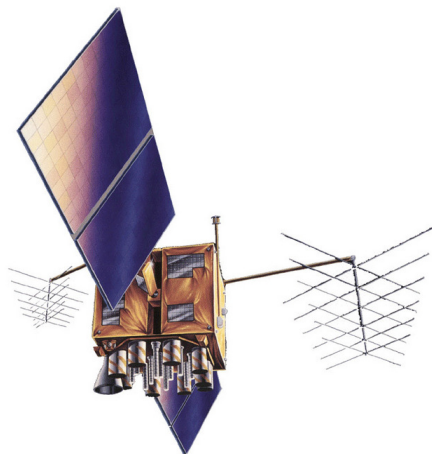
Одночасно використовуються декілька типів навігаційних супутників (табл. 3.1). У середині 1980-х років були запуснені перші НКА серії Block I.

Таблиця 3.1

*Склад космічного угруповання GPS*

| Block  | Період існування, роки | Кількість запусків НКА |            |           |             | Перебуває в дії в дійсний час |
|--------|------------------------|------------------------|------------|-----------|-------------|-------------------------------|
|        |                        | Запущено               | Не успішно | Готується | Заплановано |                               |
| I      | 1978–1985              | 10                     | 1          | 0         | 0           | 0                             |
| II     | 1989–1990              | 9                      | 0          | 0         | 0           | 0                             |
| IIA    | 1990–1997              | 19                     | 0          | 0         | 0           | 8                             |
| IIR    | 1997–2004              | 12                     | 1          | 0         | 0           | 12                            |
| IIR-M  | 2005–2009              | 8                      | 0          | 0         | 0           | 7                             |
| IIF    | 2010–2013              | 1                      | 0          | 11        | 0           | 4                             |
| IIIA   | 2014                   | 0                      | 0          | 0         | 12          | 0                             |
| Всього |                        | 59                     | 2          | 11        | 12          | 31                            |

Наступна серія НКА, іменована Block II, виводилася на орбіту починаючи з 1989 року. До квітня 1994 року, коли припинив роботу останній НКА серії Block I, на орбіті вже знаходилося 24 НКА серії Block II. Наступна серія НКА отримала скорочену назву Block IIR (Replenishment – новий ресурс) (рис. 3.3). Запуск цієї серії почався в 1996 році. Серія, запуск якої відбувся у період 2010–2011 років, отримала умовну назву Block IIF (Follow-on – модернізація у процесі експлуатації). 4 жовтня 2012 року американські військові вивели на орбіту новий супутник



*Рис. 3.3. Навігаційний супутник Block IIR*

Block II-F-3, який призначений для покращення навігаційного покриття для цивільних та військових споживачів. З 2014 року планується введення в дію супутників нового покоління Block IIIA. Сучасний стан орбітального угруповання GPS наведений у таблиці 3.2 [13].

Таблиця 3.2  
Стан космічного угруповання GPS на 02.12.2013 року  
за аналізом альманаху

| Номер площини | Номер точки | ПВП | Номер NORAD | Тип НКА | Дата запуску | Дата введення в дію | Фактичне існування (міс.) |
|---------------|-------------|-----|-------------|---------|--------------|---------------------|---------------------------|
| <b>A</b>      | 1           | 9   | 22700       | II-A    | 26.06.93     | 20.07.93            | 244,6                     |
|               | 2           | 31  | 29486       | III-R-M | 25.09.06     | 13.10.06            | 85,7                      |
|               | 3           | 8   | 25030       | II-A    | 06.11.97     | 18.12.97            | 191,6                     |
|               | 4           | 7   | 32711       | III-R-M | 15.03.08     | 24.03.08            | 68,4                      |
|               | 5           | 24  | 38833       | II-F    | 04.10.12     | 14.11.12            | 12,6                      |
| <b>B</b>      | 1           | 16  | 27663       | II-R    | 29.01.03     | 18.02.03            | 129,5                     |
|               | 2           | 25  | 36585       | II-F    | 28.05.10     | 27.08.10            | 39,2                      |
|               | 3           | 28  | 26407       | II-R    | 16.07.00     | 17.08.00            | 159,6                     |
|               | 4           | 12  | 29601       | III-R-M | 17.11.06     | 13.12.06            | 83,7                      |
| <b>C</b>      | 1           | 29  | 32384       | III-R-M | 20.12.07     | 02.01.08            | 71,0                      |
|               | 2           | 3   | 23833       | II-A    | 28.03.96     | 09.04.96            | 211,9                     |
|               | 3           | 19  | 28190       | II-R    | 20.03.04     | 05.04.04            | 116,0                     |
|               | 4           | 17  | 28874       | III-R-M | 26.09.05     | 13.11.05            | 96,7                      |
|               | 5           | 27  | 39166       | II-F    | 15.05.13     | 21.06.13            | 5,4                       |
|               | 6           | 6   | 23027       | II-A    | 10.03.94     | 28.03.94            | 236,4                     |
| <b>D</b>      | 1           | 2   | 28474       | II-R    | 06.11.04     | 22.11.04            | 108,4                     |
|               | 2           | 1   | 37753       | II-F    | 16.07.11     | 14.10.11            | 25,6                      |
|               | 3           | 21  | 27704       | II-R    | 31.03.03     | 12.04.03            | 127,8                     |
|               | 4           | 4   | 22877       | II-A    | 26.10.93     | 22.11.93            | 240,5                     |
|               | 5           | 11  | 25933       | II-R    | 07.10.99     | 03.01.00            | 167,1                     |
| <b>E</b>      | 1           | 20  | 26360       | II-R    | 11.05.00     | 01.06.00            | 162,1                     |
|               | 2           | 22  | 28129       | II-R    | 21.12.03     | 12.01.04            | 118,8                     |
|               | 3           | 5   | 35752       | III-R-M | 17.08.09     | 27.08.09            | 51,2                      |
|               | 4           | 18  | 26690       | II-R    | 30.01.01     | 15.02.01            | 153,6                     |
|               | 5           | 32  | 20959       | II-A    | 26.11.90     | 10.12.90            | 275,9                     |
|               | 6           | 10  | 23953       | II-A    | 16.07.96     | 15.08.96            | 207,7                     |
| <b>F</b>      | 1           | 14  | 26605       | II-R    | 10.11.00     | 10.12.00            | 155,8                     |
|               | 2           | 15  | 32260       | III-R-M | 17.10.07     | 31.10.07            | 73,1                      |
|               | 3           | 13  | 24876       | II-R    | 23.07.97     | 31.01.98            | 190,2                     |
|               | 4           | 23  | 28361       | II-R    | 23.06.04     | 09.07.04            | 112,9                     |
|               | 5           | 26  | 22014       | II-A    | 07.07.92     | 23.07.92            | 256,5                     |



Розміри кожного НКА становлять близько 1,5 м завширшки і 5,3 м у довжину, включаючи сонячні панелі. Інші характеристики НКА наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

*Характеристики НКА GPS*

| Характеристика                 | Тип супутника    |                  |                  |                                  |  |
|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------------|--|
|                                | Block II         | Block IIA        | Block IIR        | Block IIR-M                      | Block IIF                                |
| Маса, кг                       | 885              | 1500             | 2000             | 2000                             | 2170                                     |
| Термін життя, років            | 7                | 7                | 10               | 10                               | 15                                       |
| Бортовий час                   | Cs               | Cs               | Rb               | Rb                               | Rb&Cs                                    |
| Міжсупутниковий зв'язок        | Ні               | Так              | Так              | Так                              | Так                                      |
| Автономна робота, днів         | 14               | 180              | 180              | 180                              | Більше 60                                |
| Антирадіаційний захист         | Ні               | Ні               | Так              | Так                              | Так                                      |
| Антенa                         | -                | -                | Поліпшена        | Поліпшена                        | Поліпшена                                |
| Можливість настройки на орбіті | Слаба            | Слаба            | Середня          | Сильна                           | Підвищена                                |
| Навігаційний сигнал            | L1:C/A+P<br>L2:P | L1:C/A+P<br>L2:P | L1:C/A+P<br>L2:P | L1:C/A+P+<br>M<br>L2:C/A+P+<br>M | L1:C/A+P+<br>M<br>L2:C/A+P+<br>M<br>L5:C |
| Потужність борт. передав.      | Низька           | Низька           | Середня          | Велика                           | Підвищена                                |

У порівнянні з діючими, НКА Block III матиме такі особливості:

- очікуваний термін життя супутника – 12–18 років;
- вартість кожного супутника – 100–120 мільйонів доларів;
- запуск двох супутників буде здійснюватись однією ракетою;
- підвищення потужності навігаційного сигналу для військових потреб на 20 дБ, що забезпечить більшу завадозахищеність;
- очікувана точність місцевизначення становитиме 0,9 м без організації додаткових заходів.

Запуск перших двох НКА GPS Block IIIA заплановано на 2014 рік.

### 3.2.2. Структура космічного сегмента ГЛОНАСС

Проектне угруповання навігаційних космічних апаратів ГЛОНАСС складається з 24 супутників, які мають рівномірний розподіл по трьох орбітах, нахилених до площини екватора на кут  $64,8^\circ$ . Розрахункова кількість резервних супутників – 3.

Площини орбіт рознесені на  $120^\circ$  по абсолютній довготі висхідного кута і мають умовні номери 1, 2, 3. Розрахунково, на кожній орбіті повинно було знаходитись по 8 супутників. Орбіти супутників близькі до колових, з номінальною висотою 19 100 км (фактично 18 840–19 440 км). Період обігу супутника на орбіті 11 год 15 хв 44 с. Інтервал повторюваності трас руху супутників становить 17 витків, або 7 діб 23 години 27 хвилин 23 секунди, тобто супутники у своєму орбітальному русі не синхронні з обертанням Землі. Початок кожного наступного витка супутника зсувається відносно Землі на кут близько  $21^\circ$  по довжині. Внаслідок цього вплив несиметричного гравітаційного поля Землі рівномірно розподіляється між супутниками угруповання і, на відміну від GPS, практично не впливає на орбіти навігаційних супутників. Таким чином усувається потреба в постійному корегуванні орбіт супутників ГЛОНАСС протягом всього терміну їх експлуатації.

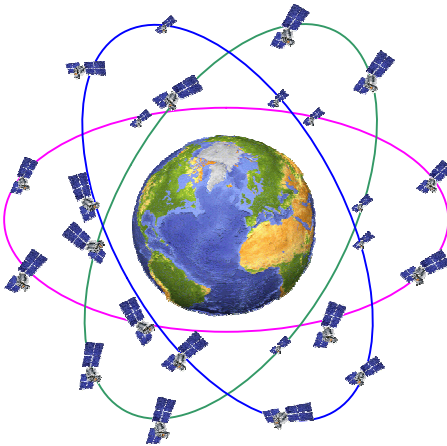


Рис. 3.4. Орбітальна структура СРНС ГЛОНАСС

Навігаційним супутникам першої орбітальної площини привласнені системні номери від 1 до 8, другої орбітальної площини – від 9 до 16, третьої орбітальної площини – від 17 до 24 (рис. 3.4). Системні номери навігаційних супутників в орбітальних площинах зростають у напрямку проти їх руху [14]. Номінальна відстань між сусідніми НКА у площині по аргументу широти становить  $45^\circ$ . Технічно, задана точність координатно-часових вимірів досягається за наявності 21 супутника

(по 7 на кожній орбіті), а решта знаходяться у резерві. Станом на 1 вересня 2010 року до складу космічного угруповання ГЛОНАСС входило 23 супутники (рис. 3.5).

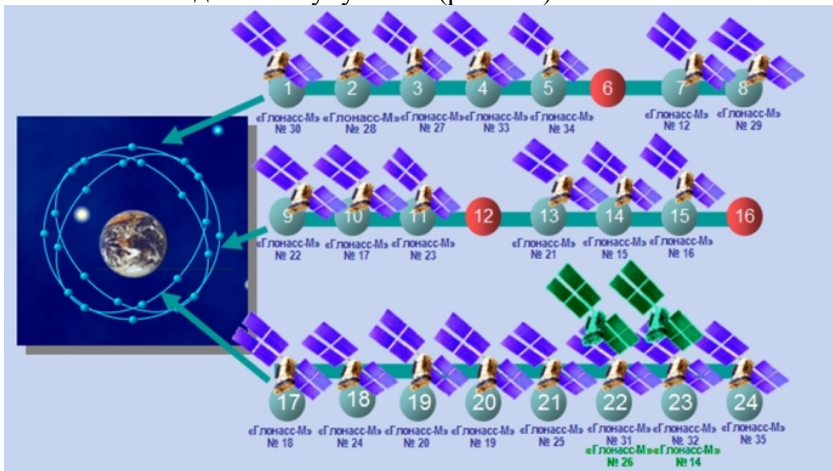


Рис. 3.5. Склад космічного сегмента СРНС ГЛОНАСС

12 жовтня 2010 року введено в дію ще 3 супутники Глонасс-М (рис. 3.6), і до кінця року планувалося введення ще трьох супутників, але через технічну аварію 5 грудня 2010 року введення нових супутників відкладено до серпня 2011 року. (Поточна інформація про склад та функціонування супутників СРНС ГЛОНАСС наведена на сайті <http://www.glonass-ianc.rsa.ru>).



Рис. 3.6. Навігаційний супутник Глонасс-М

Виведення навігаційного супутника на орбіту здійснюється по груповій схемі, по три супутники одночасно. Схема виведення складається з трьох етапів:

- виведення головної частини на проміжну колову орбіту висотою близько 200 км;
- перехід на еліптичну орбіту з перигеєм близько 200 км, апогеєм 19 100 км і нахилом  $64,3^\circ$ ;
- перехід на колову орбіту заввишки 19 100 км.

Постановка НКА в задану системну точку може зайняти від тижня до місяця і залежить від співвідношення між точкою виведення супутника на орбіту і кінцевою системною точкою.

Космічне угруповання ГЛОНАСС переважним чином містить навігаційні супутники Глонасс-М (найменування за дослідно-конструкторською роботою – «Ураган-М») – серія космічних апаратів 2-го покоління СРНС ГЛОНАСС. Від супутників серії «Глонасс» (1-е покоління) (рис. 3.7) відрізняються гарантованим терміном активного існування (7 років) і використанням імпортних (французьких) комплектуючих. Супутники Глонасс-М випромінюють, на відміну від апаратів попереднього покоління, 2 сигнали для цивільних споживачів, що дозволяє істотно підвищити точність місцевизначення. Основні технічні характеристики супутників наведені в таблиці 3.4.



*Рис. 3.7. Навігаційний супутник Глонасс*

Подальший розвиток космічного сегмента полягає у поступовій заміні супутників Глонасс-М супутниками Глонасс-К (найменування за ДКР «Ураган-К») – серії космічних апаратів 3-го покоління (рис. 3.8). Від супутників попередньої серії відрізняються гарантованим терміном активного існування 10 років, зменшеною масою, негерметичним виконанням й іншими удосконаленнями.

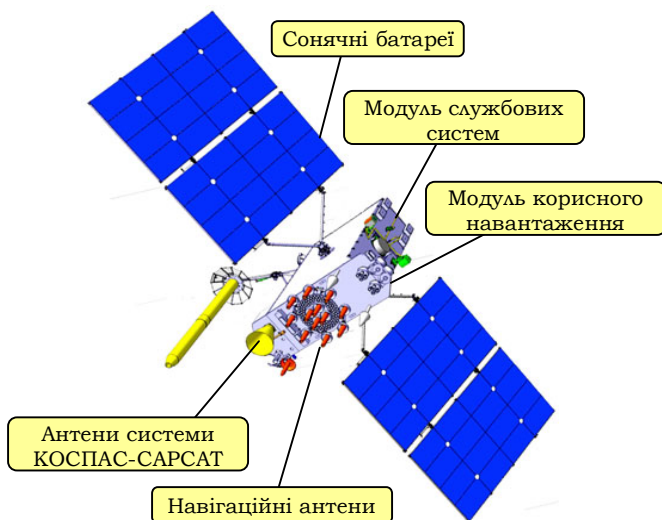


Рис. 3.8. Навігаційний супутник Глонасс-К

Космічний апарат Глонасс-К будується на базі негерметичної платформи «Експрес 1000» з використанням суто російських комплектуючих. На корпус у формі паралелепіпеда встановлюється бортова апаратура, здатна працювати в умовах відкритого космосу.

Відсутність гермоконтейнера дозволила зменшити масу супутника до 935 кг. На Глонасс-К встановлюватиметься апаратура міжнародної системи рятування потерпілих лихо КОСПАС-САРСАТ.

На 2013–2014 роки заплановано запуск вдосконаленого супутника Глонасс-К2, в якому з'являться два шифровані сигнали в діапазонах частот L1, L2 і L3 і відкритий сигнал у діапазоні L1. У 2015–2017 роках у серію піде супутник Глонасс-КМ, в якому буде використовуватися до 8 сигналів у форматі CDMA.

Результатом програми модернізації супутників і наземних комплексів управління стане збільшення точності навігаційних визначень системи ГЛОНАСС у 2–2,5 рази, що становитиме близько 2,8 м для цивільних споживачів (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

*Характеристики НКА ГЛОНАСС*

| Серія КА     | Рік розгортання | Стан                     | Частота та вид сигналу        |                        |                               |                     |                         |                        | Стабільність частоти |
|--------------|-----------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|
|              |                 |                          | 1602 +n×0,5625 МГц (L1, FDMA) | 1575,42 МГц (L1, CDMA) | 1246 +n×0,4375 МГц (L2, FDMA) | 1242 МГц (L2, CDMA) | 1202,025 МГц (L3, CDMA) | 1176,45 МГц (L5, CDMA) |                      |
| «Глонасс»    | 1982            | Вилучений з використання | L1OF, L1SF                    | –                      | L2SF                          | –                   | –                       | –                      | $5 \times 10^{-13}$  |
| «Глонасс-М»  | 2003            | У використанні           | L1OF, L1SF                    | –                      | L2OF, L2SF                    | –                   | –                       | –                      | $1 \times 10^{-13}$  |
| «Глонасс-К1» | 2010            | Вводиться у використання | L1OF, L1SF                    | –                      | L2OF, L2SF                    | –                   | L3OC                    | –                      | $5 \times 10^{-14}$  |
| «Глонасс-К2» | 2014            | У розробці               | L1OF, L1SF                    | L1OC, L1SC             | L2OF, L2SF                    | L2SC                | L3OC                    | –                      | $1 \times 10^{-14}$  |
| «Глонасс-КМ» | 2015            | На стадії вивчення       | L1OF, L1SF                    | L1OC, L1SC, L1OC M     | L2OF, L2SF                    | L2SC, L2OC          | L3OC, L3SC              | L5OC                   | –                    |

"O": відкритий стандартний сигнал, "S": шифрований сигнал високої точності; "F": множинний доступ з частотним розділенням каналів (FDMA), "C": множинний доступ з кодовим розділенням каналів (CDMA); n=-7,-6,-5,...,6

Сучасний стан космічного угруповання, за даними [13], наведений у табл. 3.5.

До складу бортового устаткування входять: бортовий синхронізатор, бортовий навігаційний передавач, блоки формування навігаційних сигналів, бортова ЕОМ, системи орієнтації і корекції орбіти, телеметрії, прийому сигналів наземного комплексу управління, терморегулювання й електроживлення.

Таблиця 3.5

Стан угруповання НКА ГЛОНАСС на 02.12.2013 року  
за аналізом альманаху

| № точки | № пл. (орбіти) | Дата запуску | Дата введення в систему | Дата виведення з системи | Фактичне функціонування (міс.) | Придатність за повідомленнями |                     | Примітка   |
|---------|----------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------|------------|
|         |                |              |                         |                          |                                | Альманах                      | Ефемерид (UTC)      |            |
| 1       | 2              | 3            | 4                       | 5                        | 6                              | 7                             | 8                   | 9          |
| 1       | 1              | 14.12.09     | 30.01.10                |                          | 47,6                           | +                             | + 16:59<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 2       | 1              | 26.04.13     | 04.07.13                |                          | 7,2                            | +                             | + 16:59<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 3       | 1              | 04.11.11     | 08.12.11                |                          | 25,0                           | +                             | + 17:00<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 4       | 1              | 02.10.11     | 25.10.11                |                          | 26,0                           | +                             | + 18:31<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 5       | 1              | 14.12.09     | 10.01.10                |                          | 47,6                           | +                             | + 18:31<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 6       | 1              | 14.12.09     | 24.01.10                |                          | 47,6                           | +                             | + 18:30<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 7       | 1              | 04.11.11     | 18.12.11                |                          | 25,0                           | +                             | + 16:59<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 8       | 1              | 04.11.11     | 20.09.12                |                          | 25,0                           | +                             | + 16:59<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 9       | 2              | 02.09.10     | 04.10.10                |                          | 39,0                           | +                             | + 16:59<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 10      | 2              | 25.12.06     | 03.04.07                |                          | 83,3                           | +                             | + 16:59<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 11      | 2              | 25.12.07     | 22.01.08                |                          | 71,3                           | +                             | + 16:59<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 12      | 2              | 02.09.10     | 12.10.10                |                          | 39,0                           | +                             | + 16:59<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 13      | 2              | 25.12.07     | 08.02.08                |                          | 71,3                           | +                             | + 17:45<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 14      | 2              | 25.12.06     | 03.04.07                |                          | 83,3                           | +                             | + 18:30<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 15      | 2              | 25.12.06     | 12.10.07                |                          | 83,3                           | +                             | + 18:30<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 16      | 2              | 02.09.10     | 11.10.10                |                          | 39,0                           | +                             | + 18:30<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 17      | 3              | 28.11.11     | 23.12.11                |                          | 24,2                           | +                             | + 16:59<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |
| 18      | 3              | 25.09.08     | 26.10.08                |                          | 62,3                           | +                             | + 16:59<br>02.12.13 | Вик. за ЦП |

Закінчення табл. 3.5

| 1  | 2 | 3        | 4        | 5        | 6     | 7 | 8                   | 9            |
|----|---|----------|----------|----------|-------|---|---------------------|--------------|
| 19 | 3 | 26.10.07 | 25.11.07 |          | 73,3  | + | + 16:59<br>02.12.13 | Вик. за ЦП   |
| 20 | 3 | 26.10.07 | 27.11.07 |          | 73,3  | + | + 17:00<br>02.12.13 | Вик. за ЦП   |
| 21 | 3 | 25.09.08 | 05.11.08 |          | 62,3  | + | + 17:45<br>02.12.13 | Вик. за ЦП   |
| 22 | 3 | 02.03.10 | 28.03.10 |          | 45,1  | + | + 18:15<br>02.12.13 | Вик. за ЦП   |
| 23 | 3 | 02.03.10 | 28.03.10 |          | 45,1  | + | + 18:31<br>02.12.13 | Вик. за ЦП   |
| 24 | 3 | 02.03.10 | 28.03.10 |          | 45,1  | + | + 18:31<br>02.12.13 | Вик. за ЦП   |
| 21 | 3 | 26.02.11 |          |          | 33,2  |   |                     | На випробув. |
| 14 | 2 | 25.12.07 | 25.01.08 | 12.10.11 | 71,3  |   |                     | Орб. резерв  |
| 17 | 3 | 25.12.05 | 31.08.06 | 19.12.11 | 95,3  |   |                     | Орб. резерв  |
| 8  | 1 | 26.12.04 | 07.10.05 | 22.11.12 | 107,3 |   |                     | Орб. резерв  |

Бортовий навігаційний передавач складається з апаратури формування навігаційних сигналів і антенно-фідерного пристрою. Для підвищення надійності передбачено дублювання силових блоків передавача і формувачів навігаційного сигналу. Для контролю за випромінюванням використовуються амплітудні датчики ВЧ-випромінювання антени, сигнал з яких поступає на бортову телеметричну систему. Перемикання на резервні блоки може відбуватися автоматично або за командою центру управління.

Антенно-фідерна система навігаційного передавача конструктивно є фазовою антенною решіткою, яка складається з двох груп спіральних випромінювачів: чотирьох центральних і одного периферійного кільцевого з восьми випромінювачів на кільці діаметром 85 см. Випромінювачі розділені на 4 сегменти, що складаються з одного центрального і двох найближчих периферійних випромінювачів. Така конструкція антени забезпечує одночасну роботу на робочих частотах, достатнє придушення позасмугових випромінювань і необхідну діаграму спрямованості антени.

Система орієнтації і стабілізації супутників побудована за активною тривісною схемою з управляючими маховиками і реактивною системою розвантаження [12]. Система орієнтації забезпечує реалізацію програми початкової орієнтації космічного апарата після виведення на орбіту, заспокоєння супутника, орієнтацію поздовжньої осі супутника на центр Землі, а сонячних ба-



тарей на Сонце, управління вектором тяги двигунів системи корекції.

### 3.3. Наземний сегмент контролю та управління

Наземний сегмент контролю та управління (наземний командно-вимірювальний комплекс) складається з головної станції (центру управління системою – ЦУС), суміщеної з обчислювальним центром; групи контрольно-вимірювальних станцій (КВС), пов'язаних з головною станцією і між собою каналами зв'язку; наземного (системного) еталона часу і частоти (центрального хронізатора) (рис. 3.9).

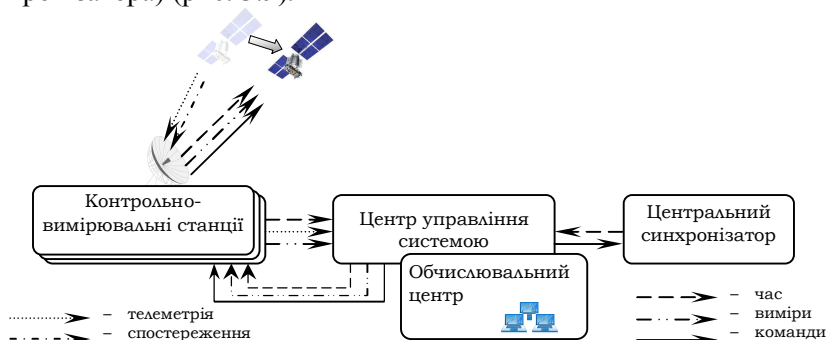


Рис. 3.9. Узагальнена структура наземного сегмента

Сегмент контролю та управління виконує такі основні функції:

- моніторинг радіонавігаційного поля;
- моніторинг радіотелеметрії<sup>3</sup> НКА;
- командне і програмне управління НКА;
- ефемеридне і частотно-часове забезпечення НКА.

**Мережа контрольно-вимірювальних станцій** призначена для проведення траєкторних вимірювань (телеметрії) НКА, приймання навігаційних повідомлень від НКА, їх первинної обробки, передачі змісту повідомлень до командно-вимірювального комплексу та ретрансляції команд керування та службових повідомлень на НКА. Дані з супутників відбираються і завантажуються на них, коли вони пролітають над контрольно-вимірювальними станціями.

<sup>3</sup> **Радіотелеметрія** – вимірювання фізичних величин на відстані з передачею результатів вимірювання по каналах радіозв'язку. Сукупність пристроїв, розташованих на об'єкті спостереження і в пункті прийому телеметричної інформації, утворює радіотелеметричну систему [15].

Контрольно-вимірювальні станції прагнуть розміщувати якомога рівномірніше по поверхні Землі, що забезпечує можливість постійного зв'язку з НКА космічного угруповання. Координати контрольно-вимірювальної станції (фазового центра антени) визначені у трьох вимірах з максимально можливою точністю.

У **ЦУС** відбувається збір інформації від усіх контрольно-вимірювальних станцій, її математична обробка й обчислення різних ефемеридних і часових даних. Дані, що підлягають завантаженню, поділяються на оперативні (оновлюються при кожному сеансі зв'язку) і довготривалі. Вимірювання і прогноз параметрів руху НКА проводяться в Балістичному центрі системи за результатами траєкторних вимірювань дальності до супутника і його радіальної швидкості. Після обробки отриманих даних формується команда управління, що містить навігаційне повідомлення і корегуючі команди (ефемеридні і частотно-часові поправки бортової шкали часу супутника щодо системного часу). Сформоване повідомлення через мережу контрольно-вимірювальних станцій передається на супутник і завантажується у бортову ЕОМ. Завантажене навігаційне повідомлення передається споживачам системи у вигляді кадрів відповідного формату. У разі виникнення нештатної ситуації можливо проведення позапланових сеансів зв'язку і завантаження даних за умови знаходження НКА в зоні видимості однієї з контрольно-вимірювальних станцій. Практично всі основні задачі управління НКА і контролю навігаційного поля розв'язуються в автоматичному режимі.

**Центральний хронізатор** призначений для формування системної шкали часу СРНС, яка використовується для синхронізації всіх процесів у системі (синхронізації шкал часу різних супутників з необхідною точністю, шкал часу споживачів тощо), що необхідно для правильного функціонування навігаційної системи. На борту НКА використовуються цезієві (рубідієві) стандарти частоти з відносною нестабільністю порядку  $10^{-13}$ . Наземний еталон часу і частоти має більш високу точність, ніж бортові еталони. У центральному хронізаторі використовується водневий стандарт з відносною нестабільністю  $10^{-14}$ . Крім того, до складу центру керування системою входять засоби корекції шкал часу супутників щодо еталонної шкали з похибкою 3–5 нс.

### 3.3.1. Наземний сегмент контролю та управління GPS

Наземний сегмент системи GPS складається з головної станції управління, що знаходиться на військово-повітряній базі Шрівер біля р. Колорадо Спрінгс (штат Колорадо, США), і п'яти контрольних-вимірювальних станцій, що розташовані на військових базах США – на островах Кваджалейн і Гавайях у Тихому океані, на острові Вознесіння в Атлантичному океані, на острові Дієго-Гарсія в Індійському океані (рис. 3.10). Крім цього, програмою модернізації введена в дію дублююча станція оперативного контролю (AMCS – Alternate Master Control Station) на авіабазі Ванденберг (Vandenberg). У майбутньому планується створення ще однієї станції спостереження на мисі Канаверал (штат Флорида). Розташування станцій підбрано так, щоб розмістити їх найбільш рівномірно навколо земної кулі по екватору і створити найсприятливіші умови для прийому навігаційних сигналів.



Рис. 3.10. Розташування станцій сегмента контролю та управління GPS

Наземні антени для зв'язку з супутниками через радіозв'язок S-діапазону розміщуються поряд зі станціями стеження на о. Вознесіння, м. Канаверал, о. Дієго-Гарсія і на атолі Кваджалейн. Ці 10-метрові параболічні антени дистанційно управляються з Голо-

вної станції управління, для одержання телеметричних даних з супутників про стан їх підсистем, для передачі команд і завантаження даних для навігаційних повідомлень. Автоматична станція стеження контрольної мережі ВПС у Шрівере також може працювати як наземна GPS антена для видачі команд і проведення контролю.

Сумісна обробка отриманих даних від просторово розподілених станцій моніторингу дозволяє обчислити відхилення траєкторій супутників від заданих орбіт, часові зсуви бортового годинника і помилки в навігаційних повідомленнях. Моніторинг стану GPS-супутників відбувається практично безперервно. Завантаження навігаційних даних, які складаються з прогнозованих орбіт і поправок бортового стандарту частоти і часу для кожного з супутників, здійснюється кожні 24 години, під час знаходження НКА в зоні доступу контрольної-вимірювальної станції.

На додаток до наземних контрольних-вимірювальних GPS-станцій існує декілька приватних і державних мереж стеження, які здійснюють вимірювання навігаційних GPS-сигналів для уточнення параметрів атмосфери і траєкторій руху супутників. Діюча нині кількість наземних станцій стеження призводить до часових розривів у стеженні за станом НКА, тому для забезпечення безперервного і навіть надмірного стеження задіяно 6 станцій Національного агентства картографії (NIMA – National Imagery and Mapping Agency). Програмою модернізації передбачено об'єднання даних з 6 до 14 додаткових станцій моніторингу NIMA в нову, повністю корельовану Центральну станцію управління (MSC), що використовує єдиний фільтр Калмана. У результаті очікується досягнення точності позиціонування в горизонтальній площині не менше 6 метрів (з вірогідністю 95 %) для всіх споживачів GPS, які працюють в автономному режимі.

Зрозуміло, що така складна система вимагає проведення профілактичних і ремонтних робіт. За той час, поки НКА знаходиться в зоні видимості, один з операторів Центру управління передає на нього оновлену навігаційну інформацію, а другий виконує тести з перевірки стану бортових систем. У разі виявлення збоїв ухвалюється рішення про працездатність цього НКА. НКА передає інформацію споживачам, що має назву «health status» (стан здоров'я). На підставі цієї інформації НАС приймає рішення, чи слід

брати до уваги дані з конкретного НКА. Звичайно НКА оголошується «непрацездатним» за командою Центру управління на час проведення профілактичних робіт. Так, наприклад, періодично вимагається проводити накачування іонів у резервний бортовий атомний хронізатор або корегувати орбіту за допомогою бортових двигунів. В екстремальних ситуаціях НКА здатний самостійно оголосити себе «непрацездатним». Деякі сучасні приймачі допускають можливість на вимогу споживача ігнорувати інформацію про непридатність НКА і використовувати одержувані від нього навігаційні дані. Переважно, необхідність у цьому виникає в несприятливих ситуаціях, коли утруднений або неможливий прийом сигналів від достатньої кількості НКА.

### **3.3.2. Наземний сегмент контролю та управління ГЛОНАСС**

Сегмент управління системи ГЛОНАСС складається з таких функціональних компонентів:

- центру управління системою;
- центрального хронізатора;
- контрольних станцій;
- системи контролю фаз;
- квантооптичних станцій;
- апаратури контролю поля.

Всі компоненти функціонально пов'язані між собою. Нині на території Росії, крім Центру управління, діє сім станцій стеження (рис. 3.11). Мережа контрольно-вимірювальних станцій ГЛОНАСС вигідно відрізняється від аналогічної мережі GPS тим, що розташована тільки на території своєї країни. Цьому сприяє велика протяжність російської території зі сходу на захід. Частина контрольно-вимірювальних станцій та інших елементів наземного сегмента ГЛОНАСС залишилася зовні території Росії (у країнах СНД) і може бути використана лише за наявності відповідних домовленостей. Мережа забезпечує завантаження до НКА службового повідомлення з періодом 1 раз на добу в нормальному режимі, при цьому у разі необхідності є можливість завантаження службових повідомлень до 2 разів на добу.

Завдяки надмірності у мережі контрольно-вимірювальних станцій у разі виходу з ладу однієї зі станцій є можливість її рівноцінної заміни на іншу і, в якнайгіршій ситуації, роботу системи

може забезпечувати головна станція й інша КВС станція, проте завантаженість її роботою буде дуже високою. Контрольно-вимірювальні станції мають потрійне резервування по апаратурі (один комплект робочий, інший – у резерві, третій – на профілактичних роботах). Коефіцієнт готовності засобів у сеансі вимірювань і завантаження інформації на борт супутника близький до одиниці.



Рис. 3.11. Розташування станцій сегмента контролю та управління ГЛОНАСС

Вимірювання траєкторних параметрів здійснюється запитовим способом. За запитом із станції стеження супутник формує відповідь. За затримкою відповіді і доплерівським зсувом частоти визначаються дальність до супутника (з похибкою не більше 2–3 м) і його радіальна швидкість. Одночасно з вимірюванням траєкторних параметрів відбувається збір телеметричної інформації і вивантаження службових даних.

**Квантооптичні станції** призначені для періодичного високоточного вимірювання дальності до НКА за допомогою лазерного далекоміра.

**Система контролю фаз** забезпечує контроль (звіряння) сигналу, випромінюваного супутником з метою вимірювання фазового і частотного зсуву бортових еталонів часу і частоти щодо еталона центрального хронізатора. Ця інформація необхідна для синхронізації фаз навігаційних сигналів, випромінюваних всіма супутниками ГЛОНАСС. У процесі звіряння (для визначення зсуву бортової шкали часу) прийняті далекомірні сигнали супут-

ника порівнюються з опорними сигналами, отриманими від високостабільного еталона частоти, та в подальшому здійснюються їх корегування.

*Апаратура контролю поля (АКП)* є високоточною апаратурою споживачів, що розташовується на референцних станціях і має високоточне геодезичне прив'язування, при цьому забезпечується безперервний контроль характеристик навігаційного поля.

Режим контролю навігаційного поля передбачає розв'язання навігаційної задачі по кожному оптимальному сузір'ю супутників над відповідною АКП. Ця процедура включає також порівняння еталонних координат з поточними результатами місцевизначення по цьому сузір'ю і виконується безперервно за автономним планом. Результати навігаційних визначень (а при одержаних негативних контрольних даних і вимірювальна інформація, що використовується в цьому сеансі) передаються до ЦУС для оцінки поточних характеристик навігаційного забезпечення, аналізу причин аномальних характеристик і ухвалення рішення щодо подальшого варіанта функціонування системи.

У СРНС ГЛОНАСС, на відміну від GPS, здійснюється роздільне розв'язання задач ефемеридного і частотно-часового забезпечення.

### **3.4. Сегмент споживачів**

До складу сегмента споживачів прийнято включати приймачі навігаційного сигналу (навігаційну апаратуру споживачів) і периферійне (додаткове) обладнання: антени, пристрої відображення інформації, блоки автоматики, інтерфейс з виконавчими пристроями і допоміжне програмне забезпечення тощо. НАС може бути стаціонарною або рухомою, наземною (сухопутною або морською), повітряною або космічною.

Призначення НАС – визначення просторових координат і параметрів руху об'єкта навігації за результатами вимірів радіонавігаційних параметрів. Після прийому й обробки навігаційних сигналів апаратура споживача виміряє та обчислює навігаційні параметри: псевдодальність і псевдошвидкість; обчислює геоцентричні координати, переводить їх у геодезичні координати, вектор швидкості і висоту над опорним еліпсоїдом; знаходить поправку до місцевої шкали часу щодо системного часу. Сукупність

цих процесів називається **навігаційно-часовим визначенням**. Для обчислення просторових координат і часу йому звичайно достатньо спостережень за чотирма НКА.

Коли приймач вимикається, він зберігає координати своєї останньої позиції в постійній електронній пам'яті. Ці координати стають попереднім положенням при наступному включенні. В постійній пам'яті зберігається також останній альманах, що визначає орбіти, параметри годинника і стан всіх функціонуючих НКА. Ці дані використовуються при новому навігаційному розв'язку, щоб визначити, які супутники знаходяться над горизонтом і які з них підходять для найточнішого визначення положення. Кварцовий годинник приймача продовжує йти, навіть коли він вимкнений, що забезпечує йому необхідну оцінку часу при повторній активізації для отримання нового розв'язку.

Через те, що приймачі і супутне обладнання постійно розвиваються і удосконалюються, представляється недоцільним детально описувати який-небудь окремий приймач. Більше того, аналіз структурних схем апаратури різних фірм виробників показує майже повну їх ідентичність. Відмінність полягає в конструктивному виконанні та застосуванні елементної бази того або іншого ступеня інтеграції. Тому далі будуть представлені спрощені концепції загального пристрою супутникового приймача.

Незважаючи на розміри, ціну, призначення або складність сучасного приймача, він може бути поділений на декілька головних підсистем (рис. 3.12):

- антена;
- радіочастотний тракт, до складу якого входять надвисоко-частотний малошумливий підсилювач (МШП), перетворювач частоти радіосигналів, аналогово-цифровий процесор (АЦП) первинної обробки сигналів з контурами пошуку, стеження, навігаційних вимірювань і виділення навігаційних повідомлень;
- навігаційний мікропроцесор;
- опорний генератор і синтезатор частот;
- блок живлення;
- блок команд і контрольного дисплея.

Багато приймачів також включають пристрої для збереження даних і пристрої введення-виведення даних, блок управління ан-



теною (забезпечує формування діаграми спрямованості антени для просторової селекції корисного сигналу від завад).



Рис. 3.12. Узагальнена структурна схема навігаційних приймачів

Антенa приймача призначена для перетворення енергії електромагнітних коливань в електричний сигнал, який через смуговий фільтр потрапляє до МШП з високою чутливістю. Після підсилення відбувається перетворення частоти радіосигналу (її пониження), сигнал потрапляє до АЦП, який разом з каналами обробки несучої частоти і коду розв'язує задачі пошуку сигналів НКА (за допомогою кореляторів), визначення затримок сигналів (псевдовипадкових послідовностей), стеження за фазою несучих частот сигналів, що приймаються, демодуляції навігаційного повідомлення. Кількість каналів стеження визначається кількістю каналів навігаційного приймача. Конструктивно, перетворювачі частоти, фільтри, АЦП і канали стеження виконуються у вигляді інтегральної мікросхеми. Навігаційний процесор виконує функції вибору сузір'я НКА, декодування навігаційного повідомлення, розв'язування навігаційно-часової задачі тощо.

До комплексу апаратури можуть входити додаткові пристрої: накопичувачі даних (контролери), радіомодеми, метеорологічні системи, штативи, штанги, рулетки, кабелі тощо.

Нині галузями використання СРНС є:

- військові задачі (точне позиціонування);
- авіація (прокладання курсу, позиціонування, автоматична посадка);

- морський транспорт (прокладання курсу, позиціонування);
- наземний транспорт (прокладання маршруту, контроль руху);
- геодезія і картографія (кадастрові зйомки, картографування тощо);
- геофізика;
- будівництво (мости, тунелі, моніторинг споруд);
- сільське господарство (розмітка і обробка сільгоспугідь);
- видобуток корисних копалин;
- рятувальні роботи;
- системи безпеки (пошук викрадених автомобілів і вантажів тощо);
- служби точного часу;
- приватне використання в побуті (туризм, охота, хобі) тощо.

Відповідно до сфери застосування конструкції і можливості НАС можуть значно відрізнятись. Так, наприклад, приймачі для приватного застосування, здебільшого, не вимірюють висоту і не обчислюють складові вектора швидкості в режимі реального часу, тоді як системи автоматизованої посадки виконують ці вимірювання обов'язково. З іншого боку, існують приймальні пристрої, єдиним завданням яких є отримання сигналів точного часу і зразкової частоти. Найбільш часто подібні пристрої використовуються в системах мобільних комунікацій, а також для проведення технічних вимірювань і наукових експериментів.

Споживачами інформації СРНС є: військові та цивільні. У складі GPS працює Служба точного позиціонування PPS (Precise Positioning Service) і Служба стандартного позиціонування SPS (Standard Positioning Service). PPS ґрунтується на використанні Р-коду та двох несучих частот, SPS – на використанні С/А-коду й однієї несучої частоти.

Нині для цивільних споживачів дозволена точність абсолютного визначення місцеположення становить приблизно 10–100 м (залежно від класу приймача), а для військових – приблизно 30 см, за рахунок використання Р-коду.

За галузями застосування СРНС цивільні споживачі поділяються на дві основні групи: навігаційне використання та геодезичне використання.

Просторові координати в НАС звичайно визначаються у два етапи: спочатку визначаються поточні координати супутників і первинні навігаційні параметри (дальність, її похідні тощо) відносно відповідних супутників, а потім розраховуються вторинні – геодезичні координати місця розташування споживача.

Стандартний комплект апаратури споживачів для геодезичного застосування складається з двох (або більше) приймачів супутникових сигналів з комплектом додаткового обладнання та програмного забезпечення для обробки супутникових вимірів.

Навігаційні приймачі залежно від типу виконуваних вимірів і доступності коду поділяються на три групи:

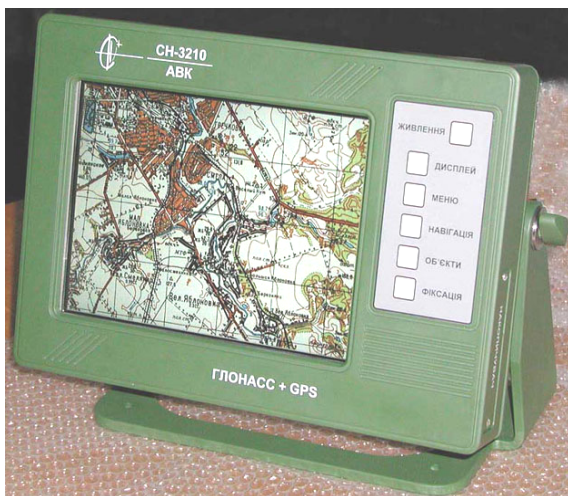
- кодові – вимірюють псевдодальності на основі C/A-коду;
- фазові – вимірюють фазу сигналу з використанням C/A-коду;
- P-кодові – вимірюють фазу сигналу з використанням P-коду.

Використання P-коду досягається за рахунок установки спеціальної плати на вході приймача.

Залежно від кількості використовуваних частот приймачі бувають одночастотні і двочастотні.

За способами спостереження за супутниками приймачі класифікуються на одно- і багатоканальні. Захоплення і відстеження супутників у багатоканальних приймачах виконується незалежними приймальними каналами. Сьогодні найбільш поширені 9-, 12-канальні приймачі, в яких приймальний канал може працювати з будь-яким супутником (так званий метод All in View). Є також 24-канальні приймачі, в яких кожному супутнику відповідає певний канал.

У світі є більше 50 фірм-виробників супутникових приймачів. Найбільш відомі серед них – Trimble (США), Ashtech (США), Leica (Швейцарія), Zeiss (Німеччина), Geotronics (Швеція). Слід зазначити, що виробництво навігаційних приймачів також налагоджене в Україні (рис. 3.13).



*Рис. 3.13. Навігаційний приймач SN-3210 вітчизняного виробництва*

Нині багато уваги приділяється питанням спільного використання декількох СРНС. Основною перевагою спільного використання є значне збільшення кількості навігаційних космічних апаратів, що дозволить виконувати вимірювання в зонах обмеженої видимості супутників, підвищити точність вимірювань, їх надійність і достовірність, а також скоротити тривалість сеансів вимірювань.

### ***Питання для самоконтролю***

- 1. Яку структуру мають СРНС другого покоління?*
- 2. Як відображається вимога глобальності на структурі СРНС?*
- 3. Які основні функції космічного сегмента?*
- 4. Назвіть недоліки і переваги космічних сегментів СРНС GPS і ГЛОНАСС.*
- 5. Яка кількість НКА знаходиться на орбітах у теперішній час?*
- 6. Назвіть призначення основних елементів наземного комплексу контролю й управління.*
- 7. Яким чином здійснюється моніторинг контролю робочого стану НКА?*
- 8. Перелічіть основні функціональні елементи навігаційного приймача.*
- 9. Назвіть основні галузі застосування СРНС.*

## Розділ 4. СИСТЕМИ КООРДИНАТ У СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Розв'язування задачі позиціонування об'єкта передбачає визначення просторового положення об'єкта навігації відносно земної поверхні. З погляду наземної навігації задача не передбачає суттєвих ускладнень, проте в СРНС радіомаяки, відносно яких здійснюється позиціонування, обертаються навколо земної поверхні. Беручи до уваги також і добове обертання Землі, розв'язання задачі позиціонування вже не виглядає елементарним. Для цього в супутникових технологіях використовуються різні системи координат. Для обчислення орбіт супутників і прогнозування їх руху, застосовують, як правило, нерухомі системи координат. Для визначення координат пунктів у процесі спостережень використовуються системи, що обертаються разом із Землею. А для використання отриманих координат при розв'язанні різних прикладних задач, можуть бути потрібні найрізноманітніші координатні системи. Крім того, потрібна адекватна теорія часу, оскільки позиціонування об'єкта навігації виконується на основі опорних об'єктів, які рухаються з великими швидкостями.

### 4.1. Системи координат, які використовують у супутникових радіонавігаційних системах

Рух НКА відбувається під дією сил інерції і тяжіння Землі й описується законами небесної механіки, при цьому обчислення та прогнозування траєкторії руху супутників здійснюється у фіксованій у просторі системі координат, яку називають *інерційною*. Центр інерційної системи координат збігається з центром мас<sup>4</sup> Землі, а осі не змінюють свого спрямування у просторі. Інерційні системи координат також називають *небесними*.

Опис координатного положення об'єктів геопростору Землі використовується за допомогою так званих *рухомих (земних) координатних систем*, які обертаються разом із Землею, інакше положення об'єктів геопростору було б функцією від часу. Осі земних координатних систем чітко фіксовані відносно земної повер-

---

<sup>4</sup> *Центр мас* – центр інерції – геометрична точка, положення якої характеризує розподіл мас у тілі або механічній системі.

хні. Якщо центр координатної системи збігається з центром мас Землі, то така система має назву *геоцентричної*. Земні геоцентричні системи називають також *загальноземними*, або *глобальними*, *світовими референциними (опорними)*, або *умовними земними* системами, тобто системами, прийнятими за умовою [8].

Разом з геоцентричними системами використовуються також *квазігеоцентричні*, або *локальні референціні* системи. Їх початок знаходиться в центрі деякого референц-еліпсоїда, що найкращим чином відповідає території країни або материка.

Перш ніж перейти до опису систем координат, розглянемо загальний принцип їх побудови: обирається основна площина системи і в ній – напрямок основної осі і розташування початку відліку системи. Оскільки положення основної площини й основної осі системи з часом можуть змінюватися, то приймають їх положення відповідно до деякого фіксованого моменту часу, або воно обирається середнім за деякий часовий інтервал.

Як основну площину системи координат часто обирають площину екватора, площину екліптики, площину орбіти супутника, площину, яка торкається поверхні Землі в точці старту тощо.

**Площина земного екватора** – це площина, що проходить через центр мас Землі нормально до осі її добового обертання. Вісь добового обертання Землі називається *віссю світу*, її напрямок приблизно збігається з напрямком від спостерігача до Полярної зірки.

**Площина екліптики** – це площина річного руху центра сонячного диска відносно зоряного неба, що бачить земний спостерігач (або площина руху центра мас Землі відносно центра Сонця). Площина екліптики нахилена до площини земного екватора приблизно на  $23^{\circ}27'$ . Точка зоряного неба, в якій центр сонячного диска у своєму русі по екліптиці перетинає екватор у напрямку від південної півкулі до північної, називається точкою весняного рівнодення або точкою весни. Ця точка, що проходиться Сонцем 20–22 березня, позначається знаком  $\Upsilon$  зодіакального сузір'я Овна. В наш час точка весни зсунулась до сузір'я Риб, але її традиційне позначення збереглося. Непостійність положення точки весни пояснюється зміною напрямку осі добового обертання Землі, а значить, зміною положення площини екватора, що обумовлено складною взаємодією мас Землі, Місяця, Сонця і планет. Внаслідок цієї взаємодії точка весни зсувається у площині екліптики приблизно

на  $50''$  за рік. Тому, говорячи про точку весни, зазвичай уточнюють і момент часу (епоху), якому відповідає її положення.

## 4.2. Геоцентричні системи координат

Геоцентрична інерційна система координат  $OX_0Y_0Z_0$  (рис. 4.1), що використовується для опису траєкторного руху НКА, за визначенням повинна бути стаціонарною у просторі або рухатись у просторі з постійною швидкістю.

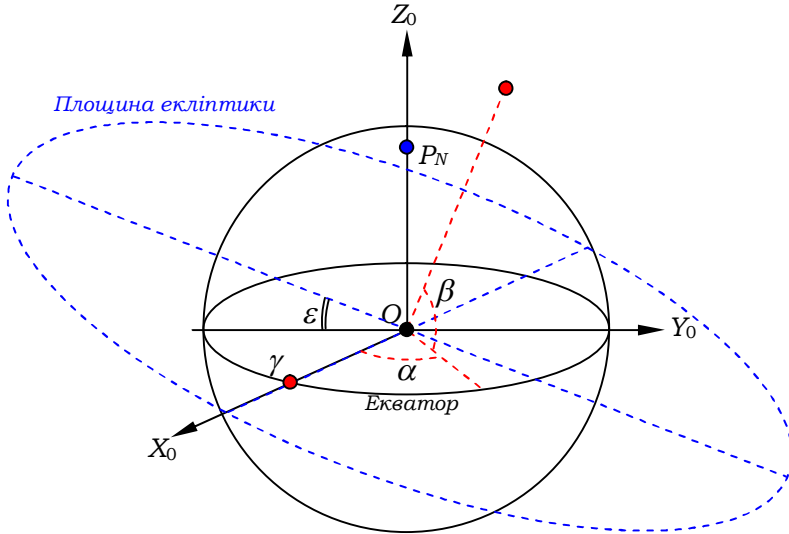


Рис. 4.1. Геоцентрична інерційна система координат

Така система задається таким чином:

- початок системи координат  $O$  збігається з центром мас Землі;
- вісь  $OZ_0$  спрямована вздовж осі обертання Землі у напрямку Північного полюса  $P_N$  до **істинного північного полюса світу**<sup>5</sup>  $P$ ;
- вісь  $OX_0$  спрямована в екваторіальній площині до істинної точки весняного рівнодення  $\gamma$  – точки перетину площини істинного екватора Землі з орбітою Землі, нахиленої до екватора на кут  $\epsilon$  ;

<sup>5</sup> **Полюс світу** – точка на небесній сфері, навкруги якої відбувається видимий добовий рух зірок через обертання Землі навколо своєї осі. В північній півкулі поблизу Північного полюса світу знаходиться Полярна зірка (Малої Ведмедиці) [16]. Положення полюса світу в системі координат повільно змінюється через процеси прецесії і нутації, проте в СРНС, через малі відхилення, вісь полюса світу вважають такою, що збігається з віссю обертання Землі [8].

- вісь  $OY_0$  доповнює систему координат до правої.

Фактично, ця координатна система не є нерухомою у просторі, її центр, що збігається з центром мас Землі, рухається навкруги Сонця по траєкторії, що задана орбітою Землі і швидкістю, що змінюється відповідно до законів Кеплера. Проте для супутників, які рухаються в полі тяжіння Землі, а також у коротких інтервалах часу, цю систему координат можна вважати інерційною.

Положення об'єкта в небесній системі можна задати або сферичними координатами – *прямим сходженням*<sup>6</sup>  $\alpha$  і *схиленням*<sup>7</sup>  $\beta$  (рис. 4.1), або прямокутними координатами  $x_0, y_0, z_0$ . Прямокутні координати є компонентами вектора положення  $r = (x_0, y_0, z_0)^T$ .

**Геоцентрична рухома система координат OXYZ**, за допомогою якої позиціонують об'єкти геопростору Землі, повинна

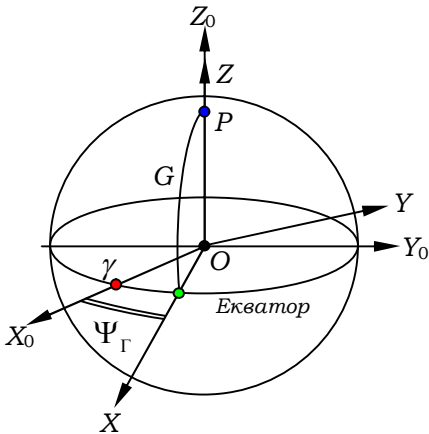


Рис. 4.2. Геоцентричні системи координат: початок системи координат  $O$  збігається з центром мас Землі; вісь  $OZ$  спрямована вздовж осі обертання Землі у напрямку Північного полюса збігається з віссю  $OZ_0$  інерційної системи координат  $OX_0Y_0Z_0$ ;

- вісь  $OX$  спрямована в екваторіальній площині до Гринвіцького меридіана  $G$ ;
- вісь  $OY$  доповнює систему до правої.

Гринвіцький меридіан лежить у площині, утвореній віссю  $OX$  і  $OZ$ . Геоцентрична рухома система координат обертається разом

бути стаціонарною відносно земної поверхні, інакше координати майже всіх об'єктів геопростору Землі матимуть додатковий аргумент часу.

Рухома система координат задається таким чином (рис. 4.2):

- початок системи координат  $O$  збігається з центром мас Землі;
- вісь  $OZ$  спрямована вздовж осі обертання Землі у напрямку Північного полюса

<sup>6</sup> *Пряме сходження*  $\alpha$  – кут в екваторіальній площині, виміряний проти годинникової стрілки від точки весняного рівнодення до кола схилення (іноді званого годинним колом) [8].

<sup>7</sup> *Схилення об'єкта*  $\beta$  – кут, що вимірюється від площини екватора до світила; він додатний для об'єктів у північній півсфері і від'ємний для південної півсфери [8].



із Землею, тобто вісь  $OX$  періодично проходить через точку  $\gamma$  з інтервалом, що дорівнює одній зоряній добі<sup>8</sup>. Сонячна доба має більшу тривалість через рух Землі по орбіті навколо Сонця.

Зв'язок між інерційною і рухомою координатними системами задається за допомогою кутової міри. Кут  $\Psi_{\Gamma}$  між осями  $OX$  і  $OX_0$  відповідає гринвіцькому зоряному часу  $S_{\Gamma}$  і розраховується з урахуванням зоряної дати і часу на Гринвіцькому меридіані:

$$\Psi_{\Gamma} = S_{\Gamma} = S_0 + \omega_3 t(1 + u_3),$$

де  $\omega_3 = 15^\circ/\text{г} = 7,292115 \cdot 10^5 \text{ рад/г}$  – кутова швидкість (частота) обертання Землі;  $S_0$  – гринвіцький зоряний час (кут між осями  $OX$  і  $OX_0$  на момент нуля годинника всесвітнього часу) у заданий день;  $t$  – світовий час заданої дати, на який розраховується кут  $\Psi_{\Gamma}$ ;  $u_3 = 0,002737909$  – коефіцієнт зв'язку зоряних і сонячних діб.

Обчислення інформації про рух НКА в геоцентричній рухомій системі координат здійснюється в наземному центрі керування, яка завантажується до НКА і передається споживачу в навігаційному повідомленні. Після вторинної обробки навігаційної інформації в цій же системі координат визначається положення самого споживача. Але переважну більшість споживачів у повсякденному застосуванні цікавлять геодезичні координати – широта, довгота і висота.

**Геодезична система координат** описує положення точок геопростору відносно поверхні Землі. Фізична модель Землі є еліпсоїдом<sup>9</sup>, фіксованим щодо Землі (рис. 4.3). Осі геодезичної системи координат збігаються з осями геоцентричної рухомої системи координат.

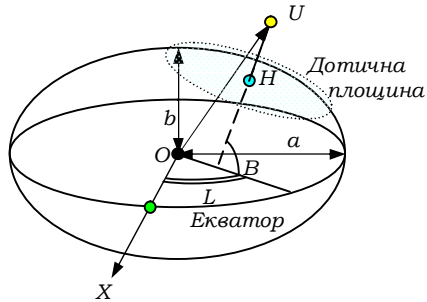


Рис. 4.3. Геодезична система координат

<sup>8</sup> **Зоряна доба** – період обертання будь-якого небесного тіла стосовно далеких зірок навколо власної осі (на 2000-й рік дорівнювали 23 год 56 хв 4,090530833 с).

<sup>9</sup> **Еліпсоїд** – геометричне тіло, утворене обертанням еліпса навкруги його малої осі.

Для побудови еліпсоїда використовуються два головні параметри: екваторіальний радіус  $a$  і параметр стиснення  $\alpha$ . Стиснення представляє співвідношення між екваторіальним і полярним радіусом (або малою піввіссю)  $b$ :

$$\alpha = \frac{a - b}{a}.$$

Інші параметри, які визначають розміри і форму еліпсоїда, наприклад полярний радіус  $b$  і ексцентриситет  $e$ , можна обчислити за цими двома параметрами:

$$b = a(1 - \alpha); \quad e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}.$$

Геодезичні координати – широта, довгота і висота шуканої точки  $U$  (рис. 4.3) визначаються таким чином:

- геодезична довгота  $L$  точки  $U$  – кут між площиною початкового (Гринвіцького) меридіана і площиною меридіана, що проходить через точку  $U$  (додатний напрям відліку довгот – від початкового меридіана на схід);
- геодезична широта  $B$  точки  $U$  – кут між нормаллю від шуканої точки до поверхні еліпсоїда і площиною екватора;
- геодезична висота  $H$  – відстань по нормалі від точки  $U$  до поверхні еліпсоїда.

Координати об'єкта  $(x, y, z)$ , які обчисленні у геоцентричній рухомій системі координат, перетворюють у геодезичні координати  $(B, L, H)$  відповідно до співвідношень:

$$\begin{aligned} x &= (N + H) \cos B \cos L; \\ y &= (N + H) \cos B \sin L; \\ z &= \left[ (1 - e^2)N + H \right] \sin B, \end{aligned}$$

де  $N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}$  – радіус кривизни еліпсоїда першого вертикала<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> *Перший вертикал* – велике коло небесної сфери, що проходить через зеніт і точки сходу і заходу. Площина першого вертикала перпендикулярна площинам горизонту і небесного меридіана. Всі небесні світила, які внаслідок видимого добового руху проходять перший вертикал, перетинають його (для цієї географічної широти) з однаковою швидкістю по висоті і по азимуту.

Зворотні перетворення здійснюються таким чином: обчислення довготи не викликає проблем:

$$L = \operatorname{arctg} \frac{y}{x}.$$

Обчислити широту можливо декількома способами, які поділяються на ітераційні і замкнуті. У [8] приводиться такий метод обчислення широти, заснований на ітераційних алгоритмах:

$$B^{(i)} = \operatorname{arctg} \frac{Z + N^{(i-1)} e^2 \sin B^{(i-1)}}{D},$$

де  $i$  – номер ітерації, яка повторюється до моменту, поки  $|B^i - B^{(i-1)}| \geq \varepsilon$  ( $\varepsilon$  – точність обчислення);  $D = \sqrt{x^2 + y^2}$  – проекція радіус-вектора на площину екватора;  $N^{(i-1)}$  – знаходиться по широті з попереднього наближення.

Еліпсоїдна висота  $H$  визначається як:

$$H = \frac{z}{\sin B} - N(1 - e^2).$$

**Реалізація загальноземних систем координат (ЗЗСК) для СРНС** – це складна наукова задача. Реалізацією ЗЗСК для системи GPS є **Світова геодезична система WGS-84**, розроблена геодезистами Міністерства оборони США. У російській системі ГЛОНАСС використовується система координат **ПЗ-90**. Найточніша реалізація ЗЗСК – це **Міжнародна земна система відліку ITRF**, яка визначається міжнародним науковим співтовариством.

Для забезпечення ефективного сумісного використання СРНС ГЛОНАСС і GPS у різних сферах діяльності необхідний надійний зв'язок між системами координат ПЗ-90 і WGS-84.

Геоцентрична система координат «Параметри Землі 1990 р.» (ПЗ-90) одержана в Росії за спостереженнями спеціального геодезичного космічного апарата ГЕО-ИК, а також з використанням вимірювальної інформації з космічних апаратів ГЛОНАСС і ЕТАЛОН.

При виведенні системи координат ПЗ-90 використовувалися фундаментальні сталі, основні з яких:

- швидкість світла  $c = 299792458$  м/с;
- геоцентрична гравітаційна стала (з урахуванням атмосфери)  $\mu = 39860044 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/с<sup>2</sup>;

- кутова швидкість оберту Землі  $\omega_3 = 7292115 \cdot 10^{-11}$  рад/сек.
- Фундаментальні геодезичні сталі:
- велика піввісь еліпсоїда  $d_0 = 6378136$  м;
  - знаменник стискання  $f = 298,257839303$ ;
  - нормальний потенціал  $U_0 = 62636861,074$  м<sup>2</sup>/с;
  - другий гармонічний коефіцієнт  $c_{20} = -484164,953 \cdot 10^{-9}$ .

Різниця систем координат ПЗ-90 і WGS-84, за оцінками авторів, може коливатися від 2 до 15 м. Надійність цих оцінок лежить у межах середньоквадратичних похибок перетворення координат від 2 до 5 м залежно від географічного регіону. В цей час можуть бути використані параметри зв'язку ПЗ-90 і WGS-84, надані у формі матриці перетворення

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{WGS-84} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & -1 \cdot 10^{-6} \\ 1 \cdot 10^{-6} & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ПЗ-90}$$

Надійність цих даних проконтрольована на території Росії та України.

### 4.3. Орбітальний рух супутника

#### 4.3.1. Елементи орбіти супутника

Відповідно до першого закону Кеплера будь-яка траєкторія супутника, що рухається в центральному полі тяжіння, лежить у нерухомій щодо інерційної системи координат площині, яка проходить через центр тяжіння, і є кривою другого порядку, в одному з фокусів якої знаходиться центр тяжіння.

Площина, що утворюється орбітою супутника, називається **орбітальною площиною** (рис. 4.4) [2]. Орієнтація орбітальної площини характеризується її положенням щодо екваторіальної площини. Лінія перетину цих площин називається **лінією вузлів**, а **вузлами орбіти супутника** є точки перетину орбіти з екваторіальною площиною. Вузол **U** (Up), що утворюється під час руху супутника з південної небесної півсфери в північну, називають висхідним, а вузол **D** (Down), що утворюється під час руху з північної небесної півсфери в південну, – низхідним.

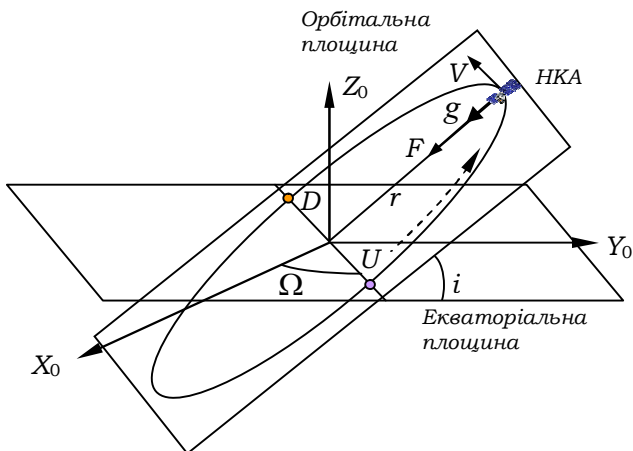


Рис. 4.4. Орієнтація орбітальної площини

Положення орбітальної площини щодо екваторіальної визначають два показники: довгота висхідного вузла  $\Omega$  і нахилення орбіти  $i$ .

Кут  $\Omega$  відлічують в екваторіальній площині від осі  $OX_0$  до лінії вузлів у діапазоні від  $0$  до  $360^\circ$ . Кут  $i$  відлічують між екваторіальною та орбітальною площинами в діапазоні від  $0$  до  $180^\circ$ .

Залежно від нахилення орбіти застосовують такі найменування орбіти:

- $i = 90^\circ$  – полярна;
- $i \approx 90^\circ$  – приполярна;
- $i = 0^\circ$  – екваторіальна;
- $0 < i < 90^\circ$  – похила.

СРНС, що розглядаються у ході курсу (GPS і ГЛОНАСС), використовують колові орбіти з ексцентриситетом  $e = 0$ . При цьому НКА рухаються з постійною кутовою швидкістю  $V$ , що значно спрощує розрахунки і прогнозування їх координат у НАС і наземних контрольних станціях. Незважаючи на деяку перевагу еліптичних орбіт над коловими за часом радіовидимості супутника, складність обчислення координат НКА і нестабільність еліптичних орбіт значно ускладнюють процедуру розв'язування навігаційних задач, що і слугувало вирішальним фактором при виборі параметрів орбіт СРНС GPS і ГЛОНАСС.

### 4.3.2. Незбурений орбітальний рух супутника

Під незбуреним орбітальним рухом розуміють рух супутника тільки під дією сили тяжіння Землі. Відповідно до другого закону Ньютона рух центра мас НКА в інерційній системі координат визначається рівнянням:

$$F = mg,$$

де  $F$  – вектор сили Земного тяжіння (рис. 4.4);  $m$  – маса НКА;  $g$  – вектор центрострімкого прискорення.

Сила тяжіння Землі, що діє на супутник:

$$F = \mu m / r^2,$$

де  $\mu = 3,9860044 \text{ м}^3/\text{с}^2$  – геоцентрична гравітаційна стала Землі;  $r$  – відстань від центра Землі до супутника. З урахуванням співвідношення для вектора прискорення  $g = d^2r/dt^2$ , де похідна від часу розуміється як повна похідна в інерційній системі, рівняння руху НКА матиме вигляд:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = F.$$

Траєкторія незбуреного руху супутника визначається рівняннями у проекціях на осі інерційної системи координат  $OX_0Y_0Z_0$ :

$$\frac{d^2 x_0}{dt^2} = -\mu \frac{x_0}{r^3}; \quad \frac{d^2 y_0}{dt^2} = -\mu \frac{y_0}{r^3}; \quad \frac{d^2 z_0}{dt^2} = -\mu \frac{z_0}{r^3},$$

де  $r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$  – проекції радіус-вектора на осі координат;  $x_0, y_0, z_0$  – поточні координати НКА.

### 4.3.3. Рух навігаційних космічних апаратів з урахуванням збурювальних факторів

У вільному польоті на НКА, крім центральної сили тяжіння Землі, діють також інші сили, які прийнято називати збурювальними [8]:

- нецентральне поле тяжіння, викликане несферичністю Землі і неправильним розподілом мас усередині неї;
- вплив гравітаційних полів Сонця, Місяця, планет й інших небесних тіл;

- опір середовища руху;
- тиск прямої і відбитої сонячної радіації;
- місячно-сонячні приливи;
- релятивістські ефекти<sup>11</sup> тощо.

У супутників, що мають на борту запаси палива, прискорення можуть виникати через витік газів із паливних контейнерів.

Збурення, що викликане діями цих сил, надзвичайно мале у порівнянні з силою тяжіння Землі, проте їх достатньо для відхилення орбіти НКА від розрахункової, що впливає на точність знання ефемерид НКА.

Збурювальні дії розрізняються за своєю періодичністю. Вікові збурення приводять до постійної повільної зміни параметрів орбіти. Періодичні збурення повторюються через певний інтервал часу і поділяються на коротко- і довгоперіодичні. Періодичність збурень обумовлена періодичним характером руху супутника й апроксимацією багатьох збурювальних чинників. Збурення параметрів орбіти, що обумовлені нецентральною силою тяжіння Землі, впливають на величину радіус-вектора і приводять до збільшення висоти польоту над екватором і зменшення над полюсами.

Аналіз збурень орбітальних параметрів дозволив зробити висновки:

- екваторіальні орбіти мають найстабільнішу форму, але нестабільне положення орбітальної площини і самої орбіти в цій площині;
- полярні орбіти мають стабільну орбітальну площину, але порівняно великі зміни форми орбіти та її орієнтації в орбітальній площині;
- похилі орбіти з  $i \approx 60^\circ$  мають компромісну стабільність параметрів положення орбіти в орбітальній площині і період обігу.

У навігаційних системах GPS і ГЛОНАСС застосовуються середньовисотні похилі ( $i \approx 60^\circ$ ) орбіти. Практичні дослідження збурень, властивих цим орбітам, показали, що періоди коливань параметрів  $i$  і  $\Omega$  становлять від десятків до сотень років, залежно від початкових параметрів. Вплив атмосферного гальмування для

---

<sup>11</sup> *Релятивістські ефекти* – явища, що спостерігаються при швидкостях тіл (частинок), порівняних зі швидкістю світла. До них відносяться: скорочення Лоренца-Фіцджеральда, релятивістське уповільнення часу, збільшення маси тіла зі зростанням його енергії тощо. Релятивістськими називаються також ефекти загальної теорії відносності (релятивістської теорії тяжіння), наприклад, ефект уповільнення перебігу часу в сильному полі тяжіння.

супутників з орбітою вище 1000 км практично відсутній. Вплив тяжіння Місяця приблизно удвічі більше впливу Сонця, причому збурення через вплив Місяця і Сонця перевищують збурення, що виникають через нерівномірність поля тяжіння Землі.

Врахування збурювальних факторів дуже важливе для визначення і корегування ефемерид НКА. Параметри руху НКА періодично контролюються наземним комплексом контролю та управління, де і приймається рішення про корегування орбіти супутника, уточнення ефемерид та завантаження поправок на НКА.

#### 4.4. Навігаційні характеристики навігаційних космічних апаратів

До основних навігаційних характеристик НКА відносяться:

- зона огляду НКА (зона видимості з супутника) – частина земної поверхні, яка видна з НКА;
- зона радіовидимості НКА (зона видимості з навігаційного приймача) – частина небосхилу, що визначається здатністю приймати радіосигнал НКА;
- тривалість спостереження НКА – максимальний час безперервного спостереження одного НКА.

Зона огляду визначається кутом  $\beta_{\max}$  (рис. 4.5), який визначає сферичний радіус частини земної поверхні, що спостерігається з НКА. Центром зони огляду є географічне місце супутника – точка  $O_3$ , розташована в місці перетину земної поверхні з лінією, що сполучає центри мас Землі і НКА. Розмір зони огляду залежить від висоти польоту супутника й обчислюється за виразом

$$\beta_{\max} = \arccos \frac{R_3}{R_3 + H_{\text{НКА}}},$$

де  $R_3$  – радіус землі;  $H_{\text{НКА}}$  – висота польоту НКА.

Зона радіовидимості обмежена особливостями поширення радіохвиль, а саме поняттям радіогоризонту – умовною лінією, яка знаходиться вище за лінію істинного горизонту на кут маски  $\alpha = 5 - 14^\circ$ :

$$\beta = \arccos \frac{R_3 \cos \alpha}{R_3 + H_{\text{НКА}}} - \alpha.$$



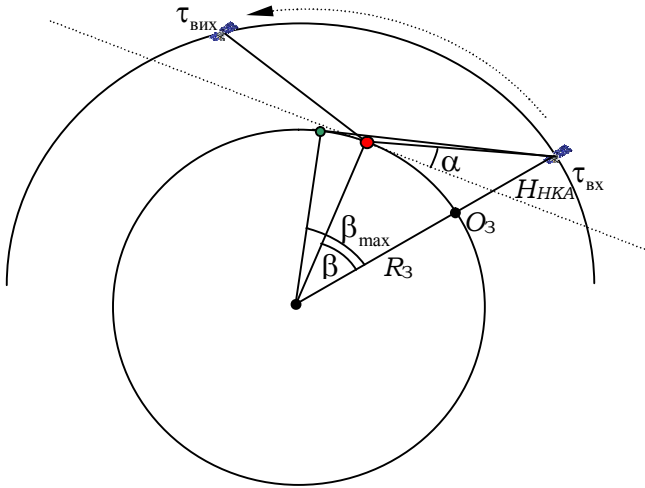


Рис. 4.5. Основні навігаційні характеристики НКА

**Тривалість спостереження** визначається часом перебування НКА в зоні радіовидимості як різниця між часом виходу і входу з зони:

$$t_{\text{рв}} = \tau_{\text{вих}} - \tau_{\text{вх}}; t_{\text{рв}} = \frac{2\beta}{V} = \frac{T\beta}{\pi},$$

де  $V = 2\pi/T$  – кутова швидкість супутника;  $T$  – період обертання супутника.

Тривалість спостереження максимальна для спостерігачів, які знаходяться на підсупутниковій трасі, і становить 240–300 хвилин залежно від  $\alpha$ .

Важливими параметрами СРНС також є площа огляду  $S_0 = 2\pi R_3^2(1 - \cos\beta_{\text{max}})$  і відносна площа огляду  $S_0/S_3 = \sin^2(\beta_{\text{max}}^2/2)$ , де  $S_3$  – площа поверхні Землі. Завдяки обраним висотам орбіт СРНС GPS і ГЛОНАСС мають такі характеристики огляду:  $\beta_{\text{max}} \approx 75^\circ$ ,  $S_0/S_3 = 30\%$ . Навігаційний приймач при прийомі радіосигналів від декількох супутників використовує алгоритм вибору оптимального сузір'я НКА, тобто з урахуванням кількості НКА космічного угруповання в зоні радіовидимості одночасно знаходяться 6–7 супутників.

#### 4.5. Вимірювані навігаційні параметри та їх геометричні властивості

Розглянемо різні варіанти вимірювань навігаційних параметрів при застосуванні різних методів позиціонування. Припустимо, що параметри положення та руху опорних об'єктів (радіомаяків, НКА – позначимо їх літерою  $A$ ) відомі, а параметри положення й руху іншого об'єкта (об'єкта навігації, навігаційного приймача – позначимо його літерою  $B$ ) підлягають визначенню, причому за відсутності апріорних відомостей про параметри положення й руху об'єкта  $B$  ці параметри можуть набувати будь-які значення з області їх припустимих значень. Вимірюваними навігаційними параметрами можуть виступати дальності (псевдодальності), різниці й суми дальностей (псевдодальностей), кутomisні, азимутальні й інші кутові вимірювання, радіальні швидкості (радіальні псевдошвидкості), їх різниці тощо.

Псевдодальності й радіальні псевдошвидкості, реалізовані за беззапитовим принципом навігаційних вимірювань, у порівнянні з дальністю й радіальною швидкістю містять похибки, обумовлені розбіжністю відповідно фаз і частот бортових еталонів частоти НКА і навігаційного приймача. Усунення цих похибок можливо або за рахунок їх включення у число параметрів, що визначаються, або через утворення різницевих вимірювань. Таким чином, псевдодалекомірні й псевдорадіально-швидкісні вимірювання можуть бути зведені до їхніх різницевих еквівалентів.

Залежно від методу позиціонування кожному з вимірюваних навігаційних параметрів відповідає своя геометрична фігура, яка є геометричним місцем точок можливого розташування об'єкта навігації, для яких значення вимірюваного навігаційного параметра буде однаковим, що утворює у просторі поверхню положення.

Вимірювання дальності  $D$  (рис. 4.6, *a*) рівнозначне виділенню у просторі навколо об'єкта  $A$  поверхні положення у вигляді сфери, центр якої розташований у точці розташування об'єкта  $A$ , а радіус дорівнює виміряній дальності  $D$ .

Вимірюванню різниці дальностей  $D_{\Delta}$  (рис. 4.6, *б*) між двома об'єктами  $A$  (два різних НКА –  $A_1$  і  $A_2$ ) відповідає поверхня положення у вигляді двопорожнинного гіперboloїда обертання, тому що для точок поверхні саме цієї фігури характерно те саме зна-

чення різниці дальностей  $D_{\Delta}$  до фокусів гіперboloїда, у яких розташовані опорні об'єкти.

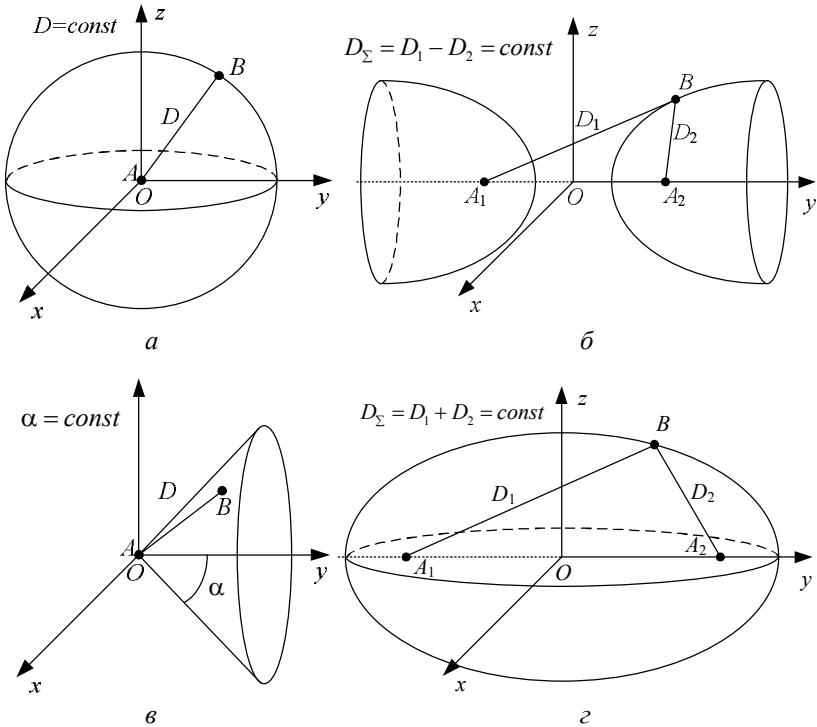


Рис. 4.6. Поверхні положення, що відповідають вимірюванням:  
 а – далекомірним; б – різницево-далекомірним; в – радіально-швидкісним;  
 г – сумарно-далекомірним

У випадку вимірювання радіальної швидкості  $\dot{D}$  (рис. 4.6, в) припустимо, що опорний об'єкт  $A$  рухається зі швидкістю  $V$ , яка складає з лінією, що з'єднує опорний і визначений об'єкт, кут  $\alpha$ . Тоді:

$$\dot{D} = V \cos(\alpha).$$

Звідси:

$$\cos(\alpha) = \dot{D} / V.$$

Таким чином, радіальну швидкість можна ототожнити з кінечною поверхнею, вершина якої сполучена з опорним об'єктом і кут при вершині дорівнює:

$$2\alpha = 2 \arccos \frac{\dot{D}}{V}.$$

Сумі дальностей  $D_{\Sigma}$  (рис. 4.6, з) відповідає поверхня положення у вигляді еліпсоїда обертання, у фокусах якого розташовані опорні об'єкти, а для поверхні еліпсоїда, яка є областю можливого розташування об'єкта, що визначається, характерне те саме значення  $D_{\Sigma}$ .

Розглянуті поверхні положення можуть бути розбиті на дві групи: замкнуті й відкриті. До замкнутих відносяться поверхні положення, відповідні  $D$  і  $D_{\Sigma}$ . Замкнутими ці поверхні можуть бути названі тому, що вони являють собою фігури (сфера, еліпсоїд) із цілком визначеними (кінцевими) розмірами (площею) поверхні, а отже, об'єкт, що визначається, після вимірювання навігаційного параметра виявляється локалізованим в обмеженій області, яка відповідає цій поверхні.

До відкритих поверхонь положення відносяться поверхні, відповідні  $D_{\Delta}$  і  $\dot{D}$ . Ці поверхні є відкритими тому, що вони необмежено можуть бути подовжені, їхня площа нескінченна, а вимірювання відповідного навігаційного параметра не дозволяє локалізувати об'єкт, що визначається, у деякій обмеженій області. Разом з цим слід зазначити, що в обох випадках вимірювання відповідного навігаційного параметра дозволяє із тривимірного навігаційного простору виділити у вигляді поверхні положення двовимірний навігаційний простір. Більше того, вимірювальний навігаційний параметр може вважатися вимірюванням однієї з координат об'єкта навігації у певній координатній системі.

На практиці вимірювання  $R$  зазвичай виконується з похибкою  $\Delta R$ , наявність якої призводить до зсуву поверхні положення, а отже, до похибки навігаційного визначення. Похибки такого типу під час проведення багатьох вимірювань можуть носити випадковий і систематичний характер. Величина зсуву поверхні положення в напрямку, нормальному до неї, у разі похибки вимірів  $\Delta R$  визначається виразом

$$\Delta n = \frac{\Delta R}{G_R}, \quad (4.1)$$

де  $G_R$  – модуль градієнта  $\vec{G}_R$  поверхні положення. Відзначимо, що  $\vec{G}_R = \frac{\partial R}{\partial n} \vec{n}$  являє собою вектор, що збігається у напрямку з нормаллю  $\vec{n}$ . Якщо ввести прямокутну систему координат  $Oxyz$ , то

$$G_R = \left( \frac{\partial R^2}{\partial x} + \frac{\partial R^2}{\partial y} + \frac{\partial R^2}{\partial z} \right)^{1/2}. \quad (4.2)$$

Таким чином, для знаходження  $G_R$  необхідно записати рівняння поверхні положення в обраній системі координат, знайти часткові похідні за цими координатами і обчислити  $G_R$  за формулою (4.2). У ході аналізу точніших можливостей методів і алгоритмів навігаційних визначень використовується поняття «геометричний чинник». Під ним розуміють коефіцієнт, який пов'язує похибку вимірювання навігаційного параметра з похибкою, яка характеризує результат навігаційних визначень. Стосовно розглянутої ситуації геометричний чинник може бути обчислений за формулою:

$$\Gamma_{Rn} = G_{Rn}^{-1}. \quad (4.3)$$

Тоді  $\Delta n_a = \Gamma_{Rn} \Delta R$ .

З урахуванням позначень, представлених на рис. 4.6, градієнти поверхонь положення і відповідні їм  $\Gamma_{Rn}$  зведені в табл. 4.1.

З рис. 4.6 і даних, наведених у табл. 4.1, можна зробити певні висновки про геометричні властивості різних навігаційних параметрів і, відповідно, точнісні можливості навігаційних визначень, заснованих на цих параметрах.

Для далекомірного методу характерні ізометричні властивості в тому розумінні, що похибкам навігаційного параметра відповідають ті самі похибки положення об'єкта, що визначається, неза-

лежно від взаємного розташування (віддалення) опорного об'єкта й об'єкта, що визначається.

Таблиця 4.1

*Навігаційні параметри та відповідні їм модулі градієнтів і геометричні фактори*

| Навігаційний параметр | $D$ | $D_{\Delta}$  | $D_{\Sigma}$                                      | $\dot{D}$                                 |
|-----------------------|-----|---|---|---|
| Модуль градієнта      | 1   | $2 \sin \frac{\varphi_{D_{\Delta}}}{2}$                           | $2 \cos \frac{\varphi_{D_{\Sigma}}}{2}$           | $\frac{V}{D} \sin \alpha$                 |
| Геометричний фактор   | 1   | $\frac{1}{2} \operatorname{cosec} \frac{\varphi_{D_{\Delta}}}{2}$ | $\frac{1}{2} \sec \frac{\varphi_{D_{\Sigma}}}{2}$ | $\frac{D}{V} \operatorname{cosec} \alpha$ |

Похибка навігаційних визначень у випадку різницево-далекомірного методу  $D_{\Delta}$  буде тим менше, чим ближче об'єкт, що визначається, до лінії, яка з'єднує опорні об'єкти.

У граничному випадку, коли кут  $\varphi = \pi$  і об'єкт, що визначається, мінімально віддалений від опорних об'єктів,  $\Gamma_{D_{\Delta n}} = \frac{1}{2}$ , тобто навіть менше  $\Gamma_{D_n}$ . Разом з тим віддалення об'єкта, що визначається, від опорних об'єктів приводить до зменшення  $\varphi_{D_{\Delta}}$ , а отже, до зростання  $\Gamma_{D_{\Delta n}}$ . У граничному випадку при прагненні  $D_1$  і  $D_2$  до нескінченності,  $\varphi_{D_{\Delta}} \rightarrow 0$  і  $\Gamma_{D_{\Delta n}} \rightarrow \infty$ , тобто точнісні можливості, властиві  $D_{\Delta}$ , погіршуються з віддаленням об'єкта, що визначається, від опорних.

Для сумарно-далекомірного методу, коли опорні об'єкти й об'єкти, що визначаються, лежать на зворотній лінії, кут  $\varphi_{D_{\min}} = 0$ , і в цьому випадку найменше з можливих значень  $\Gamma_{D_{\Sigma n}} = \frac{1}{2}$ , тобто відповідає попередньому розглянутому випадку. У разі збільшення значення  $\varphi_{D_{\Sigma}}$  збільшується  $\Gamma_{D_{\Sigma}}$ , але у випадку сумарно-далекомірного методу  $\varphi_{\max}$  відповідає випадку  $D_1 = D_2$ , тобто рівному віддаленню об'єкта, що визначається, від опорних. При цьому  $\varphi_{D_{\Sigma \max}}$  і, отже, максимальні значення  $\Gamma_{D_{\Sigma n}}$  не перевищує величину 0,7.

Для радіально-швидкісного методу визначення положення у випадку знаходження об'єкта, що визначається, на траверзі, тобто на мінімальному віддаленні від рухомого опорного об'єкта, коли  $V_r = 0$  і  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , параметр  $\dot{D}_n = 0$ . У разі збільшення віддалення  $\Gamma_{Dn}$  збільшується, виявляючи тим самим подібність властивостей радіально-швидкісного методу властивостям кутомірних методів.

Відзначимо, однак, що у випадку використання  $\dot{D}$  для визначення компонентів швидкості об'єкта, що визначається, у системі координат  $Ox'y'z$  параметру  $\dot{D}$  відповідає сфера. У цьому випадку властивості цього методу стосовно компонента швидкості аналогічні властивостям далекомірного методу стосовно компонентів положення об'єкта, що визначається.

Наведені вище міркування справедливі як при випадкових, так і при систематичних похибках з тією лише різницею, що для випадкових похибок їхня дія виявляється на випадковому зсуві поверхні положення. При цьому у формулі (4.1)  $\Delta R$  і  $\Delta n$  необхідно відповідно замінити на  $\sigma_{\Delta R}$  і  $\sigma_{\Delta n}$ , що являють собою середньоквадратичні похибки.

Знання градієнтів і геометричних факторів, властивих різним навігаційним параметрам, дозволяє зіставити точнісні можливості відповідних навігаційних визначень. Так, для досягнення однакового зсуву поверхонь положення двох методів з навігаційними параметрами  $R_1$  і  $R_2$  необхідно, щоб:

$$\Gamma_{R1n} \Delta R_1 = \Gamma_{R2n} \Delta R_2,$$

або

$$\frac{\Delta R_2}{\Delta R_1} = \frac{\Gamma_{R1n}}{\Gamma_{R2n}} = K_{R1R2} \quad \text{і} \quad \Delta R_2 = K_{R1R2} \Delta R_1.$$

#### 4.6. Моделювання характеристик супутникових радіонавігаційних систем

Для розрахунку координат навігаційних супутників за даними оперативної і неоперативної інформації, що передається із супутників, може бути застосований такий алгоритм розрахунку.

Координати супутників у геоцентричній інерційній системі координат (ECEF) розраховуються за формулами:

$$\begin{cases} x_k = x'_k \cdot \cos \Omega_k - y'_k \cdot \cos i_k \cdot \sin \Omega_k; \\ y_k = x'_k \cdot \sin \Omega_k + y'_k \cdot \cos i_k \cdot \cos \Omega_k; \\ z_k = y'_k \cdot \sin i_k, \end{cases} \quad (4.4)$$

де  $\Omega_k$  – довгота висхідного вузла орбітальної площини  $k$  НКА;  
 $i_k$  – скорегований нахил орбіти супутника.

Скорегована довгота висхідного вузла  $\Omega_k$  визначається із співвідношення:

$$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e) \cdot t_k - \dot{\Omega}_e \cdot t_{oe}, \quad (4.5)$$

де  $\Omega_0$  – довгота висхідного вузла орбітальної площини на тижневу епоху;  $\dot{\Omega}$  – швидкість зміни прямого сходження;  $t_{oe}$  – опорний час прив'язування переданих ефемерид;  $t_k$  – цей момент часу.

Координати навігаційного супутника в орбітальній площині:

$$\begin{cases} x'_k = r_k \cdot \cos u_k; \\ y'_k = r_k \cdot \sin u_k, \end{cases} \quad (4.6)$$

де  $r_k$  – скорегований радіус орбіти;  $u_k$  – скорегований аргумент широти.

Скорегований нахил орбіти супутника:

$$i_k = i_0 + \delta i_k + (IDOT) \cdot t_k, \quad (4.7)$$

де  $i_0$  – кут нахилання орбіти супутника;  $\delta i_k$  – поправка для корекції аргументу широти;  $IDOT$  – швидкість зміни кута нахилання.

Скорегований радіус орбіти супутника:

$$r_k = A \cdot (1 - e \cdot \cos E_k) + \delta r_k, \quad (4.8)$$

де  $A = (\sqrt{A})^2$  – велика піввісь еліптичної орбіти навігаційного супутника;  $e$  – ексцентриситет орбіти;  $E_k$  – ексцентрична аномалія.



Скорегований аргумент широти:

$$u_k = \Phi_k + \delta u_k, \quad (4.9)$$

де  $\Phi_k$  – аргумент широти.

Поправка для корекції аргументу широти:

$$\delta u_k = C_{us} \cdot \sin 2\Phi_k + C_{uc} \cdot \cos 2\Phi_k, \quad (4.10)$$

де  $C_{us}$  – амплітуда синусного гармонійного виправлення до аргументу широти;  $C_{uc}$  – амплітуда косинусного гармонійного виправлення до аргументу широти.

Поправка для корекції радіуса:

$$\delta r_k = C_{rc} \cdot \cos 2\Phi_k + C_{rs} \cdot \sin 2\Phi_k, \quad (4.11)$$

де  $C_{rc}$  – амплітуда косинусного гармонійного виправлення до радіуса орбіти супутника;  $C_{rs}$  – амплітуда синусного гармонійного виправлення до радіуса орбіти супутника.

Поправка для корекції нахилу:

$$\delta i_k = C_{ic} \cdot \cos 2\Phi_k + C_{is} \cdot \sin 2\Phi_k, \quad (4.12)$$

де  $C_{ic}$  – амплітуда косинусного гармонійного виправлення до кута нахилу;  $C_{is}$  – амплітуда синусного гармонійного виправлення до кута нахилу.

Аргумент широти:

$$\Phi_k = v_k + \omega, \quad (4.13)$$

де  $v_k$  – дійсна аномалія;  $\omega$  – аргумент перигею.

Ексцентрична аномалія:

$$E_k = \arccos \frac{e + \cos v_k}{1 + e \cdot \cos v_k}. \quad (4.14)$$

Дійсна аномалія:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_k = \operatorname{arctg} \left( \frac{\sin v_k}{\cos v_k} \right) = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{\left( \sqrt{1-e^2} \cdot \sin E_k \right) / (1-e \cdot \cos E_k)}{(\cos E_k - e) / (1-e \cdot \cos E_k)} \right\}; \\ \sin v_k = \frac{\sqrt{1-e^2} \cdot \sin E_k}{1-e \cdot \cos E_k}; \\ \cos v_k = \frac{\cos E_k - e}{1-e \cdot \cos E_k}. \end{array} \right. \quad (4.15)$$

Рівняння Кеплера для ексцентричної аномалії, що розв'язується методом ітерацій:

$$M_k = E_k - e \cdot \sin E_k. \quad (4.16)$$

Середня аномалія:

$$M_k = M_0 + n \cdot t_k, \quad (4.17)$$

де  $M_0$  – середня аномалія на час прив'язування.

Скорегований середній рух:

$$n = n_0 + \Delta n, \quad (4.18)$$

де  $\Delta n$  – відмінність середнього руху від розрахункового значення.

Час відліку від опорної епохи ефемерид:

$$t_k = t - t_{oe}, \quad (4.19)$$

де  $t$  – системний час GPS на момент передачі повідомлення (час, скорегований на величину затримки проходження сигналу від супутника до споживача, рівний відношенню дальності до швидкості світла);  $t_k$  – цей момент часу. Цей параметр повинен відповідати дійсній різниці між системним часом GPS  $t$  і опорним часом задання ефемерид  $t_{oe}$  і враховувати момент переходу «початок/кінець» тижня. Врахування моменту переходу «початок/кінець» тижня проводиться так: якщо  $t_k$  більше «302 400» секунд, то від  $t_k$  віднімається «604 800» секунд; якщо  $t_k$  менше «302 400» секунд, то до  $t_k$  додається «604 800» секунд («604 800» – кількість секунд в одному тижні).

Розрахунковий середній рух:

$$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{A^3}}. \quad (4.20)$$

У виразах (4.4)–(4.20) параметри:  $C_{rs}$ ,  $\Delta n$ ,  $M_0$ ,  $C_{uc}$ ,  $e$ ,  $C_{us}$ ,  $\sqrt{A}$ ,  $t_{oe}$  передаються з навігаційного супутника в підкадрі 2; параметри:  $C_{ic}$ ,  $\Omega_0$ ,  $C_{is}$ ,  $i_0$ ,  $C_{rc}$ ,  $\omega$ ,  $\dot{\Omega}$  (OMEGADOT), IDOT передаються з навігаційного супутника в підкадрі 3; параметри:  $\mu = 3,986005 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$  і  $\dot{\Omega}_e = 7,2921151467 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$  табличні.

Визначено, якщо споживач працює в геостационарних координатах, він повинен додати  $(-\dot{\Omega}_e \cdot y \cdot \Delta t, \dot{\Omega}_e \cdot y \cdot \Delta t, 0)$  до координат  $(x, y, z)$ .

При розрахунку траєкторії руху навігаційного супутника за даними альманаху у виразах (4.6)–(4.8) не враховуються поправки.

Результат моделювання характеристик супутникових навігаційних систем наведені нижче на рис. 4.7–4.10.

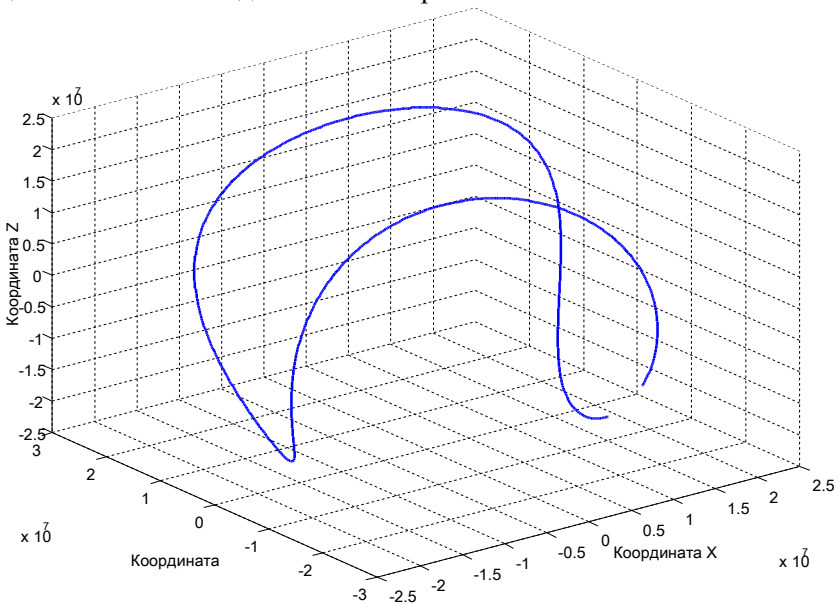


Рис. 4.7. Орбіта 5 НКА за 23 години

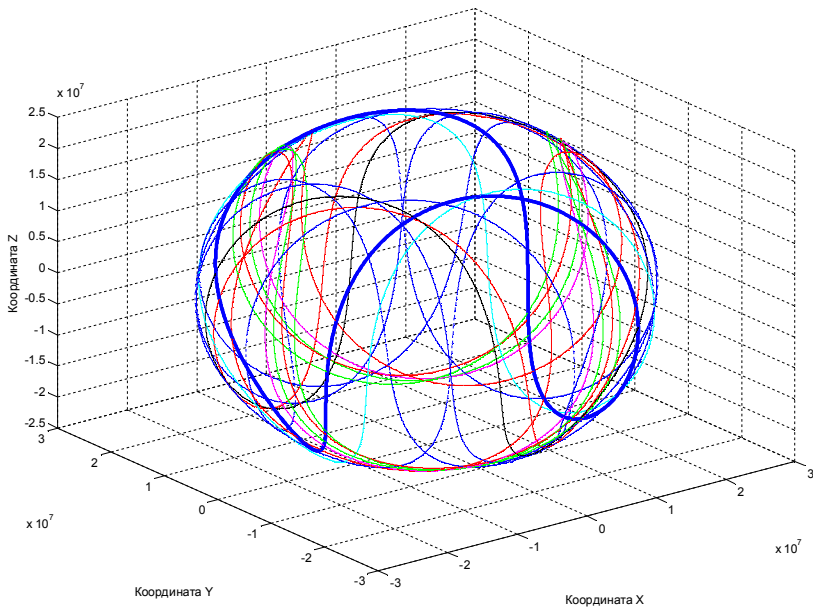


Рис. 4.8. Орбіти 13 НКА за добу (24 години)

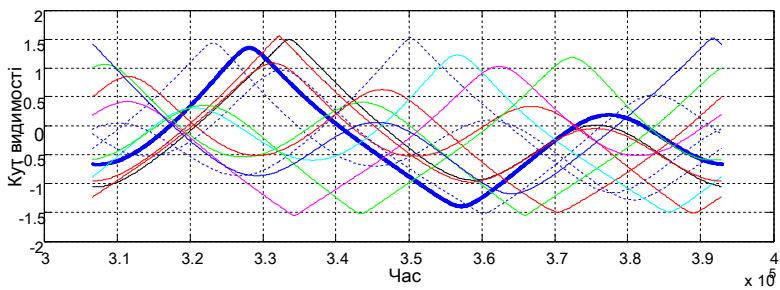
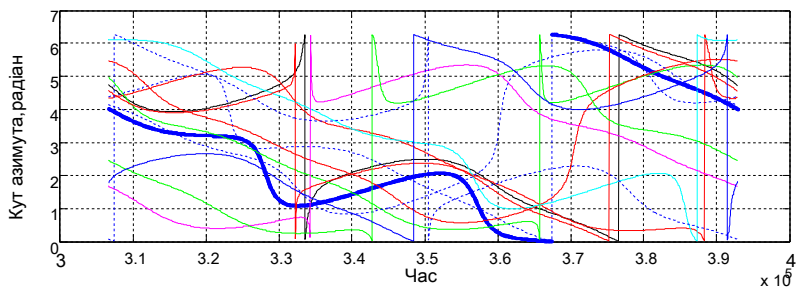


Рис. 4.9. Кути азимута і видимості 13 супутників за добу

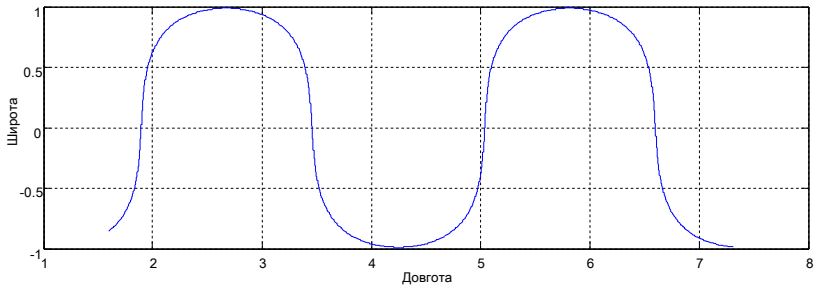
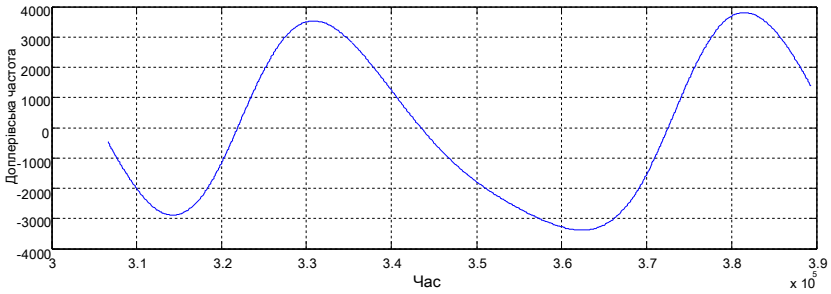


Рис. 4.10. Доплерівська частота та слід супутника 14 за 23 години

Це моделювання дозволяє прогнозувати чисельність видимих супутників та обирати оптимальне для спостереження сузір'я НКА.

### **Питання для самоконтролю:**

1. Перелічіть види систем координат, що потрібні для розв'язування навігаційних задач.
2. Чим визначається точка весняного рівнодення?
3. Як співвідносяться геоцентрична інерційна і рухома системи координат?
4. Яким чином здійснюється конвертування прямокутних координат у сферичні?
5. Назвіть переваги колової орбіти над еліптичною з погляду розв'язання навігаційних задач.
6. Запишіть рівняння траєкторії незбуреного руху супутника.
7. На які орбіти супутників найменше впливають збурювальні сили?
8. Чим відрізняється зона огляду і зона радіовидимості?

## **Розділ 5. СИСТЕМИ ЧАСУ В СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

*Розгляд принципів побудови і функціонування супутникових радіонавігаційних систем неможливий без попереднього ознайомлення з основними поняттями, що відносяться до одиниць мір часу. Ці одиниці використовуються для визначення просторового положення НКА, прив'язування сигналів НКА до єдиної шкали часу, ув'язування інерційних і рухомих координатних систем, а також визначення вектора просторового положення об'єкта навігації.*

### **5.1. Функції часу в супутникових радіонавігаційних технологіях**

У процесі розв'язування навігаційних задач час виконує три основні функції:

- показує кут повороту земної системи координат щодо небесної, що необхідно при переходах з однієї системи в іншу;
- виступає як незалежна змінна в рівняннях руху природних і штучних небесних тіл;
- є одним з основних аргументів у розв'язуванні задач координатного визначення об'єкта навігації.

Позиціонування об'єктів навігації відбувається в умовах постійного руху НКА, земної поверхні і можливого руху навігаційного приймача. Координатне визначення за базовим методом (далекомірним) передбачає визначення відстані між НКА й об'єктом навігації, яка вимірюється за часом поширення сигналу на трасі НКА – навігаційний приймач, при цьому для забезпечення прийнятної точності позиціонування (враховуючи швидкість поширення радіохвиль) вимоги до точності визначення часової затримки навігаційного радіосигналу достатньо великі. А це, у свою чергу, накладає жорсткі вимоги на стабільність часових стандартів і синхронізацію процесів в апаратних частинах НКА і навігаційного приймача. При цьому ці вимоги зростають у міру збільшення вимог до точності координатних визначень.

Стабільність часових стандартів має важливе значення також і з погляду формування навігаційного радіосигналу. Справа в тому, що стабільність генератора опорної частоти впливає на несучу

чу (центрально) частоту навігаційного радіосигналу, і, відповідно, зміщення частоти радіосигналу на деяку величину ускладнює пошук сигналу й оцінюється навігаційним приймачем як доплерівський зсув, що вносить певну похибку при позиціонуванні доплерівським методом.

Отже, створення єдиного радіонавігаційного поля можливе лише за умови синхронізації процесів у всіх сегментах СРНС, ув'язки різних систем часу й абсолютне прив'язування подій до шкали відповідного часу. Крім цього, сумісне використання різних СРНС (наприклад, GPS і ГЛОНАСС) вимагає ув'язки в апаратурі споживача їх системних шкал часу.

Слід зауважити, що СРНС призначені також і для часової синхронізації різних віддалених наземних об'єктів, що відбувається завдяки оцінюванню поправок шкал часу наземних об'єктів до певної універсальної часової шкали (у GPS такою шкалою обрана шкала морської обсерваторії США UTC<sub>USNO</sub> – *United States Navy Observatory*, в ГЛОНАСС – шкала державної служби частоти та часу Росії UTC (SU)). USNO має 16 цезієвих генераторів, рубідієвий та водневий генератори. Національне бюро стандартів США (NBS – National Bureau Standards) має 8 цезієвих генераторів. Атомні шкали часу (ШЧ), що формуються UNSO і NBS, синхронізовані між собою і щодо міжнародної ШЧ TAI (Time Atomic International) з точністю до декількох мікросекунд.

Державні еталони частоти та часу (ДЕЧЧ) Росії – це комплекс, який налічує близько 100 пристроїв, у складі яких цезієві та водневі генератори, зберігачі часу, пристрої звірення тощо. Середньоквадратична похибка результату вимірювання часу за допомогою ДЕЧЧ не перевищує  $5 \cdot 10^{-14}$  с.

## 5.2. Системи часу

Обчислення часу в СРНС полягає у вимірюванні часу, збереженні часу між черговими циклами його вимірювання і формуванні сигналів часу для їх подальшого використання.

Відповідно до типу розв'язуваних навігаційних задач застосовуються два види систем обчислення часу: **астрономічні** й **атомні**. У цих системах для обчислення часу використовуються спостереження за природними або штучними фізичними періодичними процесами. Астрономічні системи часу пов'язані з до-

бовим обертанням Землі. Кутова швидкість обертання Землі є змінною величиною і показує як періодичні зміни, так і довгострокове дрейфування, що становить близько секунди на рік. Системи атомного часу мають рівномірну (стабільну) шкалу часу з часовою стабільністю до мікросекунди за рік, при цьому точність атомного часу перебільшує точність астрономічного не менше ніж на шість порядків. Проте атомних систем часу недостатньо для досягнення найвищої точності результатів, оскільки в них не враховуються ефекти загальної і спеціальної теорії відносності, що мають переважно періодичний характер. У таких випадках застосовується *динамічний час*.

### 5.2.1. Системи астрономічного часу

В основі систем астрономічного часу лежить добуве обертання Землі. Еталоном для побудови шкал астрономічного часу (сонячних і зоряних) є сонячні і зоряні доби, залежно від фіксованої точки небесної сфери, за якою проводиться вимірювання часу. Сонячна доба визначається при вимірюванні відрізка часу між однаковим положенням меридіональної площини (повного обертання Землі навколо власної вісі) відносно центра сонячного диска, зоряна доба – відносно точки весняного рівнодення. Напрямок обертання Землі навколо своєї осі збігається з напрямком руху Землі відносно Сонця, тому сонячна доба довше зоряної (рис. 5.1).

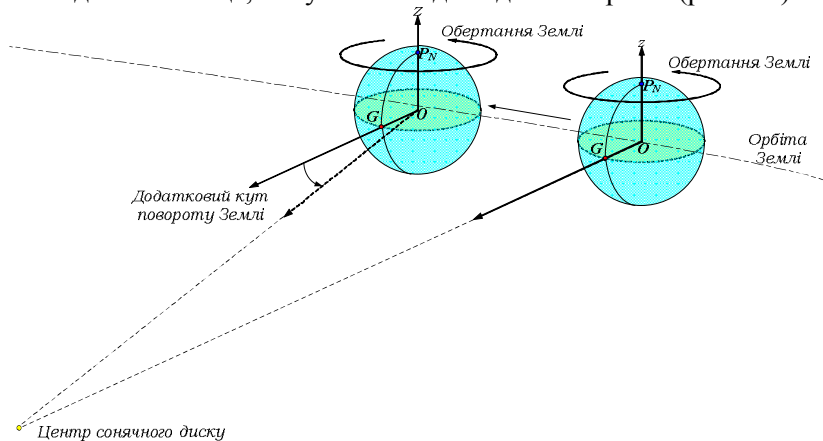


Рис. 5.1. Співвідношення сонячних і зоряних діб



***Істинним зоряним часом  $S$***  називається годинний кут істинної точки весняного рівнодення (рис. 5.2).

Цей час можна визначити, якщо спостерігати деяку зірку в момент її кульмінації, тобто під час проходження меридіана місця  $L$ . Для верхньої кульмінації зірки годинний кут дорівнює нулю, і тоді зоряний час  $S$  дорівнює її істинному прямому сходженню  $S = \alpha$ . Тобто місцевий зоряний час вимірюється часовим кутом  $t$  у точці весняного рівнодення відносно місцевого небесного меридіана  $L$ . Часовий кут ідентичний географічній довготі і вимірюється в часовій мірі – годинах, хвилинах, секундах. Зоряний час також визначається і в кутових значеннях з урахуванням того, що за 1 годину Земля обертається на кут  $15^\circ$ .

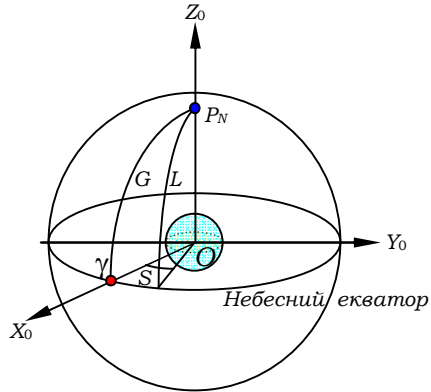


Рис. 5.2. Щодо визначення зоряного часу

Зоряний час, що вимірюється відносно Гринвіцького меридіану, називається ***Гринвіцьким зоряним часом  $S_G$*** .

У Гринвіцький зоряний час  $S_G$  вводиться поправка на прецесію (обертання земної осі по конусу) і нутацію (невеличкі коливання земної осі). Унаслідок нутації і прецесії точка весняного рівнодення переміщується. Зоряний час, обчислений з урахуванням тільки прецесії, має назву ***середнього***, а з урахуванням і нутації має назву ***істинного***.

***Істинна сонячна доба*** обчислюється по кульмінації середини сонячного диска. З урахуванням нерівномірності руху Землі по орбіті та непостійності положення осі добового обертання Землі прийнято усереднювати істинні сонячні доби, при цьому вважається, що рух Землі по орбіті стабільний. Час, обчислений з таким припущенням, називається ***середнім сонячним часом***. Підраховано, що 24 годинам зоряного часу відповідають 23 год 56 хв 4,091 с середнього сонячного часу.

Сонячний час, обчислений за Гринвіцьким (нульовим) меридіаном, називається ***всесвітнім часом*** та позначається ***UT***

(Universal Time). Сонячний час, обчислений за іншими меридіанами, які відстають один від одного на  $15^\circ$ , називається *місцевим середнім сонячним часом*. Нумерація інших часових поясів іде послідовно із заходу на схід та відповідно до нумерації при переході до наступного поясу додається 1 година.

Для усунення непостійності зоряних і сонячних діб був введений *ефемеридний* (передобчислений) час *ЕТ*, який використовувався до 1984 року. В ефемеридному часі одиницею вимірювання часу є *ефемеридна секунда*, що розраховується як  $1/86400$  частка середньої тривалості доби в певний день 1900 року.

### 5.2.2. Системи атомного часу

Міжнародний атомний час *АТ* був введений у липні 1955 року як основний часовий стандарт. Введенню атомного часу сприяло створення високостабільних атомних еталонів частоти, що дозволило перейти до неастрономічних систем часу і ввести нову одиницю виміру часу – *атомну секунду*.

Атомна секунда визначена як 9 192 631 770 коливань незбуджених переходів між двома енергетичними рівнями цезію 133. Це число було вибрано для того, щоб наблизити величину фундаментальної одиниці часу в Міжнародній системі наукових одиниць СІ до середньої секунди астрономічних систем часу. Атомний час обчислюється групою атомних годинників більш ніж у 50 лабораторіях наукових центрів різних країн світу.

Шкала атомного часу *АТ* була суміщена зі шкалою всесвітнього часу *УТ* 1 січня 1958 р. Зв'язок між *АТ* і *УТ* проводиться або через різницю *УТ-АТ*, або через всесвітній координований час *УТС* (Universal Time Coordinate, призначенням якого є забезпечення синхронності місцевих шкал *АТ*), для якого також повідомляється різниця шкал *УТ-УТС*. Величина різниці *УТ-УТС* за визначенням часу *УТС* не повинна бути більше 0,9 с. У разі наближення її до цього значення шкалу *УТС* коректують на 1 секунду.

*ТАІ* є іншою міжнародною атомною ШЧ. Шкала *ТАІ* обчислюється у вигляді середньозваженої суми шкали *АТ* у лабораторіях різних країн та формується безперервно з 01.01.1958 року. Точність ШЧ *ТАІ* становить  $10^{-12}$  с, а відносна стабільність –  $10^{-13}$ . Розходження між ШЧ *ТАІ* і місцевими *АТ* визначається середньоквадратичною похибкою, яка не перевищує 0,2 мкс.

Різноманіття атомних часових шкал обґрунтовується потребами повсякденної діяльності людини, науки і техніки щодо точності відтворення одиниць часу, оперативності і рівномірності.

**Системи динамічного часу.** Для опису рівнянь руху супутника Землі використовують земний динамічний час (Terrestrial Dynamical Time – *TDT*), який представляє єдину часову шкалу для руху в гравітаційному полі Землі. Динамічний час є незалежною змінною в рівняннях руху тіл у гравітаційному полі відповідно до загальної теорії відносності. Шкала часу *TDT* суміщена зі шкалою *AT*.

*Згодом Міжнародний астрономічний союз вирішив, що назва TDT була неточною, оскільки не відповідала безпосередньо якому-небудь динамічному часу в теоріях руху небесних тіл у Сонячній системі й у 1991 році перейменував час TDT у земний час (Terrestrial Time – TT).*

Земний час *TT* є сучасною шкалою часу, яка замінила *ET*.

### **5.2.3. Час при пов'язанні рухомих та інерційних систем координат**

Орієнтація Землі визначається як обертання геоцентричного набору осей *OXYZ*, жорстко пов'язаних із Землею, відносно геоцентричного набору осей *OX<sub>0</sub>Y<sub>0</sub>Z<sub>0</sub>*, пов'язаних з інерційним простором. У разі постійності кутової швидкості обертання Землі співвідношення між рухомою та інерційною системами координат можна було б задати одним параметром – кутом повороту, як функцією часу, але суттєвим ускладненням є нестабільність кутової швидкості обертання Землі. Зміни швидкості обертання Землі пов'язані з гравітаційною дією Місяця, Сонця, планет, а також переміщеннями речовин у різних частинах планети й іншими збурювальними механізмами. Через непостійність параметрів обертання Землі, співвідношення між рухомою й інерційною системою координат задається матрицями обертання.

Класичний моніторинг обертання Землі розглядає окремо рух осі обертання в Землі й у просторі. Для цього визначаються *параметри орієнтування Землі*:

- *всесвітній час UT* як фаза повороту Землі (звичайно *UT* представляється у вигляді різниці *UT–UTC*);
- *координати полюсів X, Y*;

- параметри прецесії і нутації, що задаються моделями МАС 1976 і 1980 рр. або більш пізніми моделями МАС 2000 р. та поправки до них  $d(D_y)$  і  $d(D_e)$ , одержувані зі спостережень;
- ексцес тривалості доби (як різниця між тривалістю доби, визначеною з астрономічних спостережень, і числом секунд у добі) або модуль швидкості обертання Землі  $w$ .

### 5.3. Системи відліку часу в супутникових радіонавігаційних системах

СРНС є просторово-часовою системою, що розташована в земному і навколосемному просторі. Чітка синхронізація всіх підсистем і елементів СРНС необхідна для можливості використання далекомірних методів вимірювання. Застосування пасивних (беззапитових) далекомірних методів має на увазі взаємну синхронізацію по часу випромінювання всіх НКА. При цьому всі компоненти СРНС повинні використовувати єдину шкалу часу. Для синхронізації процесів і підсистем у СРНС її функціонування здійснюється у власній системі часу, що називається відповідно ***GPS Time (GPST)*** і ***Системна шкала часу ГЛОНАСС***.

Нуль-пункт шкали *GPST* був суміщений зі шкалою часу *UTC* у 00:00:00 6 січня 1980 року, проте відмінності між *GPST* і *UTC* визначають розбіжності цих шкал часу. По-перше, *GPST* визначається в реальному часі, а по-друге, це шкала безперервного часу, в ній ігноруються стрибки секунд. Час *GPST регулюється так, щоб залишатися з часом UTC у межах 1 мкс* (без урахування стрибків секунд). Насправді, останніми роками час *GPST* підтримується в межах 10 нс від *UTC*. У результаті *GPST відрізняється від UTC на ціле число секунд* (на сьогодні 14 секунд) плюс частки мікросекунди. У СРНС розглядаються два аспекти часу: епоха й інтервал. ***Епоха*** визначає момент події, а ***інтервал*** – час між двома епохами, виміряний в одиницях деякої відповідної шкали часу. Епоха часу в *GPST* визначається через номер тижня *GPS* і номер секунди в тижні. *Наприклад, 1552:503887 – 1552 тиждень 503887 секунда. Кількість тижнів збільшується на 1, коли на лічильнику секунд досягається значення 604 800.*

Час *GPST* визначається на основі вимірювань від набору цезієвих і рубідієвих стандартів частоти, що знаходяться на бортах НКА, і водневих стандартів частоти наземного командного ком-

плексу. За допомогою високостабільних стандартів частоти і часу в СРНС прагнуть досягнути чіткої синхронізації шкал часу всіх елементів системи. Але на практиці виконати це неможливо, що спричинило появу механізмів періодичної синхронізації шкал часу. Залежно від сегмента, в елементах якого встановлено генератор частоти і часу, в СРНС розрізняють такі шкали часу:

- системна шкала часу (СШЧ) використовується СРНС як еталонна шкала – відносна нестабільність системної шкали часу обумовлена нестабільністю стандарту частоти наземного комплексу управління і становить  $1 \cdot 10^{-14}$  секунди;
- бортова шкала часу (БШЧ) – обумовлена стандартом частоти НКА, відносна нестабільність якої становить  $1 \cdot 10^{-13}$  секунди;
- шкала часу споживача (ШЧС) – обумовлена стандартом часу навігаційного приймача.

Відносна нестабільність частоти є однією з основних характеристик хронізаторів і визначається як:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{|f - f_0|}{f_0},$$

де  $\Delta f$  – абсолютна нестабільність, Гц;  $f$  – дійсне значення частоти, Гц;  $f_0$  – еталонне значення частоти генератора, Гц.

СШЧ використовується для часової ув'язки всіх процесів у СРНС. БШЧ використовується для часового прив'язування навігаційного повідомлення. ШЧС підтримується кварцовим стандартом частоти навігаційного приймача, має найбільшу відносну нестабільність частоти, характеризується найбільшим зсувом відносно СШЧ і БШЧ, а також невизначеним початковим значенням у момент увімкнення навігаційного приймача.

### ***5.3.1. Синхронізація бортових шкал часу***

Синхронізація БШЧ здійснюється за допомогою звіряння їх зсуву щодо СШЧ з подальшою відповідною корекцією (введенням часової поправки).

Звіряння бортового часу здійснюється через приймання КВС навігаційних сигналів, випромінюваних НКА, і обчислення значення БШЧ на момент випромінювання сигналу конкретного НКА  $t_{\text{БШЧ}}$ .

$$t_{\text{БШЧ}} = t_{\text{БШЧ}}^{\text{прм}} - (\Delta t_{\text{п}} + \Delta t_{\text{р.е.}} + \Delta t_{\text{атм}} + \Delta t_{\text{ап}}),$$

де  $t_{\text{БШЧ}}^{\text{прм}}$  – значення часу в момент прийому сигналу;  $\Delta t_{\text{п}}$  – час поширення радіосигналу від фазового центра антени передавача до фазового центра антени приймача ( $\Delta t_{\text{п}}$  визначається відстанню між фазовими центрами антен НКА і КВС та швидкістю поширення радіохвилі);  $\Delta t_{\text{р.е.}}$  – похибка, що визначається релятивістськими ефектами (уповільненням часу для рухомих систем відліку, впливом гравітаційного потенціалу тощо; моделі взаємного руху НКА і КВС дозволяють обчислити  $\Delta t_{\text{р.е.}}$  з точністю до наносекунд);  $\Delta t_{\text{атм}}$  – похибка часу, що визначається явищем рефракції радіохвиль в атмосфері;  $\Delta t_{\text{ап}}$  – апаратні і методологічні похибки.

Розрізняють *активний (запитовий)* і *пасивний (беззапитовий)* методи звіряння часу БШЧ. Пасивний метод ґрунтується на фіксуванні у КВС значення БШЧ у довільний момент часу. Активний метод більш простий і дозволяє одержувати більш точні результати, але вимагає застосування додаткової апаратури. Для обох методів здійснюється обчислення поправок за траєкторними даними, станом іоносфери і тропосфери на трасі поширення радіосигналу. Після проведення серії вимірів застосовуються статистичні методи для одержання оцінки розходження СШЧ і БШЧ. Нині система ГЛОНАСС використовує активний метод, а GPS – пасивний.

Безпосереднє корегування БШЧ здійснюється у разі перевищення деякої допустимої похибки. Суміщення СШЧ і БШЧ здійснюється через завантаження в бортову ЕОМ певних частотно-часових поправок. Фазування шкал часу забезпечує точність суміщення до декількох десятків наносекунд.

Тривале спостереження за БШЧ дозволяє виявити закономірності в їх зсуві і здійснювати прогнозування зсуву на певні моменти часу. Корегування часу БШЧ на основі прогнозів і завантаження алгоритмів внесення поправок до БШЧ називається *алгоритмічною корекцією*.

Крім внутрішньосистемної синхронізації, наземним комплексом управління здійснюється прив'язування системного часу до загальноживаної системи часу *UTC*.

### **5.3.2. Синхронізація шкал часу споживачів**

Апаратура споживачів не має атомних стандартів частоти і часу, оскільки їх встановлення зробило б навігаційні приймачі надзвичайно дорогими та небезпечними. Приймачі обладнуються кварцовими стандартами частоти, нестабільність яких на декілька порядків вище, ніж у БШЧ. Синхронізація ШЧС відносно БШЧ і СШЧ здійснюється за допомогою навігаційних радіосигналів НКА. При цьому синхронізація здійснюється декількома способами, а саме:

- використанням міток часу навігаційного повідомлення;
- використанням далекомірних кодів навігаційного сигналу;
- обчисленням поправки на підставі псевдодалекомірних вимірювань.

Сутність використання міток часу навігаційного сигналу ґрунтується на тому, що дані про поточний супутниковий час (мітка часу супутника) і про прогноз відходу бортової шкали часу в опорні моменти часу передаються споживачам у навігаційному повідомленні. Точність прив'язування в цьому випадку визначається невизначеністю знання дальності від супутника до споживача.

Спосіб використання далекомірних кодів навігаційного сигналу аналогічний попередньому і відрізняється в основному видом інформації, що використовується в сигналі навігаційного супутника.

Сутність обчислення поправки на підставі псевдодалекомірних вимірювань зображена на рис. 5.3. У разі розсинхронізації шкал часу БШЧ і ШЧС обчислення дальності до супутників здійснюється з певною похибкою. При цьому поверхня положення об'єкта навігації не збігається з істиною поверхнею положення (рис 5.3, *a*), що залежить від розбіжності шкал часу.

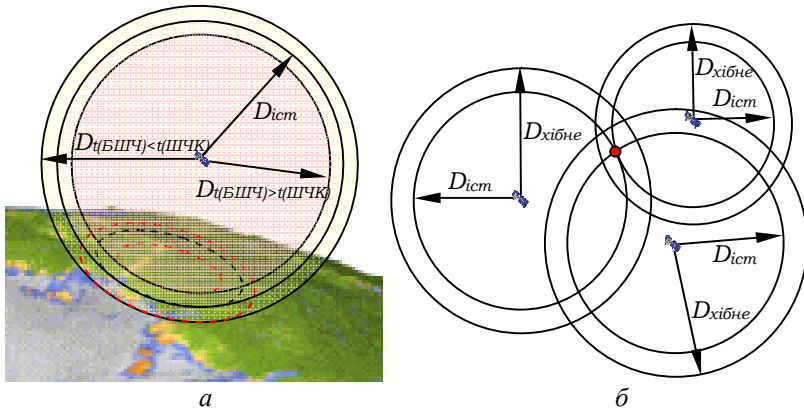


Рис. 5.3. Обчислення поправки на підставі псевдодалекомірних вимірювань

Проведення серії вимірювань до супутникового сузір'я не дасть шукану точку позиціонування, як перетин поверхонь положення (рис. 5.3, б). При отриманні такого розв'язку навігаційної задачі, ЕОМ навігаційного приймача починає ітераційну процедуру послідовного додавання (віднімання) часу до здійснених вимірювань, яка виконується доти, поки поверхні положення не будуть зведені до однієї точки. Одержана точка є точкою позиціонування об'єкта навігації. Обчислена часова поправка вноситься до ШЧС і, відповідно, ШЧС зрівнюється з БШЧ. Цей спосіб має найбільше поширення і забезпечує точність часових вимірювань на рівні 1 мкс.

### Питання для самоконтролю:

1. Яка функція часу при розв'язуванні навігаційних задач?
2. Яким чином впливають на системний час процеси прецесії і нутації?
3. В яких одиницях вимірюється астрономічний час?
4. Чим обумовлена необхідність корегування всесвітньої системи часу?
5. Якими параметрами задається співвідношення між рухомою та інерційною системами координат?
6. Як здійснюється розрахунок системного часу в СРНС?
7. Чим пояснюється необхідність постійного контролю БШЧ?
8. Поясніть процедуру зрівнювання ШЧС і СШЧ способом обчислення поправки на основі псевдодалекомірних вимірювань.



## Розділ 6. НАВІГАЦІЙНІ РАДІОСИГНАЛИ І ПОВІДОМЛЕННЯ

*Радіосигнали в СРНС мають одне з визначальних значень для функціонування всієї системи загалом. Основним призначенням радіосигналів у СРНС є розв'язування навігаційних задач, керування космічним сегментом, забезпечення необхідної точності позиціонування. В основу позиціонування об'єктів навігації покладено принцип координатних визначень за даними, одержаними з навігаційних радіосигналів, випромінюваних НКА в беззапитовому режимі. Структура навігаційних сигналів є достатньо складною, що необхідно для забезпечення множини вимог до СРНС, а саме одночасного приймання сигналу від множини «видимих» НКА, диференціювання послуг для різних груп споживачів, стійкості до зовнішнього небажаного впливу, забезпечення заданої точності та надійності координатних визначень тощо.*

### **6.1. Радіосигнали в супутникових радіонавігаційних системах**

#### ***6.1.1. Загальні поняття про навігаційні радіосигнали***

За допомогою радіосигналів у СРНС розв'язують дві основні групи задач:

- забезпечення нормального режиму функціонування СРНС;
- розв'язування навігаційних задач.

Координатне визначення об'єктів навігації передбачає розв'язування багатьох частинних задач:

- обслуговування необмеженої кількості як військових, так і цивільних споживачів;
- надання можливості проведення одночасних вимірів від декількох НКА;
- забезпечення точних, однозначних вимірів дальностей у реальному часі;
- передача навігаційного повідомлення;
- забезпечення точних вимірів доплерівського зсуву<sup>12</sup> частоти;
- забезпечення точних вимірів фази несучої сигналу;
- виправлення іоносферної затримки радіосигналу.

---

<sup>12</sup> *Доплерівській зсув* – зсув частоти радіохвилі залежно від відносної швидкості між джерелом радіосигналу і приймачем радіосигналу.

Електромагнітна хвиля в загальному випадку характеризується чотирма електричними параметрами: **амплітудою**<sup>13</sup>, **частотою**<sup>14</sup>, **фазою**<sup>15</sup> і **поляризацією**<sup>16</sup>. Якщо один з цих параметрів змінюється деяким контрольованим способом або модулюється, тоді електромагнітна хвиля може нести інформацію. У простішому випадку радіохвиля являє собою гармонійне коливання вигляду:

$$A(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0),$$

де  $A$  – амплітуда сигналу;  $\omega$  – кутова частота сигналу;  $t$  – час;  $\varphi_0$  – початкова фаза сигналу. Ці величини ув'язані співвідношеннями:

$$\omega = 2\pi f; \varphi(t) = (\omega t + \varphi_0); f = 1/T; \lambda = cT = c/f,$$

де  $f$  – частота сигналу;  $\varphi(t)$  – миттєва фаза сигналу;  $T$  – період сигналу;  $\lambda$  – довжина хвилі;  $c$  – швидкість світла.

Умови поширення радіохвиль у просторі, технічні можливості їх генерування та приймання залежать від частоти (довжини) радіохвилі (табл. 6.1).

Таблиця 6.1

*Розподіл радіохвиль за піддіапазонами*

| Діапазон хвиль           | Довжина хвилі | Частота      |
|--------------------------|---------------|--------------|
| Наддовгі                 | >10 км        | <30 кГц      |
| Довгі                    | 1-10 км       | 300-30 кГц   |
| Середні                  | 100-1000 м    | 3-0,3 МГц    |
| Короткі                  | 10-100 м      | 30-3 МГц     |
| УКХ-метрові              | 1-10 м        | 300-30 МГц   |
| УКХ-дециметрові          | 1-10 дм       | 3000-300 МГц |
| УКХ-сантиметрові         | 1-10 см       | 30-3 ГГц     |
| Міліметрові              | 1-10 мм       | 300-30 ГГц   |
| Субміліметрові           | 0,1-1 мм      | 300-3000 ГГц |
| Інфрачервоні та світлові | <0,1 мм       | >3000 ГГц    |

<sup>13</sup> *Амплітуда коливань* – найбільше відхилення (від нульового) значення величини, що скоює коливання.

<sup>14</sup> *Частота коливань* – кількісна характеристика періодичного коливального процесу, яка дорівнює числу повних коливань, здійснених за одиницю часу.

<sup>15</sup> *Фаза коливань* – фізична величина, що визначає при заданій амплітуді стан коливальної системи у будь-який момент часу. Фаза коливань виражається в кутових одиницях або частках періоду коливань.

<sup>16</sup> *Поляризація* – для електромагнітних хвиль – напрям коливань вектора електромагнітної індукції  $E$ .

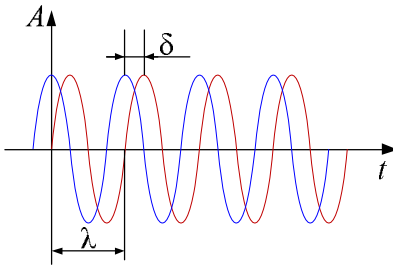


Рис. 6.1. Когерентність радіохвиль

У СРНС використовуються **когерентні** радіохвилі, тобто радіохвилі однакової частоти, які зберігають постійність різності фаз (рис. 6.1:  $\delta$  – постійний зсув фаз між когерентними хвилями з довжиною  $\lambda$ ).

Вектор електромагнітної індукції напруженості поля визначає поляризацію хвилі, і,

якщо він знаходиться в одній площині, має місце **лінійна поляризація** (рис. 6.2).

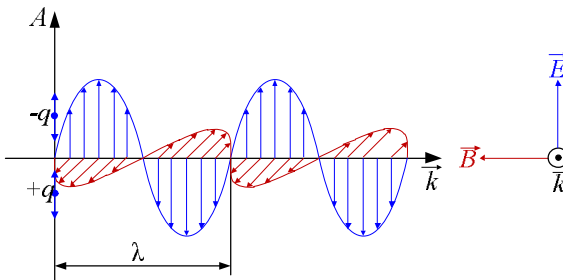
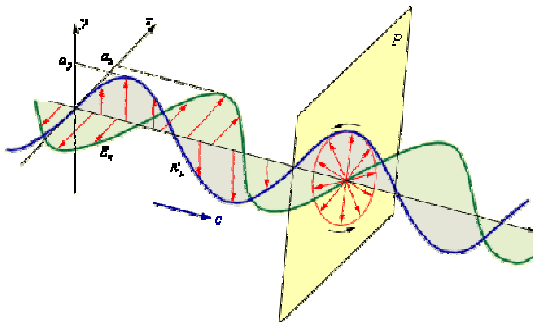


Рис. 6.2. Лінійна поляризація сигналу

При додаванні двох лінійно-поляризованих когерентних сигналів взаємно перпендикулярних коливань утворюється еліптично-поляризована хвиля (рис. 6.3, *a*), а якщо амплітуди коливань рівні і зсув по фазі між ними становить  $\pi/2$ , то має місце сигнал з круговою поляризацією.



*a*

Рис. 6.3. Кругова поляризація сигналу

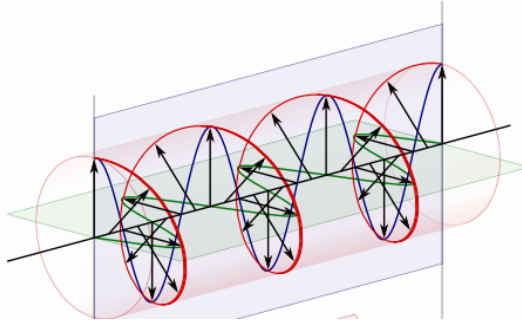


Рис. 6.3. Закінчення (див. також с. 103)

У СРНС GPS і ГЛОНАСС використовуються сигнали з круговою правобічною поляризацією (рис. 6.3, б).

### 6.1.2. Розширення спектра навігаційного радіосигналу

Навігаційні параметри СРНС визначаються через один або декілька параметрів радіосигналів, які формуються і передаються НКА. Від точності виміру параметрів радіосигналів залежить точність отримання двох основних навігаційних параметрів – дальності і радіальної швидкості.

У вищезазначених СРНС (GPS і ГЛОНАСС) використовуються сигнали з розширеним спектром – сигнали, в яких база сигналу<sup>17</sup>  $B \gg 1$ . Під **розширенням спектра** розуміється навмисне цілеспрямоване збільшення ширини полоси частот, яку займає сигнал, у порівнянні з тією, що необхідна для передачі інформації при заданих швидкостях і енергетичних витратах.

Для розширення спектра в СРНС використовують безпосередню модуляцію несучої двійкової псевдовипадкової послідовності (ПВП) (або псевдовипадкове перестроювання фази сигналу).

**Псевдовипадкова послідовність** – **послідовність чисел, яка була обчислена за деяким певним арифметичним правилом, але має усі властивості випадкової послідовності чисел у межах задачі, яка розв’язується.**

<sup>17</sup> **База сигналу** – це добуток ефективного значення тривалості сигналу  $\tau_s$  та ефективного значення ширини його спектра  $\Delta f$ . У простих випадках за ефективну ширину спектра можна прийняти ширину головної пелюстки спектра. Тривалість сигналу і ширина його спектра підпорядковуються співвідношенням невизначеності, що свідчать про те, що база сигналу не може бути менше одиниці. Обмежень на максимальне значення бази сигналу немає. Тобто короткий сигнал з вузьким спектром існувати не може, а нескінченний сигнал з широким спектром – може (так званий широкосмуговий сигнал, сигнал з великою базою) [17].

Розширення спектра сигналу в декілька сотень (тисяч) разів призводить до того, що енергетичний спектр такого сигналу нижче рівня білого (гауссівського) шуму, тому такі сигнали прийнято називати фазоманіпульованими шумоподібними сигналами (ФМ-ШПС).

Формування ФМ-ШПС здійснюється через множення несучої радіосигналу на ПВП, тактова частота якої набагато більше, ніж ширина полоси частот, що займає інформаційний сигнал (рис. 6.4). Для формування ПВП інформаційний сигнал тривалістю  $\tau_s$  поділяється на  $N$  елементів тривалістю  $\tau_N = \tau_s / N$ . При цьому база сигналу становить  $B = \tau_s / \tau_N = N$ , тобто еквівалентна ширина спектра сигналу  $\Delta f$  розширюється в  $N$  разів. Параметри розширення ФМ-ШПС радіонавігаційних сигналів стандартної точності СРНС наведені в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Параметри розширення сигналів СРНС

| СРНС    | $\tau_N$ , мкс | $\tau_s$ , мс | $B$             |
|---------|----------------|---------------|-----------------|
| GPS     | 1              | 20            | $2 \times 10^4$ |
| ГЛОНАСС | 2              | 20            | $1 \times 10^4$ |

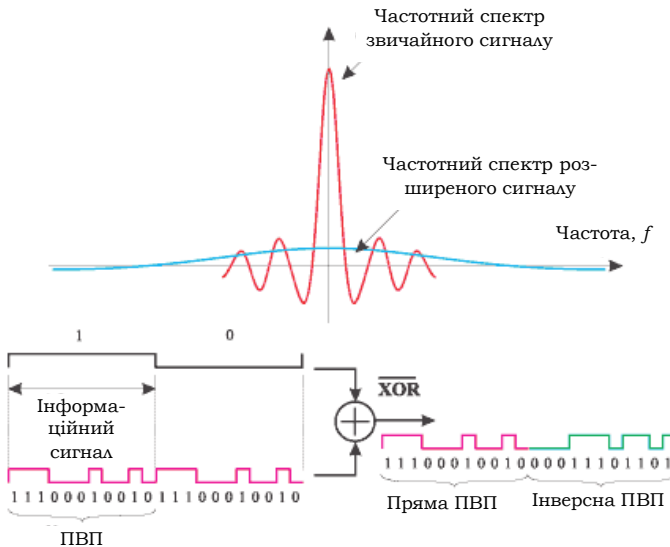


Рис. 6.4. Формування ФМ-ШПС

Перевагами сигналів з розширенням спектра, у порівнянні зі звичайними сигналами, є їх підвищена завадозахищеність і прихованість. У СРНС, крім того, ФМ-ШПС сигнали дозволяють підвищити точність виміру часової затримки сигналу та доплерівського зсуву частоти. Точність виміру параметрів навігаційного радіосигналу залежить від мінімальних середньоквадратичних похибок оцінки сигналу під час його приймання на фоні некорельованого гауссівського шуму з односторонньою спектральною щільністю  $N_0$ . Середньоквадратичні похибки часової затримки сигналу і доплерівського зсуву частоти при цьому визначаються, відповідно, як:

$$\sigma_{\tau} = \frac{1}{q\beta}; \quad \sigma_f = \frac{1}{q\alpha},$$

де  $q = \frac{E}{N_0}$  – відношення сигнал/шум,  $E = \int_0^T S^2(t) dt$  – енергія сигналу  $S(t)$  за час спостереження  $T$ ;  $\beta = \sqrt{\frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} (2\pi f)^2 |G^2(f)| df}$

– ефективна ширина спектра сигналу,  $G(t) = \int_0^T S(t) e^{-i2\pi f t} dt$  – спектральна щільність потужності сигналу,  $S(t)$  – випадковий сигнал на вході приймача без урахування адитивних завад;

$\alpha = \sqrt{\frac{1}{E} \int_0^T (2\pi f)^2 S^2(t) dt}$  – ефективна тривалість сигналів.

Отже, підвищення точності виміру затримки сигналу потребує розширення його спектра  $\beta$  (і, відповідно, зменшення тривалості  $\tau_s$ ), а визначення доплерівського зсуву – збільшення тривалості  $\alpha$ . Відповідно до означення, ефективна ширина спектра й ефективна тривалість сигналу складають базу сигналу. Для звичайних сигналів, в яких  $B = 1$ , виконання зазначених умов неможливе, але вони виконуються у сигналах з розширеною базою.

### 6.1.3. Принципи формування кодових послідовностей

Основним призначенням кодових послідовностей у процесі розв'язування навігаційних задач є розширення спектра сигналу і підвищення точності кодових далекомірних вимірів.

Принцип формування ПВП (наприклад, у системі GPS) полягає у формуванні кодованого сигналу на основі використання опорного колювання генерованих задаючим генератором, частота якого (10,23 МГц – GPS і 5,11 МГц – ГЛОНАСС) піддається 10-кратному діленню. Утворюювана послідовність загострених імпульсів надходить на стрічковий реєстр зсуву зі зворотними зв'язками.

Реєстр зсуву (рис. 6.5) являє собою набір послідовно сполучених між собою однобітових логічний елементів пам'яті (тригерів). Початковим станом встановлюється логічна одиниця на всіх виходах реєстра. При появі на вході реєстра імпульсу (логічної одиниці) кодова послідовність, що зберігається в пам'яті елементів зсувного реєстру, зсувається на один біт у напрямку до виходу. Зворотні зв'язки відповідно до певного алгоритму, заданого поліномом, додатково змінюватимуть стан вхідного елемента пам'яті.

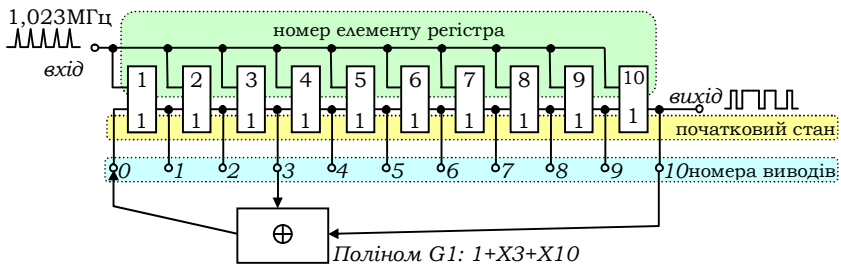


Рис. 6.5. Формування кодової послідовності стандартної точності в першому реєстрі зсуву НКА GPS

Повна кодова послідовність для коду стандартної точності складається з 1023 біт, тривалість якої одна мілісекунда. Формування відкритого коду здійснюється двома десятиелементними реєстрами зсуву. Перший реєстр (рис. 6.5) формує однакові кодові послідовності для всіх НКА. Послідовності формуються через подачу сигналу до суматора по зворотному зв'язку з 3 і 10 елементів. Бінарний суматор формує «1» при однакових отриманих сигналах, і «0» при різних отриманих сигналах. Для кожного НКА GPS формується свій ПВП код за рахунок відмінності поліномів (зворотних зв'язків) у другому реєстрі зсуву (рис. 6.6).

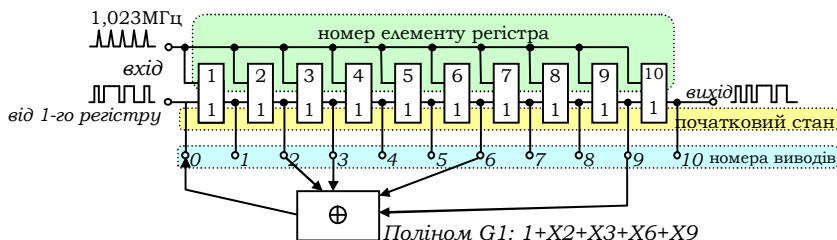


Рис. 6.6. Формування індивідуальної кодової послідовності стандартної точності для НКА GPS

Формування високоточного (Р-коду для GPS) ґрунтується на аналогічних принципах за винятком того, що замість двох використовуються чотири дванадцятирозрядних регістри зсуву. Ці регістри об'єднуються попарно, утворюючи послідовності, що містять відповідно до 15 345 000 і 15 345 037 елементарних послілок. Дві сформовані послідовності об'єднуються між собою з введенням 37 різних затримок з метою формування 37 різних одностижневих частин Р-коду, кожна з яких характерна тільки для одного конкретного супутника. На відміну від коду стандартної точності, тривалість елементарної послілки дорівнює приблизно 0,1 мкс, а період повторення усієї кодової послідовності близько 266 діб. Використання в GPS подібного принципу формування високоточного коду забезпечує високу захищеність від його несанкціонованого використання споживачами.

У системі ГЛОНАСС застосовується аналогічний метод формування кодових сигналів. Під час формування кодових послідовностей використовуються 9-розрядні регістри зсуву. Коди в ГЛОНАСС ґрунтуються на використанні М-послідовності, яка стосовно відкритого коду описується поліномом  $1 + X^5 + X^9$ , тобто для організації зворотного зв'язку в стрічковому регістрі зсуву використовуються виходи з 5 і з 9 розряду регістра. Для всіх НКА ГЛОНАСС використовується єдиний код. Тактові частоти для стандартних і високоточних кодів у системі ГЛОНАСС дорівнюють 0,511 МГц для високоточного коду і 5,11 МГц для коду стандартної точності. Зменшення в 2 рази значень цих частот, порівняно з відповідними тактовими частотами, вживаними в GPS, обумовлює зниження потенційної точності далекомірних вимірів, заснованих на використанні відповідних кодових сигналів.



#### 6.1.4. Модуляція сигналу

Радіосигнал у СРНС є основою для виміру навігаційних параметрів. Характеристики радіосигналу повинні дозволяти здійснювати далекомірні і доплерівські виміри, а також бути носієм навігаційного повідомлення НКА. Для передачі інформації необхідно, щоб радіосигнали мали два види параметрів:

- параметри селекції – параметри, які дозволяють визначити сигнал на фоні інших сигналів і завад;
- інформаційні параметри – параметри, які дозволяють переносити певні дані.

Процес формування інформаційних параметрів радіосигналу має назву **модуляція** – зміна одного або декількох параметрів високочастотних коливань (амплітуда, фаза, частота) відповідно до параметрів інформаційного сигналу.

У випадку, якщо інформаційний сигнал є дискретним, процес модуляції високочастотних коливань називають **маніпуляцією**.

Під час приймання фазоманіпульованого (ФМ) радіосигналу в приймачі здійснюється процедура **демодуляції** – виділення первинного низькочастотного сигналу (кодової послідовності «0» і «1») з високочастотного коливання.

У СРНС вся інформація навігаційного повідомлення перетворюється в послідовність «0» і «1», перемножується на псевдовипадкову кодову послідовність, якою в подальшому здійснюється модуляція високочастотної несучої. Варто зауважити, що спектр фазоманіпульованого сигналу теоретично нескінченний (містить безліч частот, які мають назву гармонік) і має достатньо складну форму.

Фазоманіпульований сигнал являє собою послідовність радіоімпульсів, початкові фази яких мають дискретні значення, які змінюються відповідно до первинного низькочастотного сигналу (рис. 6.7).

У випадку, якщо первинний сигнал є бінарною послідовністю, фаза маніпульованого коливання змінюється на  $\pi$  ( $180^\circ$ ), причому фаза сигналу змінюється у разі зміни полярності посилки. Фазова маніпуляція може здійснюватися з розривом фази або без розриву фази. Проблемним для застосування фазової маніпуляції у СРНС є необхідність початкового визначення логічного рівня вихідної посилки («1» або «0»), інакше в подальшому ви-

значити полярність первинної посліжки неможливо, до того ж зрив зв'язку, обумовлений, наприклад, імпульсною (і, відповідно, широкосмуговою) завадою, призведе до зриву синхронізації в радіоканалі (відліку полярності посліжок) і необхідності визначення полярності початкової посліжки.

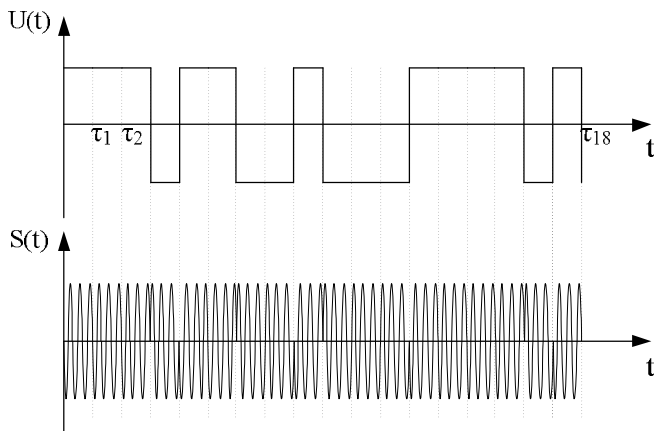


Рис. 6.7. Фазова маніпуляція первинного бінарного сигналу

З метою підвищення завадозахищеності сигналу в СРНС використовується відносна фазова маніпуляція, за якої фаза сигналу змінюється при кожній посліжці високого рівня (рис. 6.8).

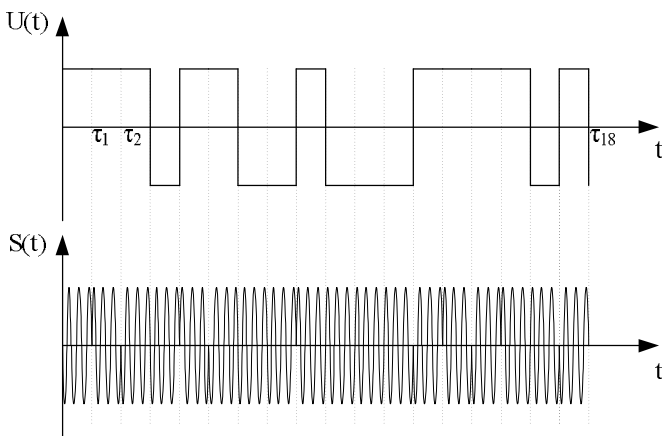


Рис. 6.8. Відносна фазова маніпуляція первинного бінарного сигналу

При цьому, знаючи довжину імпульсу, не виникає проблем з визначенням полярності посилок під час приймання сигналу, при цьому зрив зв'язку впливатиме тільки на ті посилки, які передавалися одночасно з завадою.

## **6.2. Характеристики навігаційних радіосигналів супутникових радіонавігаційних систем**

Радіонавігаційний сигнал обох систем містить такі інформаційні компоненти, які використовуються у процесі вимірювання навігаційних параметрів:

- далекомірні коди;
- навігаційні повідомлення;
- миттєва фаза несучої частоти сигналу.

Далекомірні компоненти навігаційного радіосигналу формують завдяки модуляції високочастотної несучої ПВП кодами двох типів – високоточного коду і коду стандартної точності. Крім кодів, навігаційний супутник регулярно передає навігаційне повідомлення, яке містить додаткові відомості. Споживач інформується про стан супутника і його параметри – системний час, ефемериди (набір параметрів, що точно описують орбіту руху навігаційного супутника), прогноз іоносферної затримки, показники працездатності. Миттєва фаза сигналу забезпечує найбільш точні координатні визначення, точність яких сягає міліметрового діапазону. Для надійності і точності позиціонування навігаційний радіосигнал передають на декількох частотах.

### **6.2.1. Частотні присвоєння навігаційних радіосигналів**

Навігаційний радіосигнал є багатокomпонентним фазоманіпульованим сигналом. Формування навігаційних радіосигналів здійснюється безпосередньо в радіопередавачах НКА СРНС. На момент створення систем (як GPS, так і ГЛОНАСС) передбачалося, що передача навігаційних повідомлень буде здійснюватись на двох частотах, при цьому піддіапазони несучих частот в обох СРНС прийнято позначати **L1** і **L2** (від англ. link – зв'язок).

Також при створенні системи ставилось завдання забезпечення *багатостанційного доступу* – принципової можливості навігаційного приймача одночасно приймати та розпізнавати сигнали від декількох НКА. У СРНС GPS для виділення сигналів різних

НКА застосовують метод кодового розділення сигналу (*CDMA*<sup>18</sup>), в ГЛОНАСС – частотного розділення (*FDMA*<sup>19</sup>).

Принципова відмінність розділення каналів наведена на рис. 6.9. Для всіх НКА GPS призначається одна несуча частота для кожного L-піддіапазону, у СРНС ГЛОНАСС визначається частотний діапазон, в якому різні НКА займають окремі частотні канали.

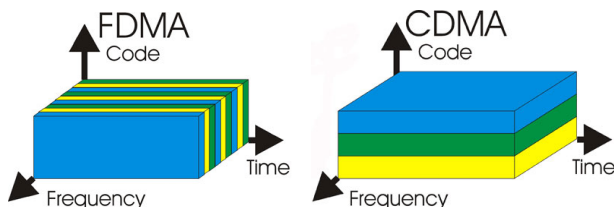


Рис. 6.9. Ущільнення частотного спектра методами *FDMA* і *CDMA*

Частотні характеристики навігаційних сигналів СРНС GPS і ГЛОНАСС наведені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3

*Характеристики навігаційних сигналів*

| Параметр                  | GPS                | ГЛОНАСС            |
|---------------------------|--------------------|--------------------|
| Несуча частота L1, МГц    | 1572,42            | 1598,06 – 1605,38  |
| Несуча частота L2, МГц    | 1227,6             | 1242,94 – 1248,62  |
| Несуча частота L5, МГц    | 1176,45            | 1176,45            |
| Метод розділення сигналів | CDMA               | FDMA               |
| Поляризація               | Кругова правобічна | Кругова правобічна |

У НКА GPS еталонний генератор генерує основну частоту  $f_0 = 10,23$  МГц, з якої процедурою множення формуються інші частоти ( $f_{L1} = 154f_0$ ,  $f_{L2} = 120f_0$ ,  $f_{L5} = 115f_0$ ). Тобто кожний НКА GPS передає на тій же самій частоті, але для виділення свого навігаційного радіосигналу каналів використовує власну псевдовипадкову послідовність.

<sup>18</sup> *CDMA* (англ. Code Division Multiple Access – множинний доступ з кодовим розділенням каналів) – метод множинного доступу, який ґрунтується на використанні сигналів з розширенням спектра та одночасним передаванням великої кількості сигналів у спільній смузі частот. При цьому кожному абонентові доступний будь-який канал, оскільки відсутнє жорстке закріплення каналів і їх розподіл здійснюється за видом кодових послідовностей, які надходять від кожного абонента [3].

<sup>19</sup> *FDMA* (англ. Frequency Division Multiple Access – множинний доступ з частотним розділенням каналів) – метод множинного доступу, за яким кожному користувачеві на час сеансу зв’язку із загального обмеженого частотного ресурсу виділяється окрема смуга частот (частотний канал) [3].

Генератори НКА ГЛОНАСС формують еталонну основну частоту  $f_0 = 5,11$  МГц, з якої формуються середні частоти для діапазонів L1 і L2 –  $f_{L1} = 1602$  МГц,  $f_{L2} = 1246$  МГц. Кожний супутник працює у власному частотному діапазоні. Приймач ГЛОНАСС розрізняє сигнали окремих супутників у загальному вхідному сигналі від усіх видимих супутників за допомогою призначення каналам стеження різних частот. Номінальна частота для кожного  $k$ -го супутника ГЛОНАСС призначається відповідно до виразів:

$$f_{L1}^k = f_{L1} + k\Delta f_1; f_{L2}^k = f_{L2} + k\Delta f_2, \Delta f_1 = 0,5625 \text{ МГц}, \\ \Delta f_2 = 0,4375 \text{ МГц}.$$

Між несучими частотами окремого НКА зберігається постійне співвідношення  $f_{L1}^k / f_{L2}^k = 9/7$ . Номери супутників  $k$  первинно розподілялися з 1 по 24, з 1998 року номери з 16 по 20 були виключені. Супутники, що знаходяться у протилежних півкулях, мають однакові номери частотних присвоєнь. Нині використовують номери частотних присвоєнь  $k = -7... + 6$ .

### **6.2.2. Формування сигналів у супутникових радіонавігаційних системах GPS**

У GPS системах високоточним кодом є  $P$ -код (*Precision – точний*, або *Protected – захищений*). У СРНС передбачений додатковий захист високоточного коду. До 2000 року GPS використовував режим селективного доступу SA (*Selectiv Avialability*), в якому з метою пониження точності позиціонування навмисно накладалися флуктуаційні завади на фазу далекомірного коду і вносилися певні похибки в ефемеридну інформацію. У разі виникнення національної небезпеки для США залишилась можливість регіонального введення режиму SA. Сучасним захистом високоточних сигналів GPS від несанкціонованого користування є режим додаткового шифрування AS (*Anti Spoofing*), коли  $P$ -код за допомогою нелінійної функції перетворюється в  $Y$ -код.

Подальша політика США передбачає розвиток заходів, спрямованих на запобігання використуванню системи GPS силами противника, так, щоб США і союзники зберігали військову пере-

вагу без порушення роботи цивільних споживачів GPS. Концепція застосування GPS з військовою метою має назву принципу «*three P*»:

- **Protection** – захист військових сил на театрі військових дій;
- **Prevention** – запобігання використуванню GPS супротивником;
- **Preservation** – збереження якості надання цивільних послуг GPS за межами театру військових дій.

Для успішного виконання принципу «трех П» військові повинні мати нагоду вибірково відключати сигнали GPS на певних територіях, на яких ці сигнали можуть бути використані для здійснення ворожих намірів, водночас авторизовані споживачі PPS сервісу (*Precise Positioning Service* – для військових та інших авторизованих споживачів) повинні без перешкод продовжувати військові операції. Спектральне розділення цивільного і військового сигналів є ключовим моментом, завдяки якому подібні функції можуть бути реалізовані. Результатом реалізації принципу «трех П» є введення нових військових кодів, званих у сукупності *M*-кодом, які використовуватимуть ті ж області спектра радіосигналу, які частково використовуються на частотах *L1* і *L2*. Новий військовий сигнал і структура коду доповнені криптографічним захистом і змінами у форматі повідомлень передавальних даних. Для забезпечення завадозахищеності сигналу, потужність випромінювання сигналу *M*-кодом збільшена на 20 dB (2138 dBW) у порівнянні з наявним *P(Y)*-кодом.

Використання коду стандартної точності надає послуги стандартного позиціонування (*SPS – Standard Positioning Service*) споживачам для цивільного, комерційного і наукового використання безперервно і на території всього світу без стягування прямої плати за використання сигналів СРНС.

У GPS системах кодом стандартної точності називають *C/A*-код (*Coarse Acquisition – зрубий; Clear Accessible – легкодоступний; Clear Acquisition – легкорозпізнаваний; Civil Application – цивільний*). Первинно *C/A*-кодом модулювали тільки несучу частоту діапазону *L1*, тобто несуча частота *L1* одночасно модулювалася як *P(Y)*-кодом, так і *C/A*-кодом (рис. 6.10). Для їх розділення фази модуляцій кодів зсунули на 90° відносно один одного. *P*-код є

двійковою псевдовипадковою послідовністю (ПСП) зі швидкістю 10,23 МБіт/с (тактова частота 10,23 МГц). С/А-код є ПВП завдовжки в 1 мс з тактовою частотою 1,023 МГц.

Обидві несучі модулюються також навігаційним повідомленням. Одночастотний режим передавання навігаційних сигналів з відкритим кодом підтримувався супутниками Block II, Block ІА і першими 12 супутниками Block ІІІ.

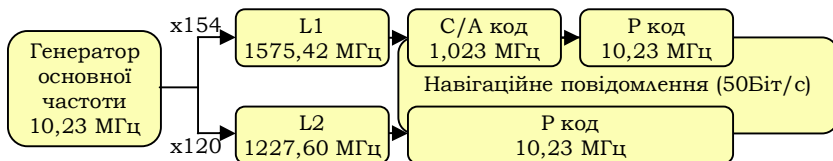


Рис. 6.10. Формування двочастотного сигналу з С/А- і Р-кодами

З 2005 року ВПС США впровадили цивільний код для несучої частоти L2, який отримав назву L2C. Супутники, що мають можливість передавати сигнал з кодом L2C, отримали назву Block ІІІ-М [18]. Схему формування сигналів зображено на рис. 6.11. L2C-код дає можливість приймачам визначати псевдодальності в ті моменти часу, коли не може цього зробити С/А-код, але при цьому все одно необхідно використання С/А-коду. В двочастотному приймачі сигнал спочатку може прийматися на частоті L1 С/А, потім, перемикаючись, він може відстежувати сигнал L2C з використанням системи фазового автопідлаштування частоти. Це дає сучасним L2C сигналам перевагу у відстеженні сигналу в порівнянні з L1 С/А-кодом. Для приймачів геодезичного класу точне визначення псевдодальностей спрощує процес визначення фазових неоднозначностей на несучій частоті.

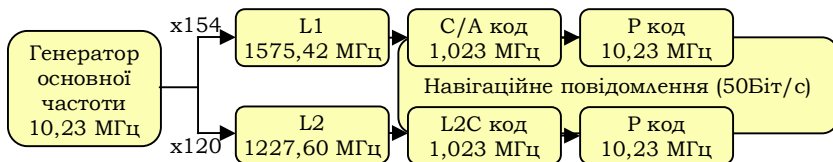


Рис. 6.11. Формування двочастотного сигналу з С/А-, L2C- і Р-кодами

Наступна модернізація сигналів пов'язана з введенням третього цивільного сигналу L5. Сигнал L5 передається на частоті 1176,45 МГц у діапазоні служб авіаційної радіонавігації (ARNS – Aeronautical Radionavigation Services). Розташування сигналу в діа-

пазоні ARNS необхідне для використання всіх доступних сигналів при забезпеченні безпеки польотів в авіації (існує потенційна небезпека внесення завад наземними радаром, що працюють на частотах, розташованих поряд з частотою L2). Потужність сигналу L5 більше на 6 dB, ніж сигналу L1 (2154 dBW і 2160 dBW відповідно). Сигнал L5 почав передаватися супутниками Block IIF. Формування трьох цивільних сигналів зображене на рис. 6.12.

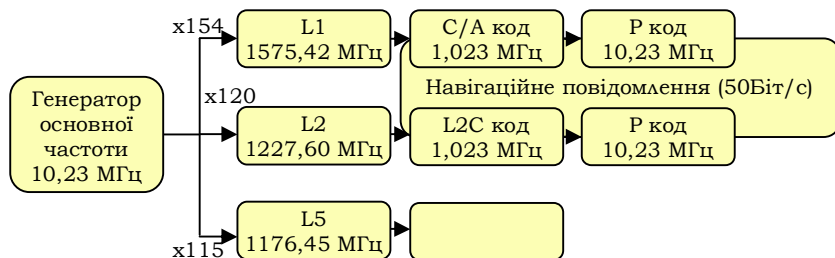


Рис. 6.12. Формування сигналу з C/A-, L2C- і P-кодами

Складова нового сигналу L5, в якій відсутні дані навігаційного повідомлення, дозволяє забезпечити найстійкіше відстеження фази несучої, необхідної для більшості додатків. Смуга пропускання передавального каналу  $\Delta f = 20$  МГц і висока швидкість передачі дозволяють досягти більш високої точності навіть за наявності шуму і перевідбиття. Частотний план сигналів GPS зображений на рис. 6.13.

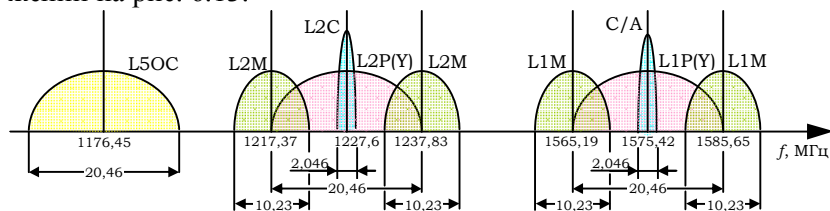


Рис. 6.13. Частотний план сигналів GPS

Для споживачів GPS, що працюють в автономному режимі в реальному масштабі часу (без використання диференційної корекції), додавання другого і третього цивільного сигналу забезпечує надмірність сигналів, поліпшує точність місцевизначення, доступність сигналу і його цілісність, продовжує час безперервної роботи і підвищує стійкість до радіочастотних (RF) завад. Також поліпшує роботу споживачів у додатках, пов'язаних з високоточ-



ними вимірюваннями (часто званими кінематикою у реальному часі – RTK) на довгих і коротких базових лініях, таких як забезпечення точного заходу літаків на посадку й автоматичне приземлення, картографування, геодезичні і геофізичні вимірювання, прецизійне фермерство і в багатьох інших сферах.

### 6.2.3. Навігаційне повідомлення GPS

Навігаційне повідомлення необхідне для передачі службової інформації, яка використовується під час розв'язування задач позиціонування.

Навігаційне повідомлення CPHC GPS містить у собі:

- інформацію про ефемериди НКА (для розрахунку їх поточних координат і складових швидкості);
- альманах сузір'я НКА (дані, що містять інформацію про функціональний стан всього космічного угруповання: функціональний стан супутників, зсув бортової шкали часу відносно системної шкали часу, параметри орбіт супутників, поправку GPST відносно UTC);
- частотно-часові поправки;
- мітки часу бортової шкали часу;
- параметри іоносферної моделі;
- відомості про працездатність бортової апаратури НКА тощо.

Навігаційне повідомлення, яке передається з кожного навігаційного супутника GPS, формується у вигляді суперкадру (рис. 6.14). Потік навігаційних даних передається зі швидкістю 50 біт/с. Тривалість інформаційного символу «0» або «1» дорівнює 20 мс.

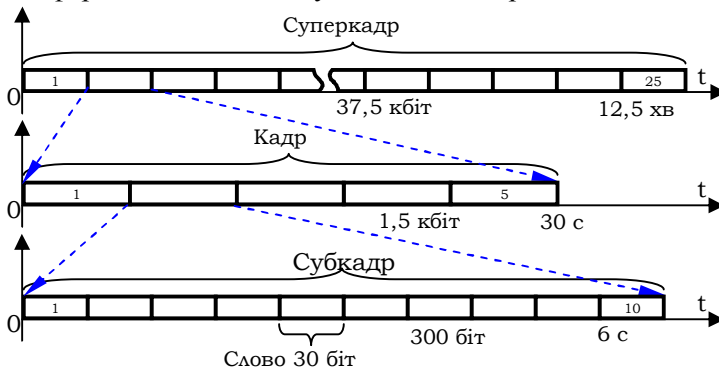


Рис. 6.14. Структура навігаційного повідомлення GPS

Все навігаційне повідомлення міститься в одному суперкадрі обсягом 37,5 кбіт, і передається протягом 12,5 хв. Суперкадр містить 25 кадрів по 1,5 кбіт тривалістю передачі 30 с. У свою чергу, кадр містить 5 субкадрів. Субкадри з першого по третій містять по 300 інформаційних символів тривалістю передачі 6 с. Кожний субкадр складається з 10 слів по 30 біт. Субкадри 4-й і 5-й містять по 25 сторінок. Кожна сторінка складається з 300 інформаційних символів (або розрядів), які також розділені на 10 слів по 30 символів у слові.

Таким чином, сформований суперкадр завжди містить 1, 2, 3 кадри, одну сторінку з субкадру 4 й одну сторінку з субкадру 5. Період повторення підкадрів 1–3 становить 30 с, періоди повторення сторінок з підкадрів 4 та 5 забирають більше часу, що обумовлено значимістю переданої інформації. Кожний з кадрів містить свою інформаційну складову навігаційного повідомлення. Розташування інформації у суперкадрі, що передається з навігаційного супутника GPS, наведено в табл. 6.4.

Таблиця 6.4

*Розташування інформації в суперкадрі навігаційного повідомлення GPS*

| <b>Зміст суперкадру</b> | <b>Зміст кадру</b> |           |  |
|-------------------------|--------------------|-----------|--|
| Кадр 1                  | Слово TLM          | Слово HOW | Номер тижня GPS, точність стану й параметри корекції часу супутника  |
| Кадр 2                  | Слово TLM          | Слово HOW | Інформація про ефемериди супутника   |
| Кадр 3                  | Слово TLM          | Слово HOW | Інформація про ефемериди супутника   |
| Кадр 4<br>(25 сторінок) | Слово TLM          | Слово HOW | Альманах і стан супутників з номерами 25–32, конфігурація супутників, стан іоносфери й всесвітня шкала часу (UTC), спеціальні повідомлення, резервні розряди |
| Кадр 5<br>(25 сторінок) | Слово TLM          | Слово HOW | Альманах і стан супутників з номерами 1–24, опорний час, номер тижня альманаху, резервні розряди   |

Формат повідомлень кадрів 1–3 і рядків (сторінок) кадрів 4 і 5 показаний у табл. 6.5.

Таблиця 6.5

## Формат субкадрів 1–5 GPS

| Усього 300 біт (старші розряди ліворуч, молодші – праворуч) |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |         |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| Слово 1   |         | Слово 2 |         | Слово 3 |         | Слово 4 |         | Слово 5 |         | Слово 6 |         | Слово 7 |         | Слово 8 |         | Слово 9 |         | Слово 10 |         |
| TLM   | P       | HOW     | P       |         | P       |         | P       |         | P       |         | P       |         | P       |         | P       |         | P       |          | P       |
| 1-24  | 6       | 1-24    | 6       | 1-24    | 6       | 1-24    | 6       | 1-24    | 6       | 1-24    | 6       | 1-24    | 6       | 1-24    | 6       | 1-24    | 6       | 1-24     | 6       |
| Розряди   | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди | Розряди  | Розряди |

Кожне слово субкадру (рядка, сторінки) кадрів 1–5 містить 30 символів (розрядів). Шість молодших розрядів кожного слова мають перевірочні символи для контролю й перевірки правильності переданої інформації (у табл. 6.4 показано, що після кожного слова включено 6 перевірочних бітів, які займають розряди 25–30 кожного слова). Інформація в субкадрі передається старшими розрядами вперед.

Кожний субкадр починається зі слів **TLM** (перше слово), **HOW** (друге слово). TLM (слово телеметрії) включає преамбулу (8 старших розрядів), телеметричне повідомлення для санкціонованих споживачів і два резервні розряди. HOW (слово передачі, ключ) містить 19 молодших розрядів 29-розрядного Z-відліку, три розряди (20, 21, 22) для ідентифікатора (ID) кадру (для 1, 2, 3, 4, 5 кадру ID набуває відповідно значення: 001, 010, 011, 100, 101), два розряди (23, 24) резервних.

Z-відлік позначає 1,5-секундну епоху (момент часу), яка формується НКА для точного відліку й прив'язування часу. Z-відлік надається споживачеві у вигляді 29-розрядного двійкового числа. Десять старших розрядів (MSB) Z-відліку є двійковим поданням послідовного номера поточного тижня. Відлік тижнів лежить у межах від 0 до 1023. Нульовий стан відповідає тому тижню, що починається з 1,5-секундної епохи в нульовій (приблизно) часовій точці всесвітнього часу (UTC). Після закінчення GPS-тижня з номером 1023 номер тижня скидається в нуль (0).

Дев'ятнадцять наступних розрядів Z-відліку, розташованих у слові HOW, визначаються як кількість 1,5-секундних інтервалів, відлічених від моменту переходу «кінець/початок» будь-якого тижня. Відлік лежить у межах від 0 до 403 199. Число 403 199 – кількість 1,5-секундних інтервалів у тижні (у 604 800 секундах).

Зміст і розташування інформації альманаху СРНС GPS наведено в табл. 6.6.

Таблиця 6.6

## Дані альманаху GPS

| № з/п   | Розташування інформації: слово, розряди | Символьне позначення               | Зміст інформації  |
|---|---|------------------------------------|---|
| Кадр 4, субкадр з 2 по 5 і з 7 по 10; кадр 5, субкадр з 1 по 24 |   |                                    |   |
| 1   | Слово 3, розряди: 9-24                  | $e$                                | Ексцентриситет (знижена точність)   |
| 2   | Слово 4, розряди: 1-8                   | $t_{oa}$                           | Опорний час прив'язування альманаху   |
| 3   | Слово 4, розряди 9-24:                  | $\delta_i$                         | Відхилення від номінального кута нахилена орбіти супутника. За номінальний кут нахилена прийнята величина, яка дорівнює ( $i_0=0,3$ напівциклу) |
| 4   | Слово 5, розряди: 1-16                  | $\Omega$<br>OMEGADOT               | Швидкість зміни прямого сходження (знижена точність)  |
| 5   | Слово 6, розряди: 1-24                  | $\sqrt{A}$                         | Корінь квадратний з великої півосі орбіти супутника (знижена точність)  |
| 6   | Слово 7, розряди: 1-24                  | $\Omega_0$<br>(OMEGA) <sub>0</sub> | Довгота висхідного вузла орбітальної площини на тижневу епоху (знижена точність)  |
| 7   | Слово 8, розряди: 1-24                  | $\omega$                           | Аргумент перигею (знижена точність)   |
| 8   | Слово 9, розряди: 1-24                  | $M_0$                              | Середня аномалія на час прив'язування (знижена точність)  |
| 9   | Слово 10, розряди: 1-8, 20-22           | $a_p$                              | Коефіцієнт (постійної складової) апроксимації часових параметрів альманаху  |
| 10  | Слово 10, розряди: 9-19                 | $a_l$                              | Коефіцієнт (першого порядку складової) апроксимації тимчасових параметрів альманаху   |
| Підкадр 5, рядок 25   |   |                                    |   |
| 11  | Слово 3, розряди: 9-16                  | $t_{oa}$                           | Опорний час прив'язування альманаху в тижні з номером $WN_a$  |
| 12  | Слово 3, розряди: 17-24                 | $WN_a$                             | Повний номер тижня, до якого ставиться опорний час прив'язування альманаху ( $t_{oa}$ )   |

Зміст і розташування даних супутників GPS у кадрі 1 наведено в табл. 6.7.

Таблиця 6.7

## Інформація підкадру 1

| № з/п | Розташування інформації: слово, розряди | Символьне позначення | Зміст інформації   |
|-------|---|----------------------|--|
| 1     | 2                                       | 3                    | 4  |
| 1     | Слово 3 розряди: 1-10                   | $WN$                 | Номер поточного тижня GPS на початку передачі даних. Десять старших розрядів містять десять старших розрядів 29-розрядного Z-відліку |

Закінчення табл. 6.7

| 1  | 2  | 3                  | 4   |
|----|--|--------------------|---|
| 2  | Слово 3<br>розряди: 11-12                            | C/A або P на<br>L2 | Включення C/A- або P-коду для частоти L2  |
| 3  | Слово 3<br>розряди: 13-16                            | URA                | Точність виміру дальності споживачем<br>(15 градацій від 2 метрів до 4096 метрів,<br>плюс 16 градація – «не використати»)   |
| 4  | Слово 3<br>розряди: 17-22                            | SV HEALTH          | Стан супутника: старший розряд «0» – вся<br>навігаційна інформація в нормі; старший<br>розряд «1» – частина навігаційної інформації<br>недостовірна   |
| 5  | Слово 3<br>розряди: 23-24<br>слово 8<br>розряди: 1-8 | IODC               | Ідентифікатор набору параметрів часу. Зна-<br>чення переданого IODC відрізняється від<br>будь-якого іншого значення IODC, переда-<br>ного протягом попередніх 7 днів.<br>8 молодших розрядів IODC відповідають<br>8 розрядам IODE підкадрів 2 й 3 |
| 6  | Слово 4<br>розряд 1                                  | L2 P               | Ознака даних для P-коду на частоті L2   |
| 7  | Слово 7<br>розряди: 17-24                            | TGD                | Виправлення для обліку групового часу<br>затримувannya  |
| 8  | Слово 8<br>розряди: 9-24                             | $t_{oc}$           | Параметри корекції боргової шкали часу  |
| 9  | Слово 9<br>розряди: 1-8                              | $a_2$              |   |
| 10 | Слово 9<br>розряди: 9-24                             | $a_1$              |   |
| 11 | Слово 10<br>розряди: 1-22                            | $a_0$              |   |

Зміст і розташування ефемеридної інформації GPS наведено в табл. 6.8.

Таблиця 6.8

## Ефемеридна інформація GPS

| № з/п  | Розташування інформації: слово, розряди | Символьне позначення | Зміст інформації  |
|--------|---|----------------------|---|
| 1      | 2                                       | 3                    | 4   |
| Кадр 2 |   |                      |   |
| 1      | Слово 3,<br>розряди: 1-8                | IODE                 | Ідентифікатор набору даних ефемерид.<br>Використовується для ідентифікації підка-<br>дрів 2 і 3 при відновленні інформації, що<br>знаходиться в них. Критерій оновлення-<br>розбіжності 8 молодших розрядів IODC<br>у підкадрі 1 з IODE підкадрів 2 і 3 |
| 2      | Слово 3,<br>розряди: 9-24               | $C_{rs}$             | Амплітуда синусного гармонійного випра-<br>влення до радіуса орбіти супутника   |

Закінчення табл. 6.8

| 1      | 2   | 3                                  | 4  |
|--------|---|------------------------------------|--|
| 3      | Слово 4,<br>розряди: 1-16                               | $\Delta_n$                         | Відмінність середнього руху від розрахункового значення                    |
| 4      | Слово 4,<br>розряди: 17-24<br>Слово 5,<br>розряди: 1-24 | $M_0$                              | Середня аномалія на час прив'язування                                      |
| 5      | Слово 6,<br>розряди: 1-16                               | $C_{uc}$                           | Амплітуда косинусного гармонійного виправлення до аргументу широти         |
| 6      | Слово 6,<br>розряди: 17-24<br>Слово 7,<br>розряди: 1-24 | $e$                                | Ексцентриситет   |
| 7      | Слово 8,<br>розряди: 1-16                               | $C_{us}$                           | Амплітуда синусного гармонійного виправлення до аргументу широти           |
| 8      | Слово 8,<br>розряди: 17-24<br>Слово 9,<br>розряди: 1-24 | $\sqrt{A}$                         | Корінь квадратний з великої півосі орбіти супутника                        |
| 9      | Слово 10,<br>розряди: 1-16                              | $t_{oe}$                           | Опорний час прив'язування переданих ефемерид                               |
| 10     | Слово 10,<br>розряди: 18-22                             | AODO                               | Неефемеридний параметр, що характеризує зміну терміну служби даних         |
| Кадр 3 |   |                                    |  |
| 11     | Слово 3,<br>розряди: 1-16                               | $C_{ic}$                           | Амплітуда косинусного гармонійного виправлення до кута нахилення           |
| 12     | Слово 3,<br>розряди: 17-24<br>Слово 4,<br>розряди: 1-24 | $\Omega_0$<br>(OMEGA) <sub>0</sub> | Довгота висхідного вузла орбітальної площини на тижневу епоху              |
| 13     | Слово 5,<br>розряди: 1-16                               | $C_{is}$                           | Амплітуда синусного гармонійного виправлення до кута нахилення             |
| 14     | Слово 5,<br>розряди: 17-24<br>Слово 5,<br>розряди: 1-24 | $i_0$                              | Кут нахилення орбіти супутника, нахилення орбіти супутника                 |
| 15     | Слово 7,<br>розряди: 1-16                               | $C_{rc}$                           | Амплітуда косинусного гармонійного виправлення до радіуса орбіти супутника |
| 16     | Слово 7,<br>розряди: 17-24<br>Слово 8,<br>розряди: 1-24 | $\omega$                           | Аргумент перигею   |
| 17     | Слово 9,<br>розряди: 1-24                               | $\Omega$<br>OMEGADOT               | Швидкість зміни прямого сходження  |
| 18     | Слово 10,<br>розряди: 1-8                               | IODE                               | Дивитися №1  |
| 19     | Слово 10,<br>розряди: 9-22                              | IDOT                               | Швидкість зміни кута нахилення   |

Кількісні параметри переданих даних і розмірність представлені в табл. 6.9.

Таблиця 6.9

Кількісні значення даних

| № з/п    | Параметр                        | Число розрядів | Ціна розподілу молодшого розряду | Діапазон значень | Розмірність         | Примітка            |
|----------|---------------------------------|----------------|----------------------------------|------------------|---------------------|---------------------|
| 1        | 2                               | 3              | 4                                | 5                | 6                   | 7                   |
| 1        | $WN$                            | 10             | 1                                | Весь             | тижні               |                     |
| 2        | C/A or P on L2                  |                |                                  |                  |                     |                     |
| 3        | URA                             | 4              |                                  | Весь             |                     |                     |
| 4        | SV HEALTH                       | 6              | 1                                | Весь             | дискрети            |                     |
| 5        | IODC                            | 10             |                                  | Весь             |                     |                     |
| 6        | L2 P                            |                |                                  | Весь             |                     |                     |
| 7        | TGD                             | 8              | 2-31                             |                  | секунди             | Знак в MSB          |
| 8        | $t_{oc}$                        | 16             | 24                               | 604784           | секунди             |                     |
| 9        | $a_{f2}$                        | 8              | 2-55                             |                  | с/с <sup>2</sup>    | Знак в MSB          |
| 10       | $a_{f1}$                        | 16             | 2-43                             |                  | с/с                 | Знак в MSB          |
| 11       | $a_{f0}$                        | 22             | 2-31                             |                  | секунди             | Знак в MSB          |
| 12       | IODE                            | 8              |                                  |                  |                     |                     |
| 13       | $C_{rs}$                        | 16             | 2-5                              |                  | метр                | Знак в MSB          |
| 14       | $\Delta n$                      | 16             | 2-43                             |                  | напівцикл/с         | Знак в MSB          |
| 15       | $M_0$                           | 32             | 2-31                             |                  | напівцикл           | Знак в MSB          |
| 16       | $C_{uc}$                        | 16             | 2-29                             |                  | радіан              | Знак в MSB          |
| 17       | $e$                             | 32             | 2-33                             | 0,03             |                     | безрозмірна         |
| 18       | $C_{us}$                        | 16             | 2-29                             |                  | радіан              | Знак в MSB          |
| 19       | $\sqrt{A}$                      | 32             | 2-19                             | Весь             |                     | метр <sup>1/2</sup> |
| 20       | $t_{oe}$                        | 16             | 24                               | 604784           | секунда             |                     |
| 21       | $C_{ic}$                        | 16             | 2-29                             |                  | радіан              | Знак в MSB          |
| 22       | $\Omega_0$ (OMEGA) <sub>0</sub> | 32             | 2-31                             |                  | напівцикл           | Знак в MSB          |
| 23       | $C_{is}$                        | 16             | 2-29                             |                  | радіан              | Знак в MSB          |
| 24       | $i_0$                           | 32             | 2-31                             |                  | напівцикл           | Знак в MSB          |
| 25       | $C_{rc}$                        | 16             | 2-5                              |                  | метр                | Знак в MSB          |
| 26       | $\omega$                        | 32             | 2-31                             |                  | напівцикл           | Знак в MSB          |
| 27       | $\Omega$ , OMEGADOT             | 24             | 2-43                             |                  | напівцикл/с         | Знак в MSB          |
| 28       | IDOT                            | 14             | 2-43                             |                  | напівцикл/с         | Знак в MSB          |
| Альманах |                                 |                |                                  |                  |                     |                     |
| 29       | $e$                             | 16             | 2-21                             | Весь             |                     | безрозмірна         |
| 30       | $t_{oa}$                        | 8              | 212                              | 602112           | секунда             |                     |
| 31       | $\delta_i$                      | 16             | 2-19                             |                  | напівцикл           | Знак в MSB          |
| 32       | $\Omega$ , OMEGADOT             | 16             | 2-38                             |                  | напівцикл/с         | Знак в MSB          |
| 33       | $\sqrt{A}$                      | 24             | 2-11                             | Весь             | метр <sup>1/2</sup> |                     |
| 34       | $\Omega_0$ (OMEGA) <sub>0</sub> | 24             | 2-23                             |                  | напівцикл           | Знак в MSB          |

Закінчення табл. 6.9

| 1  | 2            | 3  | 4    | 5 | 6         | 7          |
|----|--------------|----|------|---|-----------|------------|
| 35 | $\omega$     | 24 | 2-23 |   | напівцикл | Знак в MSB |
| 36 | $M_0$        | 24 | 2-23 |   | напівцикл | Знак в MSB |
| 37 | $a_{\theta}$ | 11 | 2-20 |   | секунда   | Знак в MSB |
| 38 | $a_l$        | 11 | 2-38 |   | секунда   | Знак в MSB |

Формування основної частини навігаційного повідомлення здійснюється в наземному комплексі контролю та управління, яке завантажується до НКА під час сеансів зв'язку. В НКА в навігаційне повідомлення додається інформація, що характеризує бортовий стан НКА (мітки часу бортової шкали часу, відомості про працездатність НКА тощо).

#### 6.2.4. Формування сигналів у супутникових радіонавігаційних системах ГЛОНАСС

Формування сигналів у СРНС ГЛОНАСС багато у чому схоже на СРНС GPS, але є певні відмінності. У ГЛОНАСС високоточний код називається кодом високої точності (ВТ-код). Високоточний код призначений для використання військовими для проведення спеціальних операцій і військових дій. Для захисту високоточного коду ВТ використовується алгоритм зміни псевдовипадкового коду, що унеможлиблює його виявлення корелятором приймача несанкціонованого користувача. Рішення про зміну псевдовипадкового коду приймається Міністерством оборони Російської Федерації. Кодом стандартної точності є СТ-код.

Частотний план навігаційних радіосигналів СРНС ГЛОНАСС зображений на рис. 6.15.

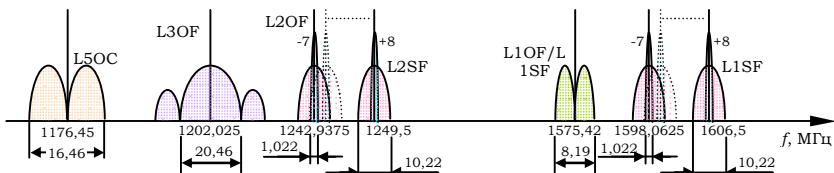


Рис. 6.15. Частотний план сигналів ГЛОНАСС

Навігаційний радіосигнал L1 діапазону (1600 МГц) містить ВТ- і СТ-код, тобто є двокомпонентним. Фазовий зсув між двома кодами становить  $90^\circ$ , завдяки чому на одній частоті передаються два однакових за потужністю широкосмугові фазоманіпульовані навігаційні радіосигнали: вузькосмуговий (СТ) і широкосмуговий



(BT). Вузькосмуговий сигнал формується завдяки модуляції несучої частоти кодовою послідовністю СТ-коду з тактовою частотою 0,511 МГц, широкосмуговий сигнал модулюється BT-кодом з тактовою частотою 5,11 МГц. На противагу GPS у ГЛОНАСС у кожному НКА формується однакова кодова послідовність, а розділення каналів здійснюється завдяки частотній селекції сигналів НКА.

Навігаційний радіосигнал L2 діапазону (1250 МГц) у перших НКА (Глонасс) був однокомпонентним і містив лише BT-код. Після модернізації і запуску НКА Глонасс-М радіосигнал L2 діапазону містить як BT-, так і СТ-код.

Програмою модернізації заплановано введення в дію нових сигналів, залишаючи також і старі. У НКА Глонасс-К1 передбачене введення додаткового CDMA сигналу в частотному діапазоні L3 (1202,025 МГц), модульованого відкритим кодом квадратурною фазовою маніпуляцією (QPSK – Quadrature Phase Shift Keying) [19]. На НКА Глонасс-К2 вводиться в дію навігаційний сигнал у діапазоні L1 (частота сигналу 1575,42 МГц, CDMA, передбачається кодування як стандартним кодом, так і кодом підвищеної точності). Навігаційний сигнал, що вводиться в частотному діапазоні L2 (1242 МГц, CDMA), буде моделюватися тільки закритим високоточним кодом. Концепція подальшої модернізації передбачає введення в дію НКА Глонасс-КМ, де додатково вводиться навігаційний сигнал на частоті L5 (1176,45 МГц, CDMA).

### ***6.2.5. Навігаційне повідомлення ГЛОНАСС***

Навігаційне повідомлення ГЛОНАСС (як і GPS) формується у наземному комплексі контролю та управління. Альманах ГЛОНАСС використовується для планування сеансу позиціонування, прогнозування доплерівського зсуву і містить:

- час, до якого відноситься альманах;
- параметри орбіт всіх НКА;
- номери несучих частот;
- поправки до БШЧ для кожного штатного НКА;
- поправки до 1 мітки часу відносно земного часу UTC (SU).

Інша інформація (оперативна) навігаційного повідомлення використовується для внесення частотно-часової поправки під час розв'язування навігаційної задачі (визначення координат та вектора швидкості споживача). Оперативна інформація також

містить ознаки вірогідності інформації, час початку кадру, ефемеридну інформацію в прямокутній геоцентричній системі координат на момент часу  $t_0$ , час  $t_0$ .

Навігаційне повідомлення представлено суперкадром [20]. Суперкадр складається з декількох кадрів, кадр складається з декількох рядків цифрової інформації (рис. 6.16).

| Номер кадру в суперкадрі | Номер рядку в кадрі | 1,7 с                        |   |              | 0,3 с      |
|--------------------------|---------------------|------------------------------|---|--------------|------------|
|                          |                     | Номер інформаційного символу |   |              | мітка часу |
|                          |                     | 85                           | 84 - 9  | 8 - 1        |            |
| I                        | 1                   | 0                            | оперативна  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 2                   | 0                            | інформація  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 3                   | 0                            | передавального  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 4                   | 0                            | НКА   | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 5 - 15              | 0                            | неоперативна інформація (альманах) для п'яти (1-5) НКА      | код Хеммінга | мітка часу |
| II                       | 1                   | 0                            | оперативна  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 2                   | 0                            | інформація  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 3                   | 0                            | передавального  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 4                   | 0                            | НКА   | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 5 - 15              | 0                            | неоперативна інформація (альманах) для п'яти (6-10) НКА     | код Хеммінга | мітка часу |
| III                      | 1                   | 0                            | оперативна  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 2                   | 0                            | інформація  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 3                   | 0                            | передавального  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 4                   | 0                            | НКА   | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 5 - 15              | 0                            | неоперативна інформація (альманах) для п'яти (11-15) НКА    | код Хеммінга | мітка часу |
| VI                       | 1                   | 0                            | оперативна  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 2                   | 0                            | інформація  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 3                   | 0                            | передавального  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 4                   | 0                            | НКА   | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 5 - 15              | 0                            | неоперативна інформація (альманах) для п'яти (16-20) НКА    | код Хеммінга | мітка часу |
| V                        | 1                   | 0                            | оперативна  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 2                   | 0                            | інформація  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 3                   | 0                            | передавального  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 4                   | 0                            | НКА   | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 5 - 13              | 0                            | неоперативна інформація (альманах) для чотирьох (21-24) НКА | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 14                  | 0                            | передавального  | код Хеммінга | мітка часу |
|                          | 15                  | 0                            | НКА   | код Хеммінга | мітка часу |

Рис. 6.16. Структура суперкадру навігаційного повідомлення ГЛОНАСС

Швидкість передачі навігаційного повідомлення 50 біт/с. Тривалість суперкадру 2,5 хвилини, що забезпечує більш оперативне оновлення альманаху у порівнянні з GPS (12,5 хв). Суперкадр містить 5 кадрів тривалістю 30 секунд. Кадр, у свою чергу, містить 15 рядків тривалістю 2 секунди. Кадр має повну оперативну інформацію і  $\frac{1}{4}$  альманаху. Кожний з перших чотирьох кадрів (структура яких ідентична) несе альманах про 5 НКА системи, п'ятий кадр несе інформацію про останні чотири супутника. У кожному кадрі суперкадру інформація, що міститься в рядках з першого по четвертий, відноситься до того супутника, з якого вона надходить (оперативна інформація). Рядки з шостого по п'ятнадцятий містять неоперативну інформацію, яка стосується решти системи НКА. Неоперативна інформація для одного супутника займає два рядки. Ця інформація в межах суперкадру не змінюється.

Інформаційний рядок складається з 85 двійкових символів цифрової інформації (тривалість символу 20 мс) загальною тривалістю 1,7 секунди і міток часу 0,3 секунди (30 символів по 10 мс). Нумерація рядка здійснюється справа наліво. В кожному рядку (позиції 1-8) передаються перевірочні символи коду Хеммінга, які дозволяють проводити перевірку достовірності цифрової інформації в рядку. Останній символ у рядку є «холостим» (привласнюється «0»). Детально структура навігаційних кадрів наведена у [20].

#### **6.2.6. Формування навігаційного радіосигналу**

Навігаційний радіосигнал являє собою радіохвилю, що об'єднує в собі різні типи сигналів і утворюється множенням несучої частоти на модулюючу ПВП. Модулююча ПВП утворюється складенням по модулю 2 трьох двійкових сигналів:

- псевдовипадкового далекомірного коду ВТ (СТ);
- навігаційного повідомлення (50 біт/с);
- допоміжної меандрової послідовності (100 біт/с).

Принцип формування моделюючої ПВП розглянемо на прикладі системи ГЛОНАСС. На першому етапі формування здійснюється об'єднання кодових сигналів з навігаційним повідомленням (рис. 6.17), причому для цього використовується роздільне складення у суматорах для ВТ- і СТ-кодів (рис. 6.18).

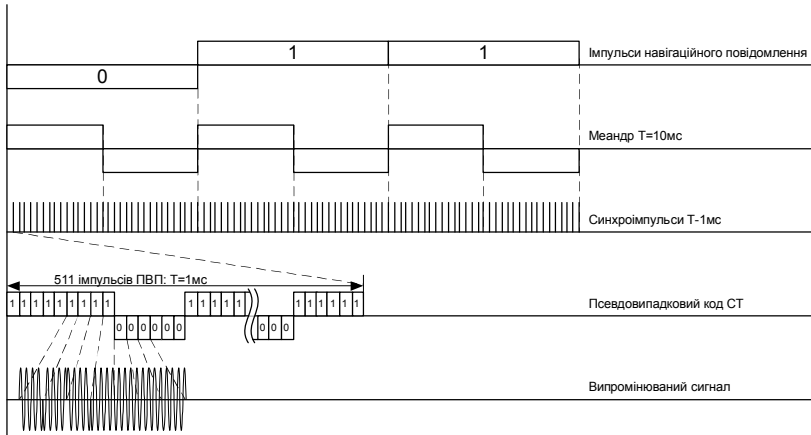


Рис. 6.17. Формування модулюючої ПВП

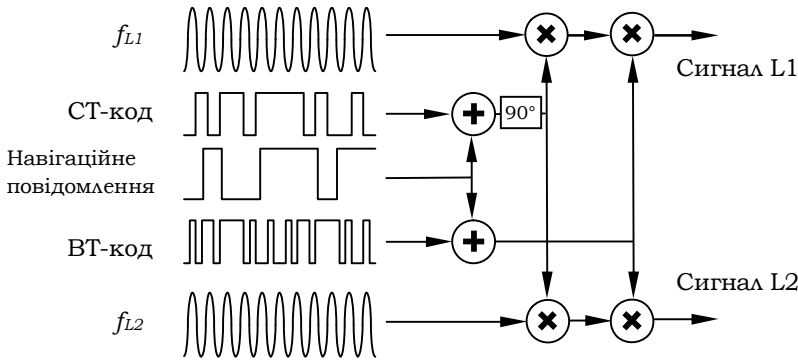


Рис. 6.18. Формування радіонавігаційного сигналу

Суматор формує результуючий сигнал завдяки операції бінарного підсумовування, при якому однакові рівні станів елементів послідовності коду і повідомлення формують на виході суматора сигнал нульового рівня, а різні стани (наприклад, «1» і «0») – сигнал одиничного рівня.

На наступному етапі височастотне коливання модулюється сформованою кодовою послідовністю. Для підвищення завадостійкості використовують відносну фазову модуляцію без розриву фази. Височастотні несучі коливання (на яких передаються дві кодові послідовності) додатково моделюються іншим кодом, при цьому фазовий зсув між модульованими сигналами становить  $90^\circ$ .

### **6.2.7. Вимоги до навігаційних радіосигналів**

Застосування навігаційних радіосигналів для розв'язування навігаційних задач висуває до їх параметрів певні вимоги. Невідповідність цим вимогам у тому чи іншому вигляді унеможливить проведення далекомірних вимірів. Отже, до навігаційних сигналів СРНС висуваються такі основні вимоги:

1. Навігаційні радіосигнали, що передаються з НКА, мають бути когерентними, тобто формуватися за допомогою того ж самого бортового опорного генератора. Різниця в часі передачі коду стандартної точності і високоточного коду не повинна перевищувати 10 нс.

2. Генерування несучих коливань повинно здійснюватися з мінімальним рівнем апаратурних шумів, причому флуктуації фази коливань не повинні перевищувати 5°.

3. Фазовий зсув радіосигналів, які передаються на одній частоті і генерованих кодами різної точності, повинен становити 90° при похибці не більше 5°.

4. Різниця апаратурних затримок сигналів з частотами L1 і L2 на вході в антенний пристрій не повинна перевищувати 15 нс при варіаціях не більше 3 нс.

#### ***Питання для самоконтролю:***

1. *Які основні функції виконують радіосигнали в СРНС?*
2. *Що означає термін «кругова поляризація»?*
3. *Яка потреба у розширенні спектра сигналів СРНС?*
4. *Яким чином здійснюється формування псевдовипадкової послідовності?*
5. *Що розуміється під терміном «маніпуляції сигналу»?*
6. *У чому полягає сутність багатостанційного доступу в СРНС?*
7. *Який склад навігаційного радіосигналу GPS?*
8. *Що містить навігаційне повідомлення GPS?*
9. *Яка модернізація сигналів планується в ГЛОНАСС?*
10. *Яка структура суперкадру в навігаційному повідомленні ГЛОНАСС?*
11. *Яким чином розділяються сигнали високої і стандартної точності в навігаційному радіосигналі?*

## Розділ 7. АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ НАВІГАЦІЙНИХ РАДІОСИГНАЛІВ

*Використання навігаційних радіосигналів НКА для розв'язування навігаційних задач і позиціонування споживачів передбачає дві основні фази роботи з сигналом: його приймання й оброблення. Ці дві фази отримали назви алгоритмів первинної і вторинної обробки навігаційного радіосигналу.*

### 7.1. Навігаційні параметри радіосигналів

Під час розв'язування навігаційних задач за допомогою виконання вимірювань відстаней до супутників, вимірювань доплерівського зсуву частоти, виділення інформації зі складу навігаційного повідомлення, вибору оптимального сузір'я супутників для отримання найбільш вірогідного вектора споживача виникає необхідність оброблення модульованого багатокомпонентного навігаційного радіосигналу.

Параметри, які виділяються з навігаційних радіосигналів, поділяють на **основні інформаційні**, **додаткові інформаційні** і **неінформаційні**. До основних інформаційних параметрів відносяться затримка сигналу при поширенні  $\tau$  і доплерівський зсув частоти  $\Delta f_d$ . Додаткові інформаційні параметри передаються у складі навігаційного повідомлення. До неінформаційних параметрів сигналів відноситься, наприклад, амплітуда, фаза, частота, поляризація радіосигналу. Всі перераховані параметри передаються із супутника у складі модульованих по фазі несучих коливань. Їх виділення в приймальній апаратурі споживача здійснюється на основі процесу, що отримав назву демодуляції та декодування.

Загалом навігаційна апаратура споживача спільно з доданим до неї програмним забезпеченням розв'язує в польових умовах багато допоміжних задач (схема взаємозв'язку процесів оброблення сигналу наведена на рис. 7.1), до яких відносяться:

- селекція прийнятих радіосигналів від конкретного НКА (відділення цього сигналу від сигналів всіх інших НКА), захоплення цього сигналу і подальше його відстеження протягом усього сеансу спостережень;
- демодуляція і декодування прийнятих сигналів з метою підготовки даних до виконання вимірювань і визначення навігаційних параметрів;

- розшифрування навігаційного повідомлення, яке передається з НКА;
- поточне управління всім процесом спостережень у польових умовах вимірювань;
- попередня обробка результатів вимірювань і організація їх зберігання з використанням тих або інших пристроїв пам'яті;
- контроль за станом працездатності всього приймального комплексу (самодіагностика), включаючи контроль джерел живлення.

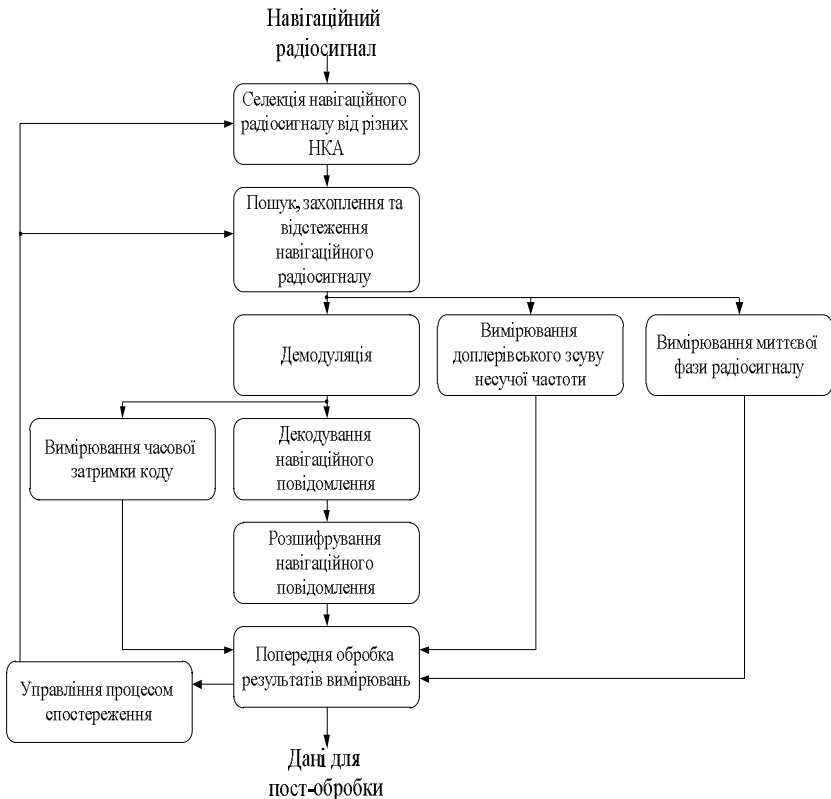


Рис. 7.1. Схема процесів обробки навігаційного радіосигналу

Всі перераховані вище функції реалізуються на основі використання відповідної структурної схеми приймальної апаратури споживача (див. рис. 3.12) за винятком тих завдань, які вирішуються при виконанні пост-обробки.

## 7.2. Алгоритми обробки сигналу

Первинна обробка навігаційних радіосигналів виконується в радіотракті навігаційного приймача. При цьому розв'язуються дві основні задачі:

- селекція навігаційного радіосигналу серед множини інших радіосигналів НКА і можливих радіозавад;
- пошук, захоплення і відстеження навігаційних радіосигналів.

Розв'язування цих задач ґрунтується на певних алгоритмах функціонування технічних модулів радіочастотного тракту приймача. Процедура виявлення сигналу ускладнена наявністю різноманітних радіозавад, що стосовно корисного навігаційного сигналу складають не тільки шумові й імпульсні завади від різних джерел випромінювання, але і навігаційні радіосигнали від інших супутників. Крім того, процедура розв'язування навігаційної задачі потребує впевненого прийому конкретного навігаційного сигналу протягом певного часового інтервалу, під час якого може змінюватися значення несучої частоти радіосигналу (внаслідок доплерівського зсуву частоти), величина часової затримки, фази й амплітуди сигналу, а також домішуватися різноманітні радіозавади.

### 7.2.1. Селекція сигналів різних супутників

Одна з особливостей роботи навігаційних приймачів полягає в необхідності одночасного приймання сигналів декількох НКА, що обумовлює наявність декількох паралельних каналів прийому навігаційного радіосигналу в радіотракті навігаційного приймача. Для відділення корисного сигналу від завад він повинен деяким чином відрізнитись, для цього в СРНС використовують певні способи селекції радіосигналів. GPS використовує кодове розділення сигналів (CDMA), при якому сигнали різних НКА відрізняються своєю кодовою послідовністю, властивою тільки конкретному НКА. ГЛОНАСС використовує частотне розділення навігаційних сигналів (FDMA), при цьому сигнал кожного НКА передається у виділеному тільки для цього супутника частотному діапазоні. *До речі, модернізація системи ГЛОНАСС передбачає введення кодового розділення навігаційних сигналів.*

Реалізація у приймачі принципів кодового (структурного) розділення сигналів (структурної селекції сигналів) вимагає введення у



структуру приймача блоків автоматичного підлаштування часу (лінія затримки сигналу), автоматичного підлаштування частоти (АПЧ) і автоматичного підлаштування фази (ФАПЧ) сигналу, сутність дії яких зображено на рис. 7.2. Прийнятий високочастотний сигнал у радіочастотному тракті гетеродинують (поетапно переносять на проміжну частоту з метою відсічення завад), дискретизують (представляють сигнал у вигляді дискретних відліків з метою його подальшої цифрової обробки) і подають у корелятор. У кореляторі в цифровій формі формуються відліки синфазних  $I(k)$  і квадратурних  $Q(k)$  компонент сигналу, які використовуються для пошуку сигналу за кодом, частотою і затримкою, а також фазових спостережень і виділення навігаційного повідомлення. Для розпізнавання корисного сигналу в приймачі здійснюється формування набору кодових послідовностей, ідентичних індивідуальним кодовим послідовностям кожного окремого НКА. Крім цього, у схему приймача вводиться контрольний канал стеження, метою якого є контроль за постійністю часових затримок сигналів у різних каналах. Управління всіма режимами роботи каналів і первинна обробка результатів спостереження здійснюється за допомогою процесора [21].

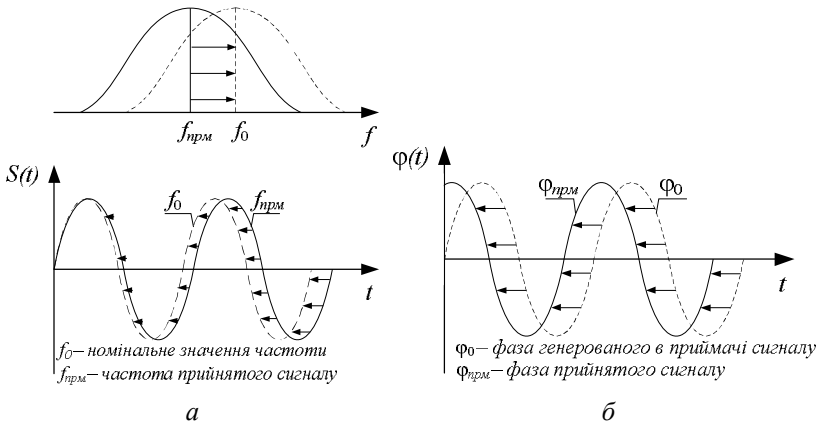


Рис. 7.2. Підлаштування сигналу: а – за частотою; б – за фазою

При структурній селекції сигналу використовується кореляційне порівняння прийнятих від НКА сигналів із сигналами, кодові послідовності яких сформовані в навігаційному приймачі. Кількість каналів приймача визначається кількістю кореляторів для одночасної обробки навігаційних радіосигналів (рис. 7.3).

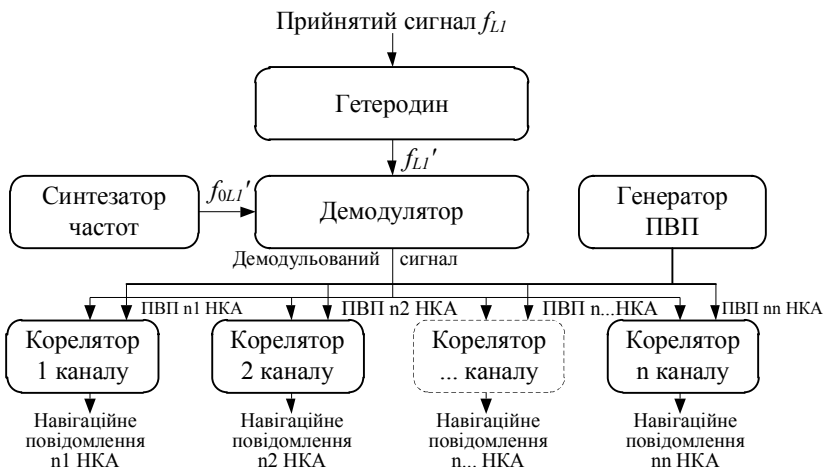


Рис. 7.3. Селекція навігаційних радіосигналів GPS

При кореляційному пере-множенні двох ПВП на виході корелятора відбувається зростання рівня сигналу, що свідчить про сильну кореляційну відповідність двох помножених сигналів. Це відбувається тільки в тому випадку, якщо ПВП мають структуру, що збігається в часі. Для часового збігу двох порівнюваних ПВП до складу формувача місцевого сигналу вводиться лінія затримки сформованого сигналу, яка дозволяє здійснювати порівняння отриманої і сформованої ПВП і проводити вимірювання псевдодальності за обчисленою часовою затримкою прийнятої кодової послідовності (рис. 7.4 – жирним позначені частини ПВП, які збігаються).

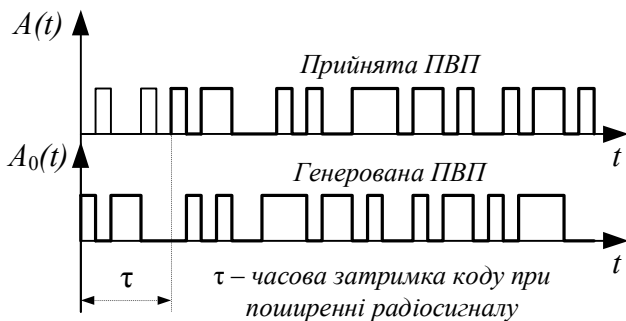


Рис. 7.4. До визначення часової затримки поширення сигналу за кодом

Частотне розділення сигналів ГЛОНАСС передбачає частотну селекцію сигналу в навігаційному приймачі. Сам приймач при цьому є багатоканальним приймачем навігаційних сигналів декількох супутників (рис. 7.5), в якому використовують смугові фільтри та сітку частот для виділення і гетеродинування (поступового зменшення радіочастоти) корисного сигналу. В первинному виконанні кількість каналів прийому сигналів приймача дорівнювала кількості частотних радіосигналів, але при цьому виникають суттєві ускладнення під час виконання високоточних фазових вимірювань з використанням диференційних методів, що пов'язано зі складністю обчислення множини часових апаратних затримок, які у свою чергу залежать від частоти навігаційного радіосигналу. Для усунення цього недоліку запропоновано триступеневе гетеродинування сигналу, при цьому пониження частоти відбувається не для одного каналу, а для групи частотних каналів (50,44–36,44 МГц – після першого гетеродинування, 15,46–1,46 МГц – після другого), що забезпечує проходження сигналу по одному тракту і, відповідно, однаковість фазових затримок для всіх частотних каналів [22].

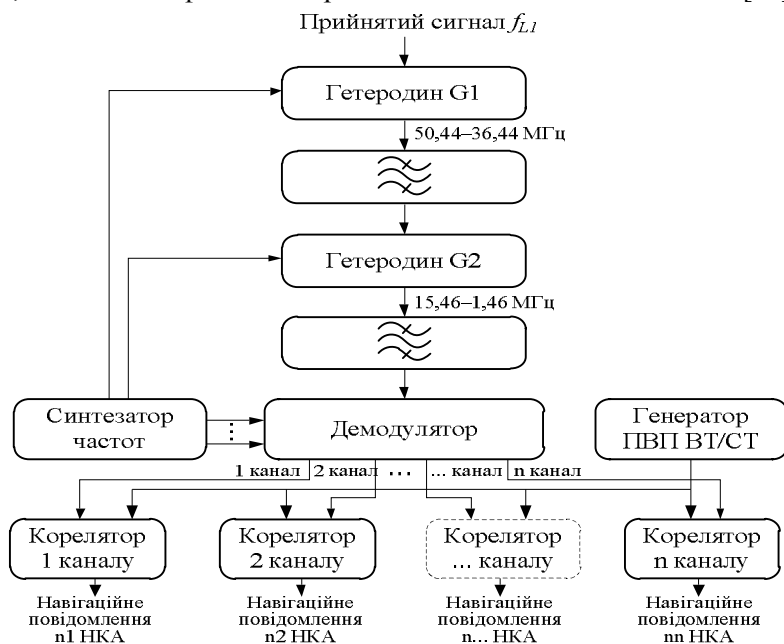


Рис. 7.5. Селекція навігаційних радіосигналів ГЛОНАСС

Елементи частотної селекції виконуються також і в системах з кодовим розділенням сигналів. Для проведення точних фазових вимірів у приймачах з отриманого сигналу виділяється несуче високочастотне гармонійне коливання. Оскільки частоти передавання різних навігаційних сигналів збігаються, то на приймальному кінці можуть спостерігатися небажані явища накладання гармонійних коливань і спотворення форми сигналів. Для усунення цього явища використовуються вузькосмугові фільтри (зі смугою пропускання близько 100 Гц) з високою добротністю. Частоти гармонійних коливань різних навігаційних радіосигналів відрізняються внаслідок ефекту Доплера, при якому сигнали, що отримуються від різних джерел випромінювання і які мають різну швидкість зближення або віддалення до приймача, відрізняються частотою. Доплерівські зсуви частоти можуть сягати декількох кГц залежно від різницевої швидкості зближення (віддалення) [21].

### ***7.2.2. Пошук, захоплення і відстеження навігаційних радіосигналів***

Використання методів розділення навігаційних сигналів від різних НКА вимагає введення в навігаційний приймач пристроїв, що дозволяють виконувати оперативний пошук навігаційного радіосигналу, його захоплення й утримання на час проведення спостереження. Пошук сигналів у GPS та ГЛОНАСС приймачах має певні відмінності, що пов'язано з відмінностями способів формування сигналів.

У GPS приймачах формується набір відомих кодових послідовностей, що відповідає кодовим послідовностям НКА GPS. У кореляторі радіочастотного тракту прийняті кодові ПВП порівнюються з кодовими послідовностями, що сформовані у приймачі, причому здійснюється послідовний перебір значень можливого доплерівського зсуву частоти  $\Delta f_d$  і можливих значень затримки кодових послідовностей у часі  $\tau$ . При цьому умовно припускають, що значення доплерівського зсуву і затримки сигналу мають дискретний характер. Комбінація  $\Delta f_d$  і  $\tau$  утворюють елементарну комірку пошуку. Крок дискретизації обирають з міркувань оптимальної оцінки параметра при виконанні режиму фільтрації. Сукупність можливих комбінацій коду, часової за-

тримки і доплерівського зсуву частоти утворюють область пошуку корисного навігаційного радіосигналу (рис. 7.6).

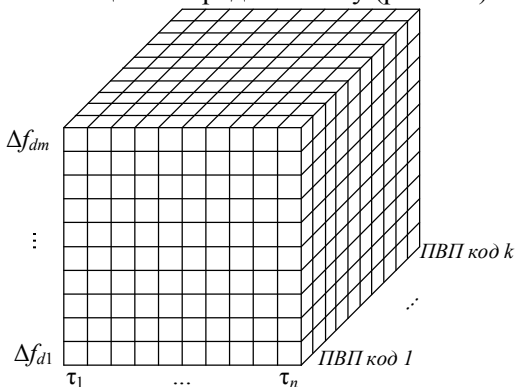


Рис. 7.6. Область пошуку корисного навігаційного радіосигналу GPS

У разі відповідності порівнюваних кодових послідовностей на виході корелятора приймача відбувається стрибкоподібне підвищення рівня сигналу, що свідчить про відповідність не тільки структури аналізованого сигналу, але й інформаційних параметрів  $\tau$  і  $\Delta f_d$ . При перевищенні на виході корелятора граничного значення рівня сигналу в блок керування пошуком поступає сигнал, що свідчить про захоплення потрібного сигналу, на підставі чого пошук припиняється або здійснюється перехід до пошуку сигналу чергового супутника. Кількість можливих комбінацій сигналу, сформованих у приймачі, обчислюється тисячами. Внаслідок цього на пошук сигналів окремих супутників GPS може витратитися від декількох десятків секунд до декількох хвилин.

У ГЛОНАСС приймачах (при частотному методі багатостанційного доступу) здійснюється сканування відомих частот сигналів НКА. Через використання єдиного коду процедура виявлення сигналу дещо спрощується і вимагає меншого часу на пошук і захоплення сигналу. Процедура пошуку сигналу для кожного супутника полягає у послідовному пошуку можливих значень затримок сигналу і доплерівських зсувів частоти. Для СРНС ГЛОНАСС діапазон доплерівських зсувів становить  $\Delta f_d = -5 \dots + 5$  кГц [5], а значення  $\delta f_d$  елементарної комірки пошуку визначається смугою захоплення  $\Delta f_3 = 500$  Гц системи АПЧ

(рис. 7.7). Таким чином, кількість комірок пошуку по частоті становить  $N_f = \Delta f_d / \delta f_d = 20$ . Значення елементарної комірки пошуку по затримці сигналу дорівнює кількості елементів кодової послідовності далекомірного коду і становить  $N_\tau = 511$ .

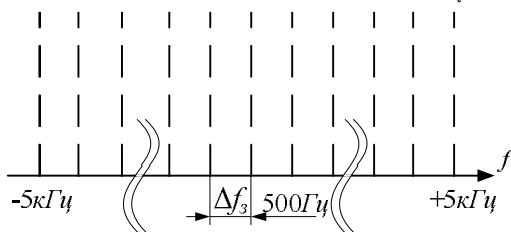


Рис. 7.7. Формування комірок пошуку сигналу ГЛОНАСС за доплерівським зсувом

Отже, загальна кількість комірок аналізу становить  $N_a = N_f N_\tau = 10220$  (рис. 7.8), а тривалість аналізу комірки (інтервал накопичення сигналу) становить близько 1–2 мс.

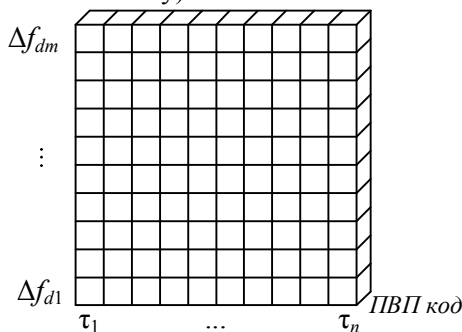


Рис. 7.8. Область пошуку корисного навігаційного радіосигналу ГЛОНАСС

Очевидно, що апаратна реалізація паралельного пошуку неможлива, тому на практиці реалізують паралельно-послідовні та послідовні алгоритми пошуку, що значно спрощують апаратну частину приймача. Крім цього, для спрощення процедури пошуку при обмеженій кількості НКА й апріорі відомих  $\Delta f_d$  і  $\tau$  (наприклад, за даними альманаху або попередніх спостереженнях) кількість комірок може бути суттєво скорочена.

Спектр різновидів навігаційних приймачів достатньо широкий, і приймачі володіють певними власними характеристиками,

тобто розрізняються кількістю каналів прийому, швидкості оновлення даних, часу обчислень, точності і надійності визначення координат.

Сучасні GPS-пристрої зазвичай оснащені 6–8 каналами прийому сигналу, що дозволяє відстежувати майже всі навігаційні супутники, що перебувають у зоні радіовидимості об'єкта. Якщо кількість каналів менше за кількість видимих НКА, на основі даних альманаху обирається найоптимальніше сузір'я НКА. У режимі спостереження сузір'я НКА швидкість оновлення навігаційних даних переважно не перевищує 1 секунди. Час розв'язування задачі позиціонування залежить від кількості одночасно спостережуваних супутників і режиму визначення місцеположення.

Відстеження навігаційних радіосигналів реалізується схемами стеження й автоматичного підлаштування за фазою, частотою і затримкою навігаційного радіосигналу.

### 7.2.3. Алгоритми вторинної обробки сигналу

Вторинна обробка сигналу передбачає виконання трьох основних задач:

- демодуляція навігаційного радіосигналу;
- форматування і дешифрування ефемеридної інформації;
- визначення координат і вектора швидкості споживача в результаті розв'язування навігаційної задачі.

Складний фазоманіпульований навігаційний радіосигнал у точці прийому має вигляд:

$$S(t - \tau_i) = A'_{\text{вг}} \left[ P_i(t - \tau_i) \oplus D_{\text{вг}i}(t - \tau_i) \right] \cos \left[ (\omega_i + \Delta\omega_{di})(t - \tau_i) + \phi'_i \right] + A'_{\text{ст}} \left[ G_i(t - \tau_i) \oplus D_{\text{ст}i}(t - \tau_i) \right] \sin \left[ (\omega_i + \Delta\omega_{di})(t - \tau_i) + \phi'_i \right],$$

де  $A'_{\text{вг}}$ ,  $A'_{\text{ст}}$  – амплітуди сигналів ВТ- і СТ-кодів у фазовому центрі приймальної антени;  $P_i(t - \tau_i)$ ,  $G_i(t - \tau_i)$  – далекомірні коди ПВП сигналів ВТ і СТ  $i$ -го НКА;  $D_{\text{вг}i}$ ,  $D_{\text{ст}i}$  – потоки інформаційних повідомлень  $i$ -го НКА;  $\omega_i$ ,  $\Delta\omega_{di}$  – кутова частота і доплерівський зсув несучої частоти  $i$ -го НКА;  $\phi'_i$  – початкова фаза несучої  $i$ -го НКА;  $\tau_i$  – затримка поширення сигналу  $i$ -го НКА.

Процедури вторинної обробки сигналу нерозривно пов'язані з методами селекції, пошуку, захоплення і відстеження навігаційних сигналів.

Демодуляція навігаційного радіосигналу здійснюється у блоці оцінювання навігаційного повідомлення, на виході якого формується неперервний потік символів навігаційного повідомлення, модульований меандровим коливанням, псевдовипадковою послідовністю і спотворений шумами. Для виділення навігаційного повідомлення необхідно згладити шуми, синхронізувати потік цифрової інформації і зняти модуляцію ПВП.

### **7.3. Визначення радіонавігаційних параметрів**

Для знаходження повного вектора споживача необхідно визначити основні радіонавігаційні параметри – затримку сигналу  $\tau_i$  і доплерівський зсув частоти відносно чотирьох НКА, при цьому затримка використовується для визначення миттєвих координат споживача, а доплерівський зсув для знаходження складових його швидкості. Затримка  $\tau_i$ , а відповідно і вимір дальності може здійснюватись двома основними методами:

- далекомірними кодами;
- фазовими вимірами.

#### *7.3.1. Далекомірні коди*

Далекомірні коди набули розвитку у 70-і роки ХХ сторіччя. Використовуючи послідовність радіоімпульсів з початковими фазами 0 і  $\pi$ , чергування яких утворюють певний код, можна визначити дальність між джерелом радіосигналу і його приймачем.

Визначення дальності відбувається таким чином. Далекомірний код, що випромінюється передавачем, відомий, і приймач очікує його. Під час приймання приймачем далекомірного коду здійснюється його порівняння з наявним кодом і при його повному збігу між ними виникає максимальна кореляція, що свідчить про приймання очікуваного сигналу. Вважатимемо, що бортова шкала часу синхронізована зі шкалою часу споживача. Навігаційний радіосигнал містить інформаційне повідомлення точного часу  $t_1$  його передачі з НКА. Приймач, отримуючи радіосигнал, фіксує час його отримання  $t_2$ . Час запізнення радіосигналу



$\tau = t_2 - t_1$  (рис. 7.4), тобто час запізнення кодової послідовності з  $M$  символів з тривалістю  $T_n$ , буде визначати час поширення радіосигналу від НКА до навігаційного приймача. Знаючи швидкість поширення радіосигналу, можна знайти відстань від НКА до навігаційного приймача  $D = c\tau$ .

Час  $\tau$  дорівнює тривалості цілого числа  $N$  кодових послідовностей  $M$  тривалістю  $T_n$ , частини послідовності, що складається з  $m$  цілих елементів послідовності  $M$  тривалістю  $T_m$  і частки  $\phi$  елементу  $m$ :

$$\tau = NT_n + (m + \phi)T_m.$$

Якщо при визначенні цілого числа  $N$  кодових послідовностей  $M$  ускладнень не виникає, то для визначення величин  $m$  і  $\phi$  використовують такий алгоритм: ітераційною процедурою часового зсуву місцевого коду здійснюють його затримку на деякий час  $t_3$ , щоб код навігаційного радіосигналу встиг його «догнати», при цьому виникає максимальна кореляція і часова різниця між місцевим радіосигналом і навігаційним сигналом, що становить ціле число фаз послідовності:

$$t_2 - t_1 = NT_n - t_3.$$

У дійсності наведені розрахунки справедливі тільки для ідеальних умов. У реальних умовах існує певна похибка  $\tau'$ , що обумовлена завадами на трасі поширення сигналу, розбіжністю у синхронізації бортових та споживчих шкал часу, апаратними шумами радіоелектронних пристроїв. Отже, затримка сигналу на трасі поширення визначається як:

$$\tau_i = \frac{D_i(t)}{c} + \tau_{\text{нп}}(t) + \tau_{\text{нка}i} + \Delta\tau_n(t) + \delta_\tau,$$

де  $D_i(t)$  – відстань від НКА до навігаційного приймача;  $\tau_{\text{нп}}(t)$  – похибка ШЧС;  $\tau_{\text{нка}i}$  – похибка БШЧ;  $\Delta\tau_n(t)$  – похибка на трасі поширення сигналу;  $\delta_\tau$  – похибка вимірювального пристрою приймача. Тобто затримка сигналу не є функцією суто відстані до НКА, і у цьому разі має місце визначення псевдодальності

$D' = c(\tau + \tau')$ , яка відрізняється від істинної дальності наявністю перелічених похибок. Отже, **псевдодальність** – це відстань між НКА і навігаційним приймачем, що обчислюється множенням швидкості світла на виміряну за значенням стандартів часу НКА і навігаційного приймача часову затримку поширення сигналу, яка спотворена певними помилками. Зауважимо, що псевдодальність відрізняється від істинної дальності на невідому, але постійну у часі величину. Значення псевдодальності можна представити у вигляді:

$$D' = N\lambda_{\text{п}} + (m + \Phi)\lambda_m,$$

де  $\lambda_{\text{п}} = cM/f_m$  – довжина коду ПВП, м;  $M$  – кількість елементів у ПВП, м;  $f_m$  – частота слідування елементів ПВП;  $\lambda_m = c/f_m$  – довжина елементу ПВП, м;  $\Phi$  – кодова фаза, яка враховує частку елементу  $m$  й інші часові помилки. З наведеного видно, що точність визначення істинної дальності визначається розбіжністю шкал передавача і приймача, уповільненням швидкості поширення радіохвиль і довжиною елементарної кодової посилки.

### 7.3.2. Фазові виміри

Фазовий метод має істотну перевагу перед далекомірними кодами за точністю виміру дальності до НКА. Платою за це є суттєве ускладнення процедури обчислень. Під фазовими вимірами розуміється миттєве визначення фази несучої радіохвилі, що надійшла від НКА і порівняння з фазою хвилі, що генерована у навігаційному приймачі. При цьому передбачається, що навігаційна радіохвиля і місцева радіохвиля когерентні. За умови, що початкові фази коливань однакові, фаза несучої навігаційної радіохвилі  $\Phi_{\text{нка}}$  буде відставати від фази хвилі навігаційного приймача  $\Phi_{\text{пп}}$  на величину, пропорційну часу  $\tau$  поширення хвилі на відстань  $D$  від НКА до навігаційного приймача. Причому різниця фаз буде становити деяке ціле число фаз  $N_{\phi}$  і певну частку неповної фази  $\Phi_{\phi}$ :

$$\Delta\phi = \Phi_{\text{пп}} - \Phi_{\text{нка}} = \omega\tau = 2\pi f \frac{D}{c} = \frac{2\pi D}{\lambda},$$

звідки

$$D = \Delta\varphi\lambda / 2\pi = (N_\varphi + \Phi_\varphi)\lambda.$$

Фактично, є можливість вимірити тільки величину  $\Phi_\varphi$ , і якщо довжина хвилі  $\lambda = 19$  см, то вимір здійснюється саме у межах цих 19 см. Визначення цілої кількості фаз  $N_\varphi$ , яких з урахуванням висоти польоту супутників  $N_\varphi > 10^8$ , є складною задачею, яка не має однозначного розв'язку. Процес знаходження цілої кількості фаз має назву розв'язування неоднозначностей фазових вимірів.

Для вирішення цієї проблеми використовують декілька способів:

- класичний двоетапний метод вимірювань, який припускає на першому етапі виконання великої кількості надмірних вимірювань, а на другому – статистичний аналіз отриманих даних і визначення найвірогіднішого значення фазової неоднозначності;
- модифікація класичного методу, яка відрізняється тим, що під час оброблення результатів вимірювань проводиться багаторічна калманівська фільтрація і вибирається група фільтрів Калмана з оптимальними властивостями;
- метод заміни антен, коли спостереження виконуються двома різними приймачами на двох пунктах у дві різні епохи. При вимірюваннях у другу епоху проводиться заміна антен приймачів;
- метод визначення неоднозначності On The Fly, коли для визначення цілого числа періодів фази використовують лінійні комбінації сигналів L1 і L2 (суми і різниці).

### **7.3.3. Визначення вектора швидкості**

В основу визначення вектора швидкості споживача покладено виміри за радіальними швидкостями супутників відносно навігаційного приймача, тобто за швидкостями зміни відстаней між НКА і навігаційним приймачем. У свою чергу, радіальні швидкості визначаються завдяки ефекту доплерівського зсуву частоти. Швидкість зміни відстані між супутником і приймачем при цьому визначається як:

$$\dot{D} = \frac{c\Delta f_d}{f},$$

де  $\Delta f_d$  – доплерівський зсув частоти;  $f$  – несуча частота навігаційного радіосигналу. У будь-який момент часу відстань від навігаційного приймача до  $i$ -го НКА визначається рівнянням повер-

$$\text{хні положення } D_i = \sqrt{(x_{\text{нка}} - x_{\text{нп}})^2 + (y_{\text{нка}} - y_{\text{нп}})^2 + (z_{\text{нка}} - z_{\text{нп}})^2},$$

де  $x_{\text{нка}}, y_{\text{нка}}, z_{\text{нка}}$  – координати  $i$ -го НКА;  $x_{\text{нп}}, y_{\text{нп}}, z_{\text{нп}}$  – координати навігаційного приймача. Диференціюючи це рівняння за часом, одержуємо:

$$\dot{D}_i = \frac{(x_{\text{нка}} - x_{\text{нп}})(\dot{x}_{\text{нка}} - \dot{x}_{\text{нп}}) + (y_{\text{нка}} - y_{\text{нп}})(\dot{y}_{\text{нка}} - \dot{y}_{\text{нп}}) + (z_{\text{нка}} - z_{\text{нп}})(\dot{z}_{\text{нка}} - \dot{z}_{\text{нп}})}{D_i},$$

де  $\dot{x}_{\text{нка}}, \dot{y}_{\text{нка}}, \dot{z}_{\text{нка}}$  – швидкості зміни координат  $i$ -го НКА;  $\dot{x}_{\text{нп}}, \dot{y}_{\text{нп}}, \dot{z}_{\text{нп}}$  – швидкості зміни координат навігаційного приймача. Тобто для визначення компонент вектора швидкості споживача необхідно знати: вектори координат і швидкості трьох НКА, а також координати споживача, які можна отримати, якщо виміряти радіальні швидкості  $\dot{D}_i$  протягом деякого часу  $t$ , а потім обчислити інтеграл [8].

Але у зв'язку з тим, що у приймачі частота навігаційного радіосигналу, що надходить від супутника, може порівнюватися не з її номінальним значенням на орбіті, а лише з тією частотою, яку має відповідний сигнал у самому приймачі, то практично буде визначена не радіальна швидкість, а радіальна псевдошвидкість, похибка якої визначається нестабільністю генератора навігаційного приймача відносно генератора НКА. Крім цього, можливі частотні зсуви несучої у каналі поширення радіохвиль та певні похибки вимірювального пристрою навігаційного приймача.

Реалізація наведених вимірів вимагає знання необхідної інформації про координати супутників, яку отримують у процесі оброблення ефемеридної інформації після дешифрування навігаційного повідомлення. У процедурі позиціонування для отримання оцінки навігаційних параметрів використовуються сигнали від усіх НКА, що знаходяться у зоні радіовидимості навігаційного приймача [5], аналіз яких дозволяє вибрати оптимальне сузір'я.

Визначення координат і вектора швидкості споживача здійснюється за допомогою розв'язування системи рівнянь здійснених вимірів до НКА, що входять у сузір'я спостереження.

***Питання для самоконтролю:***

- 1. Які параметри навігаційного сигналу відносяться до інформаційних?*
- 2. У чому принципова різниця селекції навігаційних радіосигналів GPS і ГЛОНАСС?*
- 3. Як здійснюється пошук навігаційного радіосигналу?*
- 4. Чим визначається псевдодальність при кодових вимірах?*
- 5. Чому фазові виміри мають більшу точність, ніж кодові?*
- 6. Яким чином здійснюється визначення вектора швидкості споживача?*

## Розділ 8. РОЗВ'ЯЗУВАННЯ НАВІГАЦІЙНИХ ЗАДАЧ

Для розв'язування задачі позиціонування об'єктів навігації можуть застосовуватись два основні види радіонавігаційних параметрів – час затримки поширення сигналу від НКА до навігаційного приймача і зсув несучої частоти сигналу, обумовлений ефектом Доплера. До цих вимірів можуть додаватися різномірні похибки, що визначаються, переважним чином, завадами на трасі поширення або системно-апаратними помилками. Залежно від цього існують певні методи розв'язування навігаційної задачі і режимів навігаційних спостережень, які дозволяють отримати певний розв'язок, що задовольняють висунутим вимогам точності.

### 8.1. Методи розв'язування навігаційних задач

**Навігаційною задачею в СРНС називається знаходження просторово-часових координат споживача ( $x, y, z, t$ ) і складових вектора його швидкості (як похідна від координат споживача за часом), що в сукупності називається вектором споживача [12].**

Нагадаємо, що вихідними даними для розв'язування навігаційних задач є радіонавігаційні параметри (затримка сигналу  $\tau$ , доплерівський зсув частоти  $\Delta f_d$ ) і навігаційне повідомлення (дані альманаху й ефемерид). Геометричні параметри, що відповідають радіонавігаційним параметрам, а саме дальність  $D_i$  до  $i$ -го НКА і радіальна швидкість наближення  $V_i$  до  $i$ -го НКА, прийнято називати навігаційними параметрами. **Функціональна залежність між навігаційними параметрами і вектором споживача називається навігаційною функцією.**

Є декілька різних методів розв'язування навігаційних задач, що залежить від радіонавігаційного параметра обраного для рішення задачі і відповідного алгоритму обробки одержаних навігаційних параметрів. До основних методів належать:

- далекомірний метод;
- псевдодалекомірний метод;
- різницево-далекомірний метод;
- радіально-швидкісний (доплерівський) метод;
- псевдо-радіально-швидкісний (псевдодоплерівський) метод;
- різницево-радіально-швидкісний метод;
- комбіновані методи.

У загальному випадку місцеположення точки позиціонування об'єкта навігації визначається перетином двох ліній положення або трьох поверхонь положення. В частинному випадку, у зв'язку з наявністю явища нелінійності поверхонь і ліній положення, може спостерігатися перетин ліній (або поверхонь) у двох точках. У цьому випадку задачу позиціонування розв'язують проведенням надмірних вимірювань і одержання додаткових навігаційних параметрів.

**Далекомірний метод** є найпростішим методом, який також називають методом лінійних зарубок. Сутність цього методу полягає в наступному (рис. 8.1): є дальність  $D_i$  між навігаційним приймачем і  $i$ -м НКА, яка утворює поверхню положення споживача, яка має вигляд сфери й описується рівнянням:

$$D_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2},$$

де  $x_i, y_i, z_i$  – миттєві координати  $i$ -го НКА;  $x, y, z$  – координати споживача. Відповідно до принципів супутникової трilaterації позиціонування споживача визначаються точкою перетину декількох сфер, кількість яких залежатиме від апріорних знань споживачем власних координат.

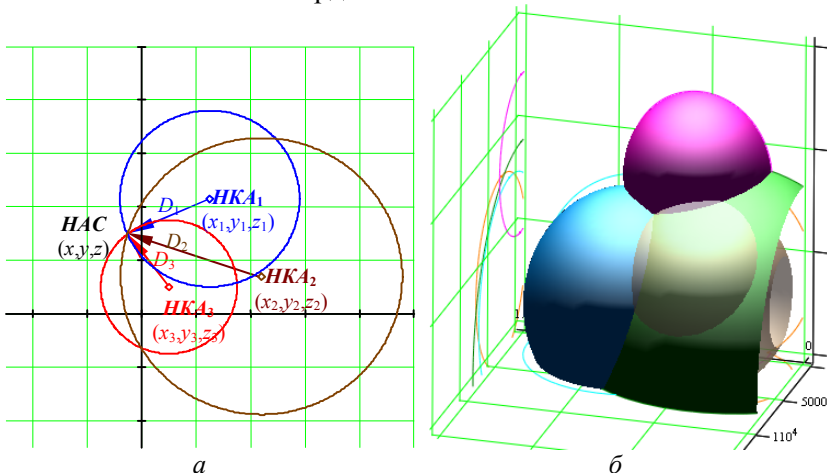


Рис. 8.1. Сутність далекомірного методу: а – позиціонування НАС трьома навігаційними параметрами; б – позиціонування НАС чотирма навігаційними параметрами

У загальному випадку, якщо споживач знаходиться на земній поверхні, тобто априорі відомі координати висоти, кількість поверхонь положення не може бути менше трьох. У випадку абсолютно невідомих координат кількість поверхонь положення не може бути менше чотирьох. При цьому координати НАС при спостереженні за чотирма НКА будуть визначатися системою рівнянь поверхонь положення:

$$\begin{cases} D_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2}, \\ D_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2}, \\ D_3 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2}, \\ D_4 = \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2}. \end{cases} \quad (8.1)$$

Передбачається, що всі величини узяті в той самий момент часу. Для розв'язування системи рівнянь з трьома невідомими координатами цілком достатньо трьох рівнянь. Система (8.1) є перевизначеною, і її розв'язання дає шукані координати положення споживача  $x, y, z$ .

У дійсності, до цієї системи вносяться певні похибки, які утворюються внаслідок розходження бортових шкал часу і шкал часу споживачів  $\Delta t$ . Обчислена дальність буде відхилятися від реальної на певну величину  $D' = c\Delta t$ , при цьому виміряна дальність має назву псевдодальності. **Під псевдодальністю розуміють виміряну дальність  $D_{зм\ i}$  до  $i$ -го НКА, яка відрізняється від істинної дальності  $D_i$  на невідому, але постійну на час визначення навігаційних параметрів величину  $D'$ .** Отже,

$$D_{зм\ i} = D_i + D' = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + D'.$$

Чітка синхронізація шкал часу, як метод подолання цієї проблеми, суттєво ускладнює апаратну частину і використовується лише на контрольних і диференційних станціях. Подолання цієї складності у звичайних навігаційних приймачах здійснюється застосуванням псевдодалекомірного методу.



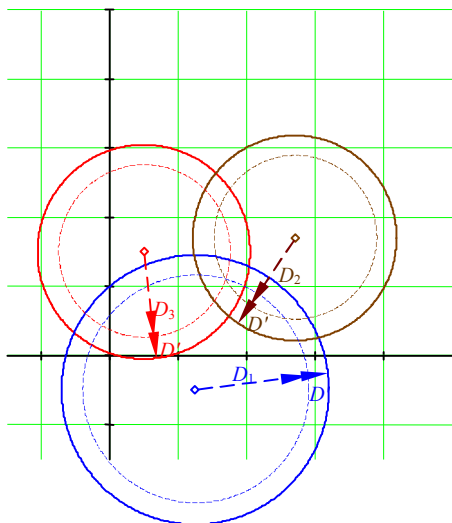


Рис. 8.2. Позичонування псевдодалекомірним методом

тобто мінімальна кількість навігаційних супутників при псевдодалекомірному методі не може бути менше чотирьох, за яких система рівнянь вважається визначеною.

Величина  $D'$  є однаковою для всіх рівнянь псевдодалекості, оскільки ця величина в цьому випадку визначається розбіжністю між БШЧ і ШЧС.

$$\begin{cases} D_{3m1} = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} + D', \\ D_{3m2} = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} + D', \\ D_{3m3} = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} + D', \\ D_{3m4} = \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2} + D'. \end{cases}$$

Одержана таким чином система чотирьох рівнянь має однозначний розв'язок, і, отже, координати споживача визначаються як точка перетину чотирьох поверхонь положення. Аналітичне знаходження постійної похибки  $D' = c\Delta t$  дає змогу корегування шкали часу споживача відносно бортової шкали часу на величину  $\Delta t$ .

**Різницево-далекомірний метод** заснований на вимірюванні різниці дальностей від споживача до сузір'я з 3–4 НКА. Застосовують метод за наявності у далекомірних методах невідомої величини  $D'$ . За умови постійності  $D'$  для вимірів до будь-якого НКА різниці псевдодальностей дорівнюють різницям істинних дальностей:

$$D_{3M1} - D_{3M2} = (D_1 + D') - (D_2 + D') = D_1 - D_2.$$

При цьому НКА залежно від черговості отримання від них сигналу отримують назви ведучого ( $A$ ) і веденого ( $B$ ). Відстань між ведучим і веденим НКА називають базою вимірювальної системи. Обчислена різниця дальностей утворює поверхню положення об'єкта навігації, яка є поверхнею двопорожнинного гіперболоїда обертання, фокусами (центрами маси) якого є кінці бази або координати двох НКА (рис. 8.3).

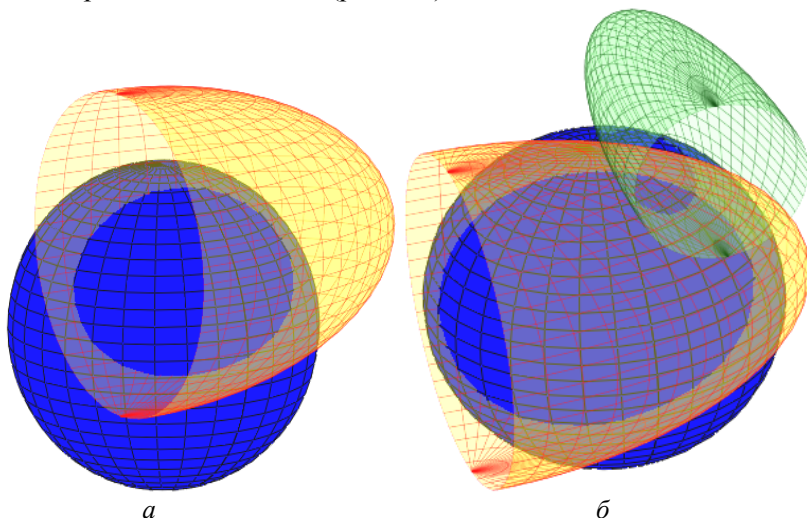


Рис. 8.3. Різницево-далекомірний метод позиціонування: *а* – формування лінії положення НАС при перетині земної поверхні з гіперболою обертання; *б* – позиціонування НАС двома гіперболами обертання

Перетин гіперболоїда з поверхнею Землі дає ізолінію – складну криву, що близька за формою до сферичної гіперболи (рис. 8.3, *а*). НАС буде знаходитися на цій гіперболі. Неоднозначність позиціонування НАС розв'язується за допомогою проведення додаткового виміру різниць сигналів від інших НКА. Точкою позиціонування буде точка перетину трьох (чи більше) гіперболоїдів обертання.

Якщо відстань від НКА до НАС велика в порівнянні з базою, то гіперболоїд обертання навколо точки споживача практично збігається зі своєю асимптотою – конусом, вершина якого збігається із серединою бази. Точність визначення координат споживача при використуванні цього методу така ж, як і у псевдодалекомірному.

Вадою цього методу є неможливість корегування шкали часу споживача.

**Радіально-швидкісний (доплерівський) метод** заснований на вимірюванні трьох радіальних швидкостей переміщення НАС щодо трьох НКА (рис. 8.4). Фізичною основою методу є залежність радіальної швидкості НАС щодо НКА від координат і швидкості НКА. Диференціюючи за часом рівняння поверхні положення, сформованої далекомірним методом, одержуємо:

$$\dot{D}_i = \frac{(x_{\text{нка}} - x_{\text{нп}})(\dot{x}_{\text{нка}} - \dot{x}_{\text{нп}}) + (y_{\text{нка}} - y_{\text{нп}})(\dot{y}_{\text{нка}} - \dot{y}_{\text{нп}}) + (z_{\text{нка}} - z_{\text{нп}})(\dot{z}_{\text{нка}} - \dot{z}_{\text{нп}})}{D_i},$$

де  $\dot{x}_{\text{нка}}, \dot{y}_{\text{нка}}, \dot{z}_{\text{нка}}$  – швидкості зміни координат  $i$ -го НКА;  $\dot{x}_{\text{нп}}, \dot{y}_{\text{нп}}, \dot{z}_{\text{нп}}$  – швидкості зміни координат навігаційного приймача.

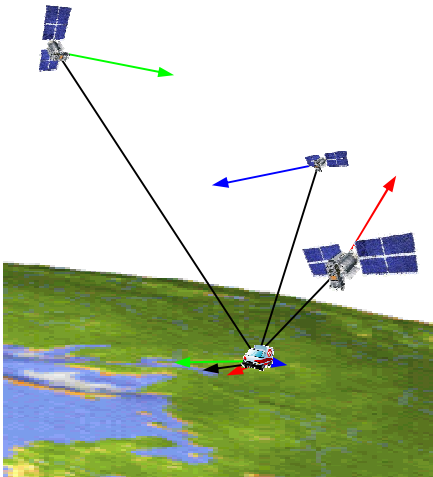


Рис. 8.4. Доплерівський метод позиціонування

Тобто для визначення компонент вектора швидкості споживача  $\vec{V}_p = \{\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}\}$  необхідно знати: вектори координат і швидкості трьох НКА, а також координати споживача, які можна отримати, якщо виміряти радіальні швидкості  $\dot{D}_i$  протягом деякого часу  $t$ , а потім обчислити інтеграл.

Недоліком цього методу є неможливість обчислення вектора положення в реальному масштабі часу. Крім того, у середньовисотних СРНС повільні зміни радіальної швидкості

приводять до малих значень різниць в алгоритмах навігаційних обчислень і, як наслідок, до зниження точності обчислень. Додат-

ковим недоліком методу є необхідність наявності високостабільного еталона частоти, оскільки будь-яка нестабільність частоти призводить до неконтрольованої зміни доплерівського зсуву частоти і до додаткових помилок вимірювання складових швидкості споживача.

**Псевдо-радіально-швидкісний (псевдодоплерівський) метод.** Сутність псевдодоплерівського методу аналогічна псевдодалекомірному – розв’язування навігаційної задачі за наявності певної похибки у вимірах. Псевдодоплерівський метод дозволяє визначити вектор швидкості споживача у присутності невідомого зсуву частоти сигналу, наприклад, через нестабільність еталона частоти як передавачів сигналу, так і приймача. При цьому зсув шкали часу передавачів повинен бути системним, тобто однаковим для усіх НКА, за якими ведеться спостереження. За наявності невідомого зсуву вираз для радіальних швидкостей можна представити у вигляді двох складових:

$$\begin{aligned} \dot{D}_{\text{змі}} &= \dot{D}_i + \dot{D}_l = \\ &= \frac{(x_{\text{НКА}} - x_{\text{НП}})(\dot{x}_{\text{НКА}} - \dot{x}_{\text{НП}}) + (y_{\text{НКА}} - y_{\text{НП}})(\dot{y}_{\text{НКА}} - \dot{y}_{\text{НП}}) + (z_{\text{НКА}} - z_{\text{НП}})(\dot{z}_{\text{НКА}} - \dot{z}_{\text{НП}})}{D_i} + \dot{D}_l, \end{aligned}$$

де  $\dot{D}_l = \lambda \Delta f_{\text{доп}l}$  – доплерівський зсув частоти, спричинений нестабільністю еталона частоти  $\Delta f_l$ .

Як і у псевдодалекомірному методі, де присутні чотири невідомі змінні, для знаходження вектора швидкості споживача  $\vec{V}_p = \{\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}\}$  і відповідної поправки необхідно провести вимірювання по чотирьох НКА і розв’язати систему з чотирьох рівнянь.

Під час її розв’язування необхідно знати дальності  $D_i$  і відповідно координати споживача  $(x, y, z)$ , тобто псевдодоплерівський метод застосовується після одного з методів, який дозволяє одержати миттєві координати об’єкта навігації.

**Різницево-радіально-швидкісний метод.** У цьому методі застосовується підхід, який використовується у різницеводалекомірному методі. При цьому обчислюється як мінімум три різниці  $\Delta \dot{D}_{ij} = (\dot{D}_i + \dot{D}') - (\dot{D}_j + \dot{D}') = \dot{D}_i - \dot{D}_j$  двох радіальних швидкостей НКА.

$$\Delta \dot{D}_{ij} = \frac{(x_{\text{нка } i} - x_{\text{нп}})(\dot{x}_{\text{нка } i} - \dot{x}_{\text{нп}}) + (y_{\text{нка } i} - y_{\text{нп}})(\dot{y}_{\text{нка } i} - \dot{y}_{\text{нп}}) + (z_{\text{нка } i} - z_{\text{нп}})(\dot{z}_{\text{нка } i} - \dot{z}_{\text{нп}})}{D_i} - \frac{(x_{\text{нка } j} - x_{\text{нп}})(\dot{x}_{\text{нка } j} - \dot{x}_{\text{нп}}) + (y_{\text{нка } j} - y_{\text{нп}})(\dot{y}_{\text{нка } j} - \dot{y}_{\text{нп}}) + (z_{\text{нка } j} - z_{\text{нп}})(\dot{z}_{\text{нка } j} - \dot{z}_{\text{нп}})}{D_j}$$

Обчислення можна здійснювати як відносно одного супутника, так і відносно різних супутників. Якщо припустити, що нестабільності еталонів частоти однакові для всіх НКА або, що найбільш імовірно, має місце нестабільність частоти навігаційного приймача  $\Delta f_i$ , то застосування цього методу дозволяє компенсувати невідомий зсув частоти.

Поверхні положення об'єкта навігації є поверхнями тіла обертання, фокусами яких є координати центрів мас  $i$ -го і  $j$ -го НКА. Так само як і для "далекомірних методів", точність визначення складових вектора швидкості в цьому методі збігається з точністю визначення тих самих складових у псевдодоплерівському методі. Перевагою методу є його нечутливість до нестабільності еталонів частоти.

**Комбіновані методи** засновані на використанні додаткових вимірювальних пристроїв, що дозволяють вимірювати координати НАС без використання СРНС. Так, на борту літака, за наявності висотоміра, достатньо використовувати далекомірні виміри лише до трьох супутників, отримуючи три сфери положення НАС відносно НКА й одну сферу положення відносно центра Землі (рис. 8.5).

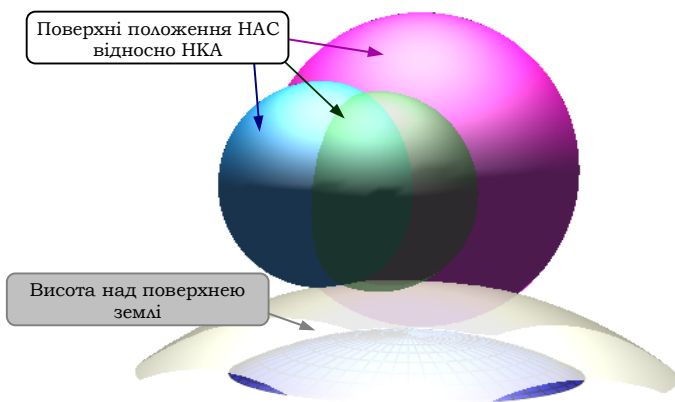


Рис. 8.5. Комбінований метод

До комбінованих методів позиціонування ОС також відносяться такі комбінації вищенаведених методів, як комбінації одночасних і послідовних вимірювань або тільки послідовних вимірювань.

Наприклад, замість вимірювань чотирьох псевдодальностей на момент часу  $t_1$  здійснюється вимір псевдодальностей до двох супутників, і на момент часу  $t_2$ , коли супутники зайняли нове положення, здійснюється вимір ще двох псевдодальностей.

## 8.2. Методи і режими супутникових вимірювань

Є декілька методів і режимів здійснення спостережень за НКА, які відрізняються складом сегмента споживача, часом спостереження та безпосередньо способами організації спостереження.

**Під методом супутникових вимірювань розуміється система організаційних заходів і технічних способів розв'язування задачі позиціонування.** Різноманітність наявних методів пов'язана з декількома взаємовиключними вимогами, що висуваються до результатів або ресурсів здійснення позиціонування. Так, наприклад, жорсткі вимоги точності позиціонування вимагають наявності певного часового ресурсу на проведення вимірювань або існування додаткових підсистем підвищення точності позиціонування. Відсутність цих двох складових в умовах обмеження доступу до високоточних кодів унеможливує координатне визначення з високою точністю.

Так чи інакше, всі методи поділяються на **абсолютні (точкові), диференційні і відносні** [8], класифікація яких наведена на схемі (рис. 8.6).

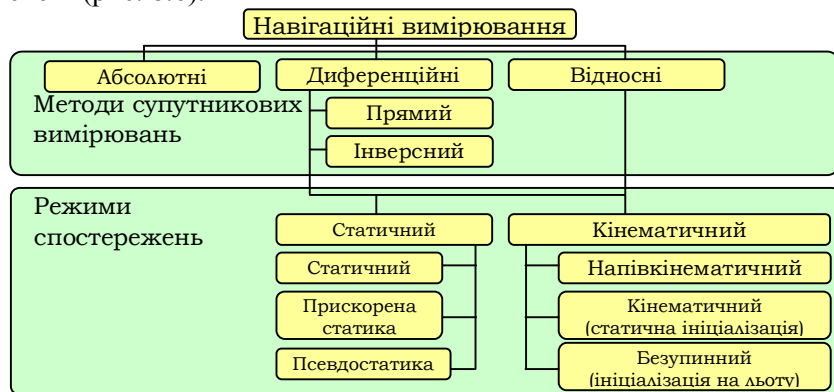


Рис. 8.6. Класифікація методів і режимів супутникових вимірювань

Кожний з цих методів придатний для позиціонування об'єкта навігації як за кодovими псевдодальностями, так і за фазовими вимірами. Спостереження можуть здійснюватися як у реальному часі (отримання кінцевих значень позиціонування безпосередньо в точці спостереження), так і при постобробці (результати обчислюються поза точкою спостереження).

Вибір конкретного способу залежить від таких чинників:

- необхідний рівень точності;
- технічні можливості приймача і наявність відповідного програмного забезпечення;
- характер навколишньої місцевості і метеоумови (радіозавади, перешкоди на шляху поширення радіохвилі, багатопроменевість, гроза);
- наявність обмежень на переїзд між спостережуваними пунктами і відстань між ними;
- конфігурація і кількість спостережуваних супутників;
- наявність засобів зв'язку.

### **8.2.1. Методи супутникових вимірювань**

**Абсолютні методи** ґрунтуються на визначенні вектора об'єкта навігації (просторово-часових характеристик і складових вектора руху) виключно за спостереженнями за НКА незалежно від інших приймачів (рис. 8.7). Розв'язання задачі позиціонування здійснюється з використанням методу зарубок (за відомими координатами НКА).

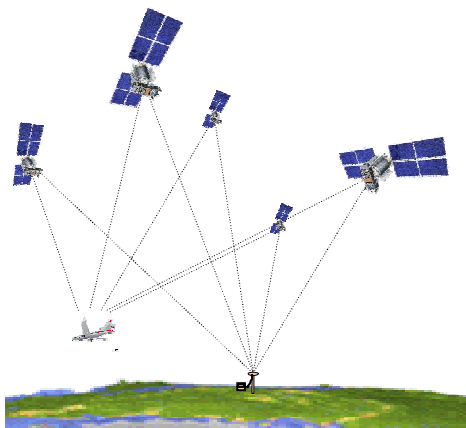


Рис. 8.7. Абсолютний метод супутникових визначень

Обчислення здійснюється безпосередньо в навігаційному приймачі. Точність абсолютного методу за кодovими вимірами визначається можливостями Служби точного позиціонування (PPS) або Служби стандартного позиціонування (SPS) [8].

За умов вимкнення режиму селективного доступу точність позиціонування для цивільних споживачів сягає 15 метрів у 95 % випадків. Фазові виміри в абсолютному методі застосовуються дуже рідко, що пов'язано зі складністю своєчасного отримання точних ефемерид НКА.

*Диференційні та відносні методи* (рис. 8.8) передбачають використання як мінімум двох приймачів, один з яких має чітке просторове прив'язування з відомими координатами, які обчислені з високою точністю. Такий приймач називається *опорною, базовою, перманентною* або *референційною станцією* (base or reference station).

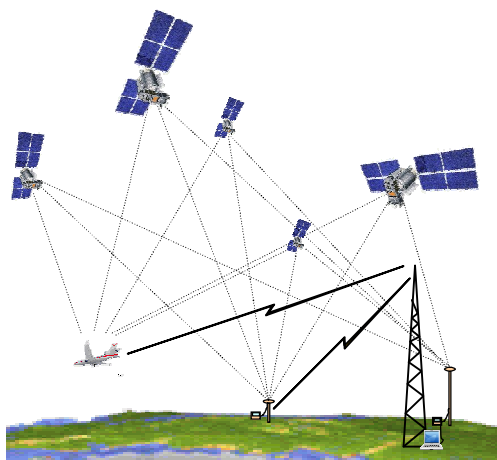


Рис. 8.8. Диференційний метод супутникових визначень

Другий приймач є мобільним і називається *ровер* (rover), мобільна станція (MC, MS), віддалена рухома станція, і, відповідно, призначений для визначення невідомих координат простору. Обидва приймачі здійснюють спостереження тих же самих супутників. В основу цих методів покладений принцип корельованих помилок, тобто вважається, що неточності вимірних радіонавігаційних параметрів однакові як для референційної станції, так і для ровера.



Існують два основних підходи реалізації диференційного і відносного методу, які відрізняються кількістю застосовуваних опорних станцій:

- променевий підхід – пункти позиціонування координуються з одного з опорних пунктів (рис. 8.9, а);
- мережний підхід – пункти позиціонування координуються з мережі просторово-розподілених референцних станцій (рис. 8.9, б).

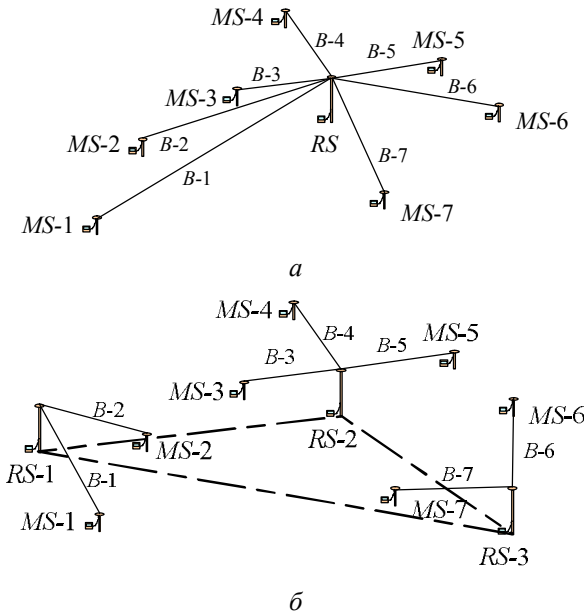


Рис. 8.9. Методи побудови диференційних мереж:  
а – променевий; б – мережний

До недоліків променевого підходу слід віднести недостатню надійність критеріїв оцінювання точності координат, що визначаються. Максимальна точність геодезичних побудов досягається тільки при мережному методі вимірювань.

У **диференційному методі** (Differential GPS, DGPS) за допомогою спостережень, які виконуються референчним приймачем, обчислюється похибка вимірів, що виникає внаслідок різноманітних завад на трасі поширення радіохвиль. Похибка обчислюється на ґрунті відомих точних координат НКА, точних координат референцного приймача і, відповідно, точно обчислених навігацій-

них параметрів. Різниця між обчисленими (істиною дальністю) і вимірними (псевдодальністю) навігаційними параметрами і складатиме похибку. При цьому ця похибка характерна саме для місця розташування референцного навігаційного приймача. Віддалення від цього місця характеризується зміною умов на трасі поширення навігаційного сигналу і, відповідно, появою іншої похибки, що пов'язано зі зміною довжини траси поширення радіохвиль або наявністю локальних неоднорідностей в атмосфері. Віддалення ровера від референцної станції на відстань до 10 кілометрів практично не відбивається на величині похибки.

Для реалізації цього методу між референцним приймачем та ровером повинен існувати зв'язок. Результати обчислення похибки у вигляді так званих диференційних поправок (differential corrections) передаються по каналу зв'язку до комп'ютера мобільного навігаційного приймача, де в подальшому враховуються при обчисленні його координат. Такий спосіб позиціонування одержав назву *прямий диференційний*. Канал зв'язку може бути організований засобами радіо- або супутникового зв'язку, засобами проводового зв'язку або їх комбінацією. Поправки до ровера можуть передаватися при постобробці або у режимі реального часу. Диференційні поправки мають властивість швидкого старіння, тому зазвичай разом з поправками передають дані про швидкість їх зміни.

Диференційний метод дозволяє одержати миттєві значення вимірюваних координат, тобто координатне визначення здійснюється в реальному часі. Точність позиціонування при цьому визначається віддаленістю від референцної станції, часом отримання відповідних поправок і зазвичай значно перевищує точність позиціонування при абсолютному методі. Диференційні поправки, застосовані до кодових визначень, забезпечують точність до дециметрового діапазону, до фазових вимірів – сантиметрового рівня.

Іншим різновидом диференційного методу є *інверсний диференційний метод* (IDGPS). Відмінність цього методу полягає в тому, що ровер передає необроблені дані спостережень референційній станції, на якій здійснюється обчислення похибки положення ровера. Цей режим має ту перевагу, що мобільному приймачу не потрібно виконувати великий обсяг обчислень.

У локальних диференційних системах (Local Area DGPS) обслуговування роверів здійснюється однією базовою станцією, при

цьому радіус зони обслуговування (при кодових визначеннях) може сягати 300–500 кілометрів.

Розширенням DGPS (у значенні локальних диференційних систем, Local Area DGPS) є метод *широкозонових диференційних систем* (Wide Area DGPS, WADGPS), де використовується мережа опорних референціальних станцій. WADGPS охоплює великі території (до 5000 км) і включає станції спостереження навігаційного поля (моніторингу) і, принаймні одну головну станцію управління, яка збирає поправки в дальності від мережі станцій навігаційних спостережень (моніторингу), обробляє ці дані й обчислює систему поправок. У подальшому диференціальні поправки передаються множині споживачів та станціям спостережень. У порівнянні з локальними диференціальними системами, WADGPS можуть викликати більшу часову затримку, що пов'язано із часовими витратами на передачу інформації від станцій спостереження до головної станції.

Одна з головних переваг WADGPS полягає в досягненні більш злагоженої точності в районі розгортання мережі. Іншими перевагами WADGPS є те, що можна охопити важкодоступні райони, наприклад, великі водні акваторії, які підтримуватимуться мережею на порівняно високому рівні цілісності і надійності в порівнянні з індивідуальною опорною станцією DGPS.

Поправки WADGPS генеруються з використанням двох основних способів (підходів), а саме, *підходу простору вимірювань* і *підходу просторового стану*. Спосіб простору вимірювань є відносно простим, в якому, враховуючи спостереження індивідуальних станцій, утворюється єдина система поправок. Точність у цьому способі залежить від відстані споживача до найближчої станції спостережень. Підхід просторового стану являє собою складнішу методику, за якою окремі помилки (орбітальні, тропосферні, іоносферні) моделюються й оцінюються в мережному розв'язку. Грунтуючись на цих помилках, обчислюють поправки у псевдодальності для кожної опорної станції. Таким чином, точність узгоджується територіально по всій мережі.

Подальшим розвитком мережі WADGPS є концепція *Віртуальної базової станції* (Virtual Reference Station, VRS). Тут споживач (рис. 8.10) одержує поправки або навіть параметри спостережень для неіснуючої (тобто віртуальної) опорної станції у вказаному споживачем положенні. Ця концепція є необхідною

умовою для застосувань режиму RTK, який вимагає коротких базових відстаней до опорних станцій.

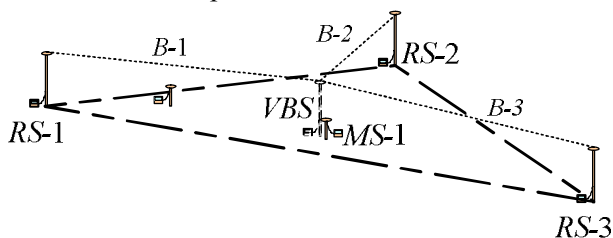


Рис. 8.10. Концепція віртуальної базової станції

**Відносний метод** також передбачає використання референцної станції і роверного приймача, але обчислення результатів одночасних вимірювань обох приймачів здійснюється сумісно на одному пункті. Розв'язком задачі позиціонування у відносному методі є знаходження **вектора базової лінії** – лінії, що з'єднує референцний і роверний навігаційний приймач. Одночасність вимірювань підвищує точність позиціонування ровера, оскільки виміри здійснені в однакових умовах мінливого за часом стану атмосфери, але умови спостережень унеможливають отримання миттєвого розв'язку задачі позиціонування.

### 8.2.2. Режими спостережень

Розв'язування задачі позиціонування для диференційного і відносного методів можливе як для стаціонарного під час спостережень ровера (режим **Статики**), так і для рухомого ровера (режим **Кінематики**). Ці режими відрізняються технологією виконання робіт і одержуваною точністю обчислення вектора бази.

**Статичний режим** (Static Positioning) є найбільш точним і трудомістким, причому точність позиціонування залежить від часу проведення вимірювань. Необхідність тривалих вимірювань пов'язана з накопиченням статистики, розв'язку неоднозначності фазових вимірів і усунення похибок вимірів. Проведення спостережень протягом 5 хвилин забезпечують дециметрову точність. Отримання максимальної точності досягається проведенням фазових вимірювань диференційним або відносним методом у статичному режимі. Ця комбінація методів і режимів вимірювань використовується в основному в геодезії. Тривалість проведення вимірювань двома приймачами становить близько години. Спо-

стерезення за сузір'ям супутників здійснюється з інтервалом від 1 секунди до 5 хвилин. Тимчасова втрата спостереження за НКА для режиму статики не критична.

Отримана похибка в такому режимі, при відстежуванні 5 НКА на базовій лінії 1 км, становить близько 5 мм. У табл. 8.1 наведені вирази для обчислення можливої середньоквадратичної похибки під час проведення фазових вимірів диференційним або відносним методом у статичному режимі.

Таблиця 8.1

*Залежність похибки вимірів від довжини базової лінії*

| Вид вимірювань | СКП, мм               | $D_{\text{км}}$ – довжина базової лінії |
|----------------|-----------------------|---|
| У плані        | $(5+1D_{\text{км}})$  | при $D_{\text{км}} < 10$ км             |
| У плані        | $(5+2D_{\text{км}})$  | при $D_{\text{км}} > 10$ км             |
| За висотою     | $(10+2D_{\text{км}})$ | –                                       |

Збільшення тривалості спостережень до 6 годин приводить до зменшення похибки більше ніж у 1,5 рази [4]. Сумісне спостереження НКА систем GPS і ГЛОНАСС призводить до зменшення необхідного часу спостережень для досягнення сантиметрової точності від 3 до 6 разів. На коротких базових лініях і при спостереженнях принаймні чотирьох або п'яти НКА з добрим геометричним чинником можна отримати результати на сантиметровому рівні точності при тривалості спостережень протягом всього декількох хвилин.

Для проведення вимірювань у статичному режимі використовуються як одночастотні приймачі (для вимірювання баз завдовжки до 10–15 км), так і двочастотні (для баз довше 15 км). Переваги двочастотних приймачів полягають у можливості адекватного моделювання ефекту дії іоносфери, а також меншої тривалості спостережень для досягнення заданої точності.

Статичний режим використовують для розв'язання задач контролю національних і континентальних геодезичних мереж, моніторингу тектонічних рухів земної поверхні, спостереження за станом гребель, фундаментів атомних електростанцій та інших споруд і об'єктів.

Різновидом статичного режиму є режим *прискореної (швидкої) статики* (Fast, Rapid Statics). Основна відмінність полягає у зменшенні загальної тривалості навігаційних спостережень, що визначається мінімально необхідним часом розв'язування неоднозначності вимірів. Тривалість спостережень пов'язана з кількістю НКА, що спостерігаються. Так, при спостереженні 5 НКА,

тривалість визначення фазових неоднозначностей становить близько 20 хвилин, а додавання ще одного НКА зменшує тривалість спостереження вдвічі.

Інший різновид статичного режиму має назву *псевдостатики* (Pseudo-Static Positioning) або *режим вимірювань з поверненням* (Reoccupation). У цьому режимі ровер здійснює нетривалі спостереження (близько 5–10 хвилин) поетапно на кожному з пунктів, що підлягають позиціонуванню (рис. 8.11).

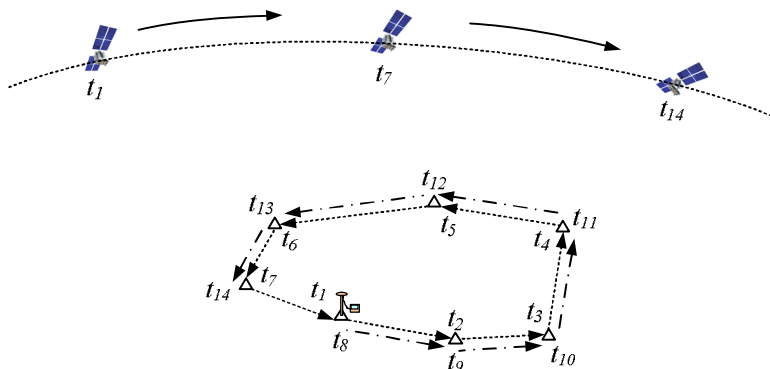


Рис. 8.11. Режим вимірювання з поверненням

Після закінчення першого циклу вимірів за всіма пунктами здійснюється повторний цикл. Результатом циклічності вимірів є наявність безперервних статистичних даних на референційній станції та статистики спостережень з певним часовим інтервалом на ровері. Точність одержуваних результатів, як правило, відповідає точності статичного методу. Для спостережень можуть використовуватися як одночастотні, так і двочастотні приймачі. Метод зручний, коли необхідно протягом короткого часу провести точне вимірювання координат великої кількості точок.

Режим вимірювань з поверненням є прийнятним у випадках спостереження невеликої кількості супутників. При цьому накопичується статистика при одночасному спостереженні малої кількості супутників, але обробка сукупності спостережень (різних циклів) фактично збільшує кількість НКА, які спостерігаються в різних частинах небосхилу, що покращує геометричний чинник. Також режим псевдостатики є корисним у випадках, якщо не вдається розв'язати неоднозначність фазових вимірів при першому сеансі спостережень

на пункті. Наступні повторювані спостереження об'єднуються, що дозволяє розв'язати шукану невизначеність.

Недоліком методу є необхідність точного планування графіка повторюваності вимірювань по пунктах.

**Кінематичний режим** використовується при проведенні знімальних і інших робіт для рухомого ровера, при цьому час спостереження в одній точці позиціонування мінімізується.

Метод ефективний при виконанні топографічної зйомки, коли за нетривалий час необхідно визначити координати великої кількості точок, при побудові цифрових моделей рельєфу, визначенні місцеположення об'єктів місцевості, що мають форму ламаної лінії (трубопроводи, дороги тощо).

Сутність кінематичного режиму проведення диференційних (відносних) вимірювань полягає у визначенні координат рухомого ровера відносно відомого базового вектора між двома пунктами. На початку вимірювань ровер ініціалізується (прив'язується) до кінця базового вектора (точки з відомими координатами). Ініціалізація (від англ. initiate – почати) на початку спостережень дозволяє розв'язати фазову невизначеність у ровері. Кількість НКА, що спостерігаються при проведенні ініціалізації, не повинна бути менше чотирьох. Використовують декілька способів ініціалізації [4]:

- положення базового вектора відомо з точністю до 5 см. Приймачі встановлюють на його кінцях і спостерігають декілька хвилин;
- базовий вектор невідомий. Його визначають статичним позиціонуванням;
- застосовують спосіб перестановки антен (Antenna Swapping). Антену одного приймача встановлюють над пунктом базової станції, антену іншого – осторонь на 5–10 м. Виконують вимірювання. Потім, не чіпаючи штативів, антени (приймачі) міняють місцями і знов виконують вимірювання. Після цього антени повертають на вихідні позиції і проводять вимірювання;
- ініціалізація “на льоту” (On The Fly – OTF). Початкове положення приймача визначають за псевдодальностями. Використовуючи середньоквадратичне відхилення псевдодальностей, оцінюють об'єм простору, що містить точні значення відстаней. Перебиранням варіантів у цьому просторі розраховують числа неоднозначності. Час розв'язування неоднозначностей становить декілька секунд.

Після ініціалізації ровера і проведення вимірювань спостереження за НКА не перериваються. У випадку переривання у спостереженнях (втрати навігаційних сигналів від будь-якого НКА з чотирьох спостережуваних НКА) позиціонування переривають, ініціалізацію ровера здійснюють з останнього пункту з відомими координатами. Процедуру вимірювання в кінематичному режимі здійснюють за спостереженнями за тим самим НКА.

Точність методу у разі використання фазових спостережень:

- для двочастотних приймачів (5 супутників і дві епохи спостережень):

- у плані:  $20 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км} * D$ ;
- по висоті:  $20 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км} * D$ ;

- для одночастотних приймачів:

- у плані:  $20 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км} * D$ ;
- по висоті:  $20 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км} * D$ .

Кінематичний режим є ідеальним при відстежуванні траєкторії рухомих транспортних засобів (наприклад, при профілізації доріг), рухомих судів, при визначенні місцеположень винесених у відкрите море платформ, при позиціонуванні літаків.

Є декілька різних видів кінематичного режиму:

- напівкінематичний режим “Stop & Go”;
- кінематичний режим зі статичною ініціалізацією;
- безупинний (кінематичний) режим з ініціалізацією “на льоту”.

**Кінематичний режим “стій-йди”, напівкінематичний (Stop-and-Go Kinematic Positioning)** вимагає виконання короткої процедури ініціалізації з метою визначення цілочисельних неоднозначностей фаз. Після цього навігаційний приймач референційної станції продовжує безперервно спостерігати на пункті з відомими координатами, а ровер перевозиться (в увімкненому стані) на перший і наступні пункти позиціонування, в яких здійснюються одноразові навігаційні спостереження протягом приблизно 1 хвилини.

Кінематичний режим “стій-йди” є ідеальним для малих площ, на яких точки спостережень розташовуються поряд один з одним і на яких відсутні перешкоди для проходження радіосигналів від супутників, і дозволяє отримати положення пунктів так само швидко, як і у разі використання електронного тахеометра при розв’язуванні топографічних задач.



**Кінематичний режим зі статичною ініціалізацією** (Kinematic with Static Initialization) схожий на попередній. Так само на базовому пункті з відомими координатами проводиться процедура ініціалізації, потім ровер переміщується в початковий пункт позиціонування і проводить там спостереження протягом декількох хвилин. Далі рухома платформа з приймачем починає рух по маршруту, при цьому навігаційне вимірювання виконуються безперервно під час руху з інтервалом 1 с. Параметри точності методу такі ж самі, що й у “Stop-and-Go”. Частіше за все кінематичний режим зі статичною ініціалізацією застосовується для отримання координат лінійних об’єктів типу доріг, річок тощо.

**Кінематичний режим з ініціалізацією “на льоту”** (Kinematic with On The Fly Initialization) не вимагає ініціалізації початкового розміщення ровера на референційній станції. Ця процедура виконується безпосередньо у русі транспортного засобу по маршруту позиціонування. При цьому зрив спостережень за НКА не потребує зупинки для проведення процесу ініціалізації. Параметри точності позиціонування кінематичного режиму з ініціалізацією “на льоту” не відрізняються від інших кінематичних методів.

Узагальнена порівняльна характеристика методів супутникових вимірювань дається в табл. 8.2.

Таблиця 8.2

*Узагальнена характеристика методів супутникових вимірювань*

| Назва методу         | Рівень точності  | Час спостережень | Особливості   |
|----------------------|--|------------------|---|
| 1                    | 2  | 3                | 4   |
| Статичний абсолютний | 5-10 м   | $t < 1$ хв       | 1 приймач в автономному режимі  |
| Статичний відносний  | Міліметрова, відносна $10^{-6}$ - $10^{-7}$ м<br>$\Delta L = 5\text{мм} + 1\text{мм/км} * D$<br>$\Delta h = 10\text{мм} + 1\text{мм/км} * D$ | $t > 60$ хв      | 2 приймачі (референційний і ровер), фазові вимірювання  |
| Швидкої статистики   | Сантиметрова, відносна $10^{-6}$ м   | $t = 5-10$ хв    | 2 приймачі, комбінація вимірювань за псевдодальностями і за фазами несучих частот для швидкої ініціалізації |
| Псевдостатичний      | Сантиметрова   | $t = 2-5$ хв     | 2 приймачі, повторні статичні знімання через 1 годину, що забезпечує зміну сузір’я супутників               |

Закінчення табл. 8.2

| 1   | 2   | 3  | 4   |
|---|---|--|---|
| Напівкінематичний (Stop-and-Go)   | Сантиметрова,<br>$\Delta L=20\text{мм}+1\text{мм/км}\cdot D$<br>$\Delta h=20\text{мм}+1\text{мм/км}\cdot D$ | $t < 5$ хв   | 2 приймачі, швидка ініціалізація, переміщення ровера без вимикання для накопичування епох, вимірювання у статистиці |
| Кінематичний абсолютний   | 10–100 мм   | У русі,<br>$t < 1$ хв                              | 1 приймач в автономному режимі  |
| Кінематичний відносний<br>• за кодovими вимірами<br>• за фазами несучої | Метрова<br><br>Сантиметрова   | У русі,<br>$t < 1$ хв<br><br>У русі,<br>$t < 1$ хв | 2 приймачі (референційний і ровер)  |
| Безупинний (On The Fly)   | Дециметрова   | У русі,<br>$t < 1$ хв                              | 2 приймачі, ініціалізація в кінематичному режимі за кодovими вимірами   |

Отже, вибір методів і режимів позиціонування потрібно здійснювати, виходячи з мети зйомки, вимог до точності, надійності даних, наявної НАС, характеру місцевості і часу зйомки.

#### **Питання для самоконтролю:**

1. Що визначається навігаційною функцією?
2. Чим обумовлена поява псевдодальності?
3. Чи можна розв'язати задачу позиціонування псевдодалекомірним методом за наявності високої нестабільності бортової шкали часу для спостережуваних НКА?
4. Що є радіонавігаційним параметром у доплерівському методі позиціонування?
5. Чим обумовлена необхідність застосування псевдодоплерівського методу?
6. У чому принципова відмінність різницево-далекомірного і різницево-радіально-швидкісного методу позиціонування?
7. Чим обґрунтовується вибір способу позиціонування?
8. Яке головне призначення референційної станції?
9. У чому полягає головна відмінність променевого і мережного підходу в диференційному методі позиціонування?
10. Поясніть сутність концепції віртуальної базової станції.
11. Назвіть критерії вибору режиму спостереження.

## Розділ 9. ПОМИЛКИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ

*Процедура позиціонування об'єкта навігації супроводжується множиною факторів, від яких залежить кінцевий результат розв'язування задачі, а саме точність визначення вектора положення об'єкта навігації і необхідний час спостереження для досягнення бажаної точності. Крім застосування різноманітних методів і режимів виконання спостережень, використання допоміжних диференційних систем, важливим для одержання найкращих результатів є врахування можливих помилок, які супроводжують вимірювання радіонавігаційного параметра. Природа виникнення помилок різна, як і ступінь їх впливу, тому під час проведення високоточних супутникових вимірювань виникає необхідність ретельного дослідження впливу всіх можливих джерел помилок виконуваних вимірювань, особливостей їх прояву, обґрунтування і застосування методів і заходів їх мінімізації.*

### 9.1. Класифікація джерел помилок супутникових вимірювань

При високоточному позиціонуванні прояв помилок позначається на величині похибки визначення істинних координат НАС, усунення або зведення до мінімуму якої потребує збільшення часу проведення навігаційних спостережень або застосування додаткових заходів підвищення точності. Залежно від впливу на хід вимірювань помилки поділяються на дві основні групи:

- випадкові помилки (шум);
- систематичні помилки (зсуви).

Виключення випадкових помилок з результатів вимірювань здійснюється за рахунок збільшення часу спостережень для отримання великого масиву надмірних спостережень, обробка якого дозволяє з високою ймовірністю одержати точні координати об'єкта навігації.

Виключення систематичних помилок з результатів вимірювань, класифікація яких наведена на рис. 9.1, є більш складною задачею і вимагає застосування спеціальних методів обліку і послаблення їх впливу. Використання надмірних спостережень у цьому разі не призведе до бажаного результату, оскільки більшість даних одержаного масиву (внаслідок систематичності похибки) буде мати хибні результати (так звані зсуви). Серед розроблених методів виключення помилок найкращі результати отримуються у разі застосування методів моделювання, при яких

вивчається джерело і механізм дії помилки з метою подальшого введення компенсації в результаті вимірювань.

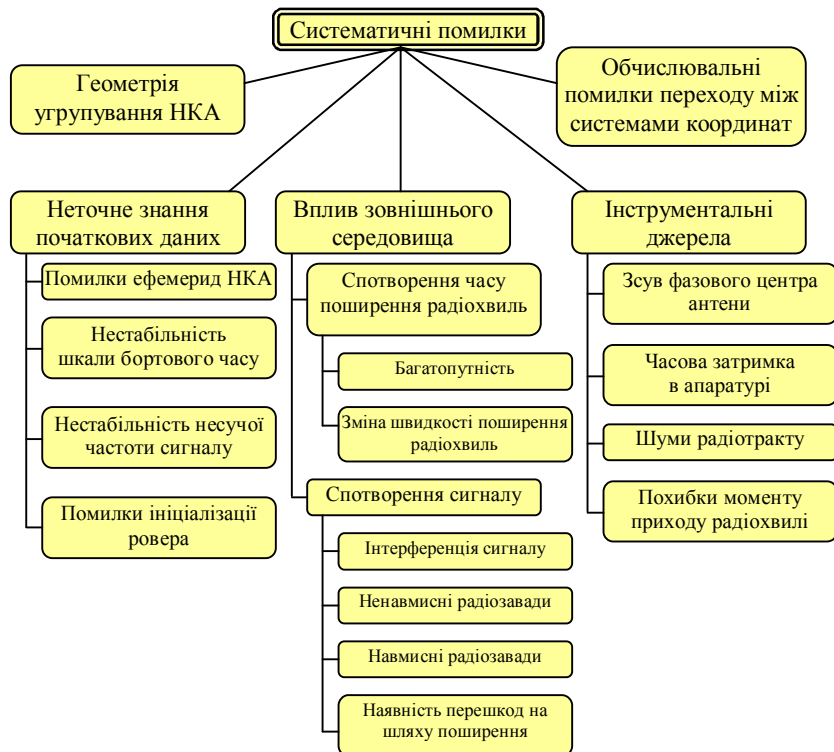


Рис. 9.1. Класифікація систематичних помилок

Джерела систематичних помилок поділяються на такі основні групи:

- помилки, пов'язані з неточністю знання початкових даних (неточне знання ефемерид; неточне знання системного часу; помилки ініціалізації ровера);
- помилки, обумовлені впливом зовнішнього середовища (дія атмосфери (іоносфери і тропосфери) на результати супутникових вимірювань; відбиття навігаційних радіосигналів від навколишніх об'єктів; затінення радіотраси);
- інструментальні джерела помилок (зсув фазового центра антени приймального пристрою; неврахування часової затримки під час проходження інформаційних сигналів через навігаційну

апаратуру; похибки, пов'язані з роботою реєструвальних пристроїв супутникових приймальних пристроїв);

- помилки, обумовлені геометричним чинником (особливостями розташування угруповання НКА, за яким ведеться спостереження);
- обчислювальні помилки переходу між системами координат (при переході до місцевих систем координат).

Загальний внесок різних джерел помилок при використанні навігаційного приймача геодезичного класу наведено в табл. 9.1 [23], при цьому загальна похибка, що наведена в табл. 9.1, не дорівнює сумі похибок.

Таблиця 9.1

*Внесок різних джерел помилок у точність позиціонування*

| Джерело помилок                              | Середньоквадратичне значення похибки, м |
|--|---|
| Нестабільність шкали бортового часу          | 6,5                                     |
| Часова затримка в апаратурі                  | 1,0                                     |
| Невизначеність просторового положення НКА    | 2,0                                     |
| Інші похибки космічного сегмента             | 1,0                                     |
| Помилки ефемерид НКА                         | 8,2                                     |
| Інші похибки сегмента контролю та управління | 1,8                                     |
| Іоносферна затримка                          | 4,5                                     |
| Тропосферна затримка                         | 3,9                                     |
| Шумова помилка приймача                      | 2,9                                     |
| Багатопроменевість                           | 2,4                                     |
| Інші помилки сегмента споживача              | 1,0                                     |
| <b>Загальна похибка</b>                      | <b>13,1</b>                             |

Випадкові помилки теж можуть виникати з зазначених причин, але їх поява носить мінливий характер і не несе ознаки системності. Усунення випадкових помилок здійснюється через збільшення часу навігаційних спостережень і накопичення статистики вимірів.

## 9.2. Неточне знання початкових даних

Розв'язування задачі позиціонування вимагає знання певних початкових даних, відносно яких здійснюються подальші розрахунки вектора споживача. До таких даних відносяться:

- *ефемериди НКА* (передобчислені точні координат НКА у просторі, відносно яких визначають положення НАС);
- *бортовий час НКА* (точний час передачі радіосигналу з кожного конкретного НКА, відносно якого визначають затримку поширення навігаційного радіосигналу);

- **несуча частота навігаційного радіосигналу** (відносно якої визначається доплерівський зсув частоти);

- **початкові координати ровера** (рухомого навігаційного приймального пристрою при диференційних методах вимірювання).

Похибки і неточності у початкових даних задачі позиціонування призводять до хибних результатів.

### 9.2.1. Неточність знання ефемерид

Неточність знання ефемерид обумовлює відповідні похибки координатного визначення НАС як у далекомірних методах позиціонування, так і в різницевих (рис. 9.2).

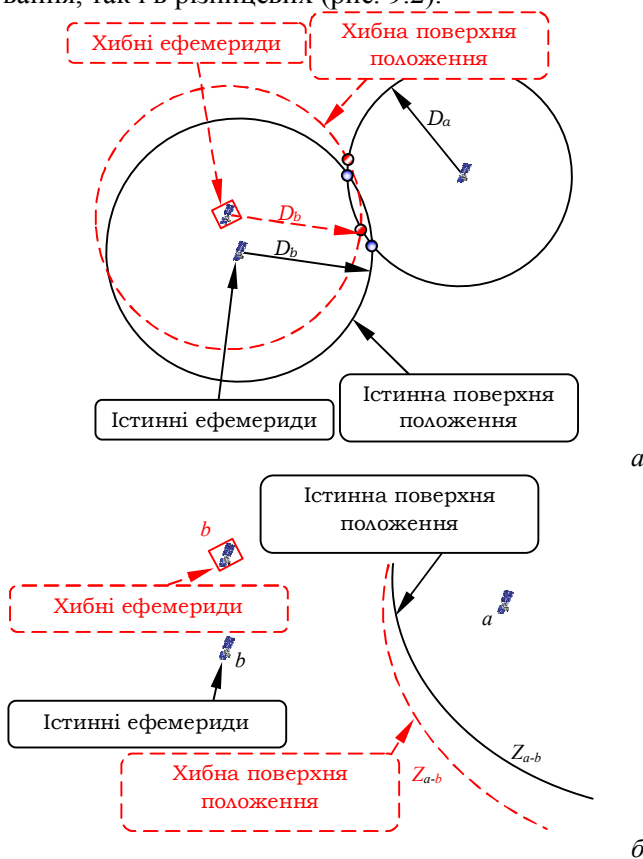


Рис. 9.2. Результат дії неточного значення ефемерид на точність позиціонування: а – далекомірним методом; б – різницево-далекомірним методом

Ефемериди НКА передобчислюються в наземному автоматизованому комплексі управління та завантажуються до НКА. Нормальний режим функціонування космічного сегмента передбачає щодобовий контроль положення супутника у просторі і відповідність передавальних ефемерид цьому положенню. У разі необхідності здійснюється корегування його ефемерид через завантаження нових даних. Поява похибок у значенні ефемерид супутників пов'язана з неточностями їх прогнозу, розрахунком у наземному автоматизованому комплексі управління і відхиленням НКА з передобчисленого орбітального положення внаслідок дії зовнішніх збурювальних факторів як гравітаційного, так і негравітаційного характеру.

Гравітаційні фактори обумовлені, головним чином, впливом великих небесних тіл (Землі, Сонця, Місяця тощо), причому в певних умовах збурювальний вплив Місяця суттєво перевищує збурювальний вплив Землі.

До факторів негравітаційного характеру відносяться:

- тиск сонячної радіації;
- атмосферне гальмування;
- наявність різноманітних речовинних перешкод на орбіті супутника.

Із зазначених факторів найбільш істотний вплив чинить сонячний радіаційний тиск. Ухилення супутників від розрахункової траєкторії через дію прямого сонячного радіаційного тиску лежать у межах від 5–6 м (для тригодинних дуг) до 100–800 м (для дводобових дуг) [21]. Передобчислення і введення алгоритмічної поправки ускладнюється внаслідок таких причин:

- інтенсивність сонячного випромінювання не залишається постійним у часі;
- модель впливу сонячного тиску суттєво змінюється під час переходу супутника в зону тіні і півтіні;
- ефективна поверхня супутника погано піддається передобчисленню як через складну конфігурацію такої поверхні, так і через варіації положення супутника у просторі;
- вплив на НКА відбитого від поверхні Землі радіаційного тиску (величина якого залежить від атмосферних умов і властивостей опромінювання Сонцем ділянок земної поверхні).

Частка атмосферного гальмування під час оцінювання впливу на супутник суттєво поступається радіаційному тиску. На характерній для таких супутників висоті, близько 20 тис. км, атмосфера виявляється надзвичайно розрідженою, і її впливом при прогнозуванні орбіт навігаційних супутників, як правило, нехтують. Так само, як і наявність різноманітних завад на орбітах руху супутників, прогнозування впливу є надзвичайно складною задачею.

Через складність проведення прогнозування узагальнена оцінка сумарного впливу збурювальних чинників на орбітальний рух НКА використовується для первинного наближеного передобчислення реальних орбіт супутників. Для отримання точних ефемерид навігаційних супутників, що необхідні для розв'язування задачі позиціонування, використовуються *експериментальні* методи. Сутність експериментальних методів полягає в організації спостережень за НКА за допомогою контрольно-вимірювальних станцій наземного комплексу контролю та управління. Координати контрольно-вимірювальних станцій відомі з високою точністю. Визначення поточних координат супутників здійснюється за допомогою постійних високоточних радіотелеметричних методів як мінімум з трьох наземних пунктів. У центрі управління системою значення координат, що одержані радіотелеметричними методами, порівнюються з передобчисленими ефемеридами НКА, що містяться у складі навігаційного повідомлення, після чого обчислюються ефемеридні поправки. Завантаження ефемеридних поправок у бортові ЕОМ НКА в дійсний час здійснюється один раз на добу. В бортових ЕОМ ефемеридні поправки вводяться до складу навігаційного повідомлення, за допомогою якого НАС отримує вихідні дані задачі позиціонування.

Точність ефемерид, одержана за допомогою цього методу, становить близько 20 метрів, що є не прийнятним для деяких високоточних геодезичних вимірів. У цих випадках використовують *апостеріорний* метод визначення ефемерид, а сама задача позиціонування розв'язується камерально в режимі постобробки. Сутність апостеріорного методу полягає у використанні для остаточної обробки статистики вимірювань значень ефемерид, одержаних радіотелеметричним методом, тобто не передобчислених, а реальних на час проведення навігаційних спостережень. Інформація про реальні ефемериди надходить по каналу зв'язку від спеціально організова-

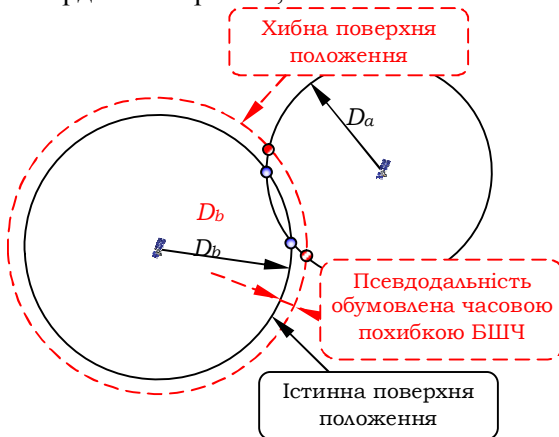


них служб (здебільшого, геодезичних), які на основі радіотелеметричних даних створюють банк даних ефемерид.

Іншим джерелом реальних ефемерид може виступати наземний комплекс контролю та управління системою, в якому зосереджується інформація від множини контрольно-вимірювальних станцій, що входять до складу наземних супутникових станцій високоточної глобальної мережі. Нині банк даних ефемерид НКА створений і використовується в національній геодезичній службі США (NGS).

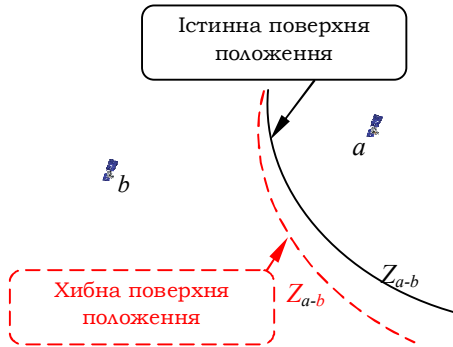
### 9.2.2. Неточне знання бортового часу

Незважаючи на точність бортового часу, що визначається цезієвими (рубідієвими) стандартами частоти і часу, є певна похибка бортової шкали часу відносно системної шкали часу. Кожний бортовий еталон частоти володіє власною похибкою. Застосування псевдодалекомірних методів (в яких передбачений розв'язок задачі для несинхронних шкал часу споживача і бортових шкал часу) внаслідок розходження бортових еталонів утворює власну псевдодальність для кожного НКА, що призведе до помилки позиціонування. Механізм дії часової помилки зображений на рис. 9.3. Загалом, похибка, обумовлена розходженням бортових еталонів часу, призводить до виникнення систематичної помилки визначення координат на рівні 0,6 м.



а

Рис. 9.3. Вплив розходження бортових еталонів частоти і часу на точність позиціонування: а – далекомірним методом; б – різницево-далекомірним методом



б

Рис. 9.3. Закінчення (див. також с. 173)

Нестабільність бортового еталона частоти і часу відбивається на стабільності несучої (центральної) частоти навігаційного радіосигналу. Відхилення несучої частоти призводить до неточного виміру доплерівського зсуву.

Для усунення цього виду похибок використовують методи безпосереднього корегування бортових шкал часу відносно системної шкали часу, обчислення і введення алгоритмічних поправок у бортові еталони частоти і часу. На перспективу передбачається введення до складу бортової апаратури стандартів частоти підвищеної стабільності (до  $10^{-14}$ ), що наближає їх стабільність до стабільності системної шкали часу.

### 9.2.3. Похибка початкових координат ровера

Неточне знання початкових координат ровера (рухомого навігаційного приймального пристрою при кінематичному режимі спостережень) має місце у разі порушення процедури ініціалізації ровера (прив'язування до базової станції). Наслідком цього є неточне знання цілої кількості фаз, визначення яких є найскладнішою задачею позиціонування. Відсутність точної кількості фаз унеможливорює наступні високоточні виміри.

### 9.3. Вплив зовнішнього середовища

Вплив зовнішнього середовища на результати супутникових вимірювань відбувається через фізичний вплив зовнішніх факторів на навігаційний радіосигнал. Результат цього впливу проявляється у вигляді спотворення реального часу проходження радіох-

виль від НКА до навігаційного приймального пристрою або спотворення навігаційного радіосигналу через введення певних завад (навмисних або ненавмисних), або послаблення потужності сигналу нижче гранично допустимого рівня, що унеможливило демодуляцію радіосигналу. Перелік фізичних ефектів, які впливають на навігаційний радіосигнал, наведений у табл. 9.2. Внесення спотворень часу поширення радіосигналів відбивається на похибках у визначенні навігаційних параметрів – відстаней до НКА.

Таблиця 9.2

*Вплив зовнішнього середовища на навігаційний радіосигнал*

| <b>Найменування фізичного ефекту</b>                         | <b>Причина виникнення фізичного ефекту</b>   | <b>Характер впливу на завадостійкість радіосигналу</b> |
|--|--|--|
| 1  | 2  | 3  |
| Загасання сигналів   | а) молекулярне загасання в “спокійній” атмосфері;<br>б) загасання в гідрометеорах  | Зниження енергетичного потенціалу                      |
| Розсіювання сигналів   | а) розсіяння в гідрометеорах;<br>б) турбулентне розсіяння  |  |
| Рефракція  | а) регулярна рефракція;<br>б) флуктуації коефіцієнта заломлення  |  |
| Сцинтиляція амплітуди і фази сигналу                         | а) мерехтіння внаслідок рефракції;<br>б) мерехтіння в турбулентностях;<br>в) мерехтіння у водному і кригвомісному середовищі   |  |
| Доплерівське викривлення (зсув і деформація спектра) сигналу | Варіації коефіцієнта заломлення хвиль у середовищі розповсюдження  | Зниження просторової і поляризаційної вибіркості антен |
| Зниження просторової і поляризаційної вибіркості антен       | Зростання помилок і зрив наведення антенного пристрою  |  |
| Зменшення ефективного коефіцієнта посилення антен            | а) унаслідок флуктуації кута приходу хвилі;<br>б) унаслідок порушення когерентності (фазової декореляції) сигналів по апертурі через фазову дисперсію траєкторії променя |  |
| Випромінювання (шум) атмосфери                               | а) випромінювання “спокійної” атмосфери;<br>б) випромінювання гідрометеорів;<br>в) випромінювання турбулентності   | Зниження енергетичного потенціалу                      |
| Дифракція радіохвиль   | Дифракція на рельєфі місцевості  |  |
| Утворення тропосферних хвилеводних каналів                   | а) приземні “хвилеводи”;<br>б) підведені “хвилеводи”   |  |

Закінчення табл. 9.2

| 1   | 2   | 3                                |
|---|---|----------------------------------|
| Деполаризація радіохвиль                  | а) деполаризація в гідрометеорах;<br>б) деполаризація в турбулентних утвореннях;<br>в) деполаризація внаслідок фарадеєвського обертання;<br>г) деполаризація у водних або криговмісних хмарах;<br>д) деполаризація внаслідок багатопроменевості розповсюдження радіохвиль |                                  |
| Зростання рівня прямих міжканальних завад | а) внаслідок зниження просторової і поляризаційної вибіркості антен;<br>б) внаслідок утворення просторових хвильоводних каналів;<br>в) унаслідок дифракції на рельєфі місцевості  |                                  |
| Багатопроменеве поширення радіохвиль      | а) дискретна багатопроменевість (рахункова множина променів);<br>б) “розмита” багатопроменевість;<br>в) зміщена багатопроменевість  |                                  |
| Дисперсійні властивості тропосфери        | а) амплітудна дисперсія унаслідок нерівномірного загасання у смузі частот сигналу;<br>б) амплітудно-фазова дисперсія в турбулентних утвореннях  | Обмеження максимальної швидкості |
| Зростання рівня викривлення сигналів      | Збільшення втрат при оптимальній обробці сигналів унаслідок обмеження смуги і радіуса когерентності тропосферного каналу  |                                  |

Спотворення реального часу проходження радіохвиль відбувається з двох можливих причин:

- зміна часу проходження радіохвиль через іоносферу і тропосферу;
- спотворення довжини шляху проходження радіохвиль внаслідок відбиття від об'єктів навколишнього середовища.

Вплив завад на радіосигнал і його спотворення можливе у таких ситуаціях:

- мультиплікативного складення у фазовому центрі антени множини копій відбитих навігаційних радіосигналів;
- придушення навігаційного радіосигналу ненавмисними стохастичними (випадковими) радіозавадами;
- придушення навігаційного радіосигналу навмисними радіозавадами;
- послаблення навігаційного радіосигналу через наявність перешкод на шляху поширення сигналу.

Часові спотворення виникають унаслідок відмінностей швидкості поширення електромагнітних хвиль у різних середовищах поширення (швидкість поширення електромагнітних хвиль в атмосфері відрізняється від швидкості світла у вакуумі). Причому швидкість поширення радіохвиль у атмосфері теж не є постійною. Незважаючи на те, що для СРНС GPS і ГЛОНАСС радіосигнал велику частину свого шляху проходить у вакуумі (для висоти орбіти 20 тис. км), нехтувати часовими спотвореннями в атмосфері, яка починається на висоті декількох сотень кілометрів від земної поверхні, неприпустимо.

Явище поширення радіохвиль від передавача до приймального пристрою сигналу у сфері використання радіочастотного ресурсу отримало назву багатопроменевого поширення радіохвиль [3]. У галузі супутникової радіонавігації це явище має назву багатопутність.

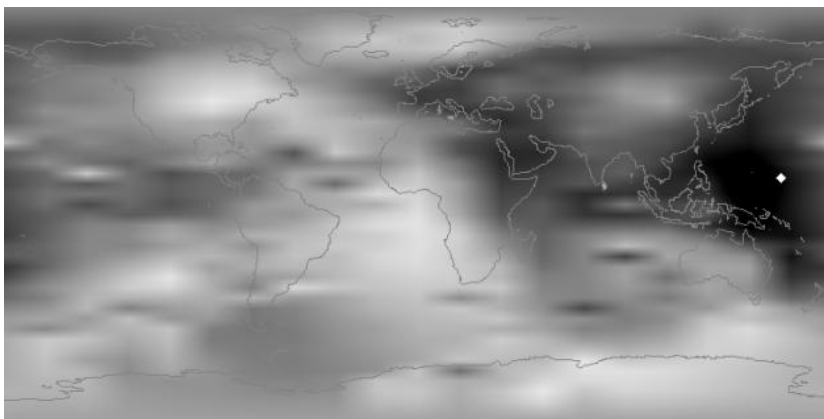
Розглянемо більш конкретно механізм впливу основних факторів зовнішнього середовища на навігаційний радіосигнал.

### ***9.3.1. Іоносферні часові спотворення***

Іоносфера – це іонізований розріджений атмосферний шар у діапазоні висот 50–500 км. Характеристикою іоносфери є схильність до суттєвої зміни електромагнітних властивостей внаслідок дії різних космічних випромінювань. Оскільки енергія окремих квантів електромагнітного іонізуючого випромінювання залежить від частоти такого випромінювання, то ступінь іонізації також залежить від частоти згаданих випромінювань, причому чим вище частота, тим інтенсивніше відбувається іонізація. Для кожного виду молекул або атомів існує певний граничний рівень енергії, при якому відбувається розщеплювання електричних нейтральних частинок повітря на вільні електрони й електрично заряджені іони. Як свідчать проведені дослідження, інтенсивна іонізація частинок повітря відбувається тільки при їх опромінюванні електромагнітними випромінюваннями з довжиною хвилі коротшою 0,313 мкм, тобто коливаннями ультрафіолетового діапазону. Тому основним іонізуючим чинником у сонячному випромінюванні є ультрафіолетова сонячна радіація [24]. Наявність вільних електронів викликає затримку поширення радіосигналу супутника, яка прямо пропорційна концентрації електронів і обернено пропорційна квадрату частоти радіосигналу. Вільні електрони під впливом електромагніт-

них хвиль від супутника, що проходять через іоносферу, самі стають джерелами вторинних хвиль, які при взаємодії з первинними приводять до появи результуючих хвиль з дещо відмінною швидкістю поширення, значення якої може бути як нижчим, так і вищим за швидкість світла у вакуумі [24].

На рис. 9.4 наведена реконструкція іоносфери Землі на 29 червня 2002 року на 8 год 4 хв 47 с (час московський). Чорні області відповідають граничним значенням затримки сигналу в 10 метрів по зенітному куту, а білі області – мінімальній затримці сигналу [25].



*Рис. 9.4. Реконструкція іоносфери*

Аналіз реконструкції іоносфери показує, що найбільші значення повної електронної концентрації відповідають освітленості Землі Сонцем (жирна біла крапка). Величина залишкової немодельованої іоносферної затримки може викликати похибку визначення псевдодальності на рівні 10 м. Для компенсації помилки визначення псевдодальності, яка виникає при цьому, використовується метод двочастотних вимірювань у діапазонах L1 і L2 (у двочастотних приймальних пристроях). Лінійні комбінації двочастотних вимірювань не містять іоносферних похибок першого порядку, оскільки відоме співвідношення частот (як GPS, так і ГЛОНАСС), яке становить  $f_{L1} / f_{L2} = 9 / 7$ , дозволяє обчислити іоносферну затримку і компенсувати її. Крім того, для часткової компенсації цієї похибки може бути використана модель корекції, яка аналітично розраховується з використанням інформації, що міститься в навігаційному повідомленні.

Додаткового ослаблення впливу іоносфери вдається досягти за рахунок використання диференційних методів вимірювань, в яких у параметри вимірювання ровера вноситься певна корекція, що обчислена на референційній станції. Використання відносних методів вимірювань дозволяє використовувати при остаточних розрахунках не абсолютні значення іоносферних затримок, а їх різниці, характерні для траєкторій радіопроменів, що сполучають супутник з двома рознесеними у просторі станціями. Крім того, найточніші роботи рекомендують виконувати в нічний час, коли вплив сонячної радіації на іоносферу суттєво зменшується.

### ***9.3.2. Тропосферні часові затримки***

***Тропосфера*** – найнижчий газоподібний шар атмосфери, висота якого не перевищує 40 км від земної поверхні. Особливістю тропосфери, як середовища поширення радіохвиль, є залежність величини затримки сигналу від метеорологічних чинників (температури, тиску та вологості), які у приземних шарах атмосфери можуть змінюватися у широкому діапазоні. Тропосферні затримки викликають помилки вимірювання псевдодальностей у межах від 2,4 метрів (при зенітному спостереженні НКА) до 24 метрів, що визначається протяжністю тропосфери на шляху руху. Умовно тропосфера поділяється на «вологу» та «суху». Спотворення у «сухому» шарі тропосфери становлять 90 % від загальних спотворень у тропосфері і визначаються, головним чином, атмосферним тиском. Спотворення у «вологодому» шарі спотворюють псевдодальність на величину менше 40 см і переважно залежать від концентрації водяної пари.

Для компенсації тропосферних затримок навігаційного радіосигналу за допомогою математичної моделі тропосфери обчислюються поправки, які вводяться до складу навігаційного повідомлення. Іншим способом усунення тропосферної затримки є використання сигналів СРНС як засобу дистанційного зондування, після обробки яких визначають параметри тропосфери [12].

Крім того, для зменшення тропосферних затримок не рекомендується використання НКА, що мають просторове положення біля радіогоризонту, у зоні якого протяжність тропосферного шару максимальна.

### 9.3.3. Багатопроменевість навігаційного радіосигналу

**Багатопроменевість** – явище поширення радіохвиль від точки передавання до точки приймання одночасно декількома окремими шляхами. Це явище виникає внаслідок відбиття радіосигналу від великих об'єктів (рис. 9.5), розташованих у безпосередній близькості від приймального пристрою (земна і водна поверхня, будови і споруди, гориста місцевість тощо). У результаті до антени приймального пристрою поступає множина сигналів, які мають певний часовий зсув відносно істинного сигналу.

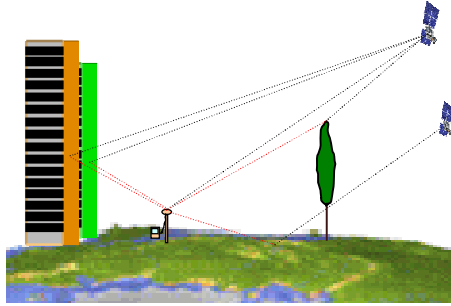


Рис. 9.5. До визначення поняття «багатопроменевість»

Вплив відбитих сигналів на роботу приймального пристрою тим більший, чим більший рівень відбитого сигналу (відбиття від великих, високих об'єктів) або чим більша часова затримка відносно істинного сигналу. Відбиттям від віддалених об'єктів можна знехатати через істотне загасання радіосигналу при його поширенні землею хвилею (уздовж поверхні землі), внаслідок чого рівень відбитого сигналу дуже малий у порівнянні з сигналом, що прийшов по прямому шляху і сприймається радіоприймальним трактом (корелятором) приймального пристрою як широкосмугова шумова завада.

Результатом складання прямого і відбитих сигналів, які мають певну часову затримку, є послаблення радіосигналу, спотворення його форми, а також певний часовий зсув фазового фронту інформаційних імпульсів (рис. 9.6), що впливає на кінцеву точність навігаційних вимірювань або повністю порушує нормальне функціонування приймального пристрою через неможливість розпізнавання корисного сигналу на фоні адитивних завад створених відбитими сигналами.

Особливості впливу відбитих радіосигналів на корисний сигнал, у тому числі на результати далекомірних вимірювань, детально вивчені у процесі розроблення і дослідження наземних радіода-



лекомірних пристроїв, а також під час розроблення і створення високошвидкісних радіосистем. При цьому була встановлена істотна відмінність у механізмі впливу радіовіддзеркалень на несучі і модульовані коливання. У СРНС для визначення навігаційних параметрів використовуються ці обидві характеристики радіохвилі – несуча радіосигналу, яка представлена гармонійним коливанням для фазових вимірювань РНП, модульований кодовою послідовністю радіосигналу для кодових вимірювань псевдодальності.

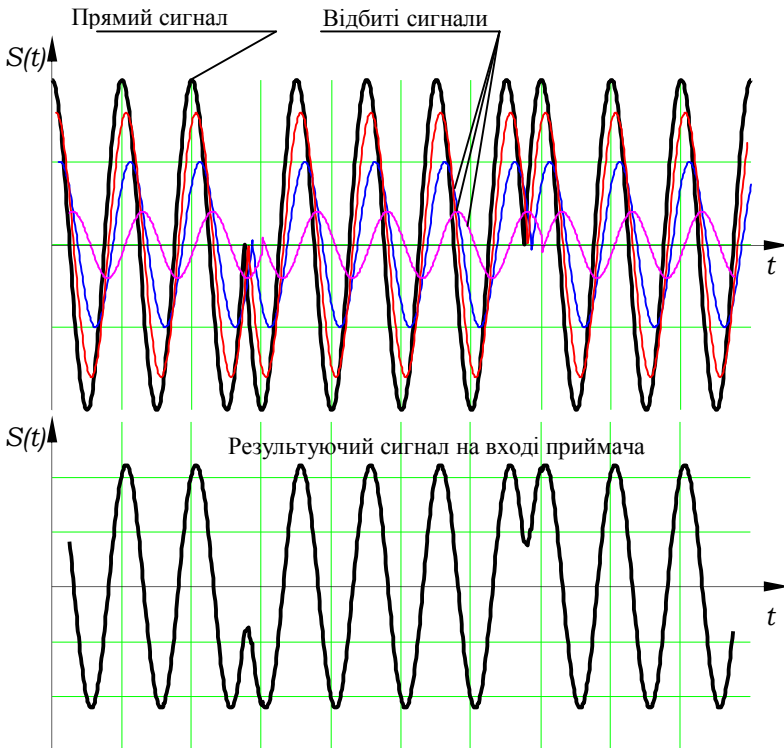


Рис. 9.6. Спотворення корисного сигналу внаслідок багатопроменевості

Для фазових вимірювань у системах GPS і ГЛОНАСС довжини хвиль несучих коливань близькі до 20 см, максимальна помилка фазових вимірювань може сягати значень близько 5 см. У тих окремих випадках, коли рівень відбитого сигналу перевищує рівень прямого сигналу (наприклад, за наявності додаткового загасання на шляху проходження прямого сигналу), або адитивна за-

вада володіє більшою потужністю, ніж корисний сигнал, і корелятором приймального пристрою прийнято хибне рішення стосовно істинного сигналу, а помилка позиціонування може наблизитися до 3 см.

Для кодових вимірювань похибка, обумовлена багатопроменевістю, на декілька порядків більша ніж для фазових вимірювань. Можлива похибка для кодової послідовності визначається тактовою частотою далекомірних кодів і є функцією їх довжини [8]. Тактова частота кодів встановлює межу для максимальної похибки (більша тактова частота обумовлює меншу довжину елементарної послілки і відповідно меншу похибку). Відповідно до цього очікувана похибка багатопроменевісті Р-кодів (тактова частота 10,23 МГц) менше ніж для С/А-кодів (частота 1,023 МГц). Вважається, що максимальний зсув у псевдодальності від багатопроменевісті може доходити до половини довжини елементарної послілки, тобто 150 м для С/А-коду і 15 м для Р-коду. Типові помилки набагато менші (звичайно до 10 м) [8].

Найгіршим випадком багатопроменевісті є *інтерференція* сигналу – потрапляння на антенний пристрій навігаційного приймального пристрою суміші корисного сигналу й адитивних, і мультиплікативних завад, що мають приблизно однакову потужність і великі часові зсуви. У цьому разі відбувається «розмивання» фазового фронту елементарної послілки, що унеможлиблює її розпізнавання корелятором радіочастотного тракту і фактично радіонавігаційний сигнал не приймається.

Аналітично похибки цього виду оцінити достатньо важко, а якнайкращим способом боротьби з нею вважається застосування організаційних заходів, а саме раціонального розміщення антени приймального пристрою відносно об'єктів відбиття. Слід зазначити, що застосування диференційних методів вимірювань не дозволяє усунути вплив багатопроменевості, оскільки оточення, що породжує виникнення відбиття, властиве для кожного конкретного пункту спостережень. На основі проведення як теоретичних, так і експериментальних досліджень розроблені такі рекомендації щодо ослаблення впливу джерел помилок, обумовлених багатопроменевістю:

- місця розташування пунктів спостереження слід вибирати з таким розрахунком, щоб виключити наявність об'єктів відбиття

поблизу від антенної системи супутникового приймального пристрою;

- у процесі розроблення антенних систем для супутникових приймачів слід звертати увагу на необхідність установки додаткових екрануючих пристосувань, які перешкоджають попаданню відбитих радіосигналів на вхід антени (установка екранів під антеною, що дозволяє усунути вплив сигналів, відбитих від підстилаючої поверхні);

- на пунктах, схильних до впливу багатопроменевості, слід передбачати сеанси спостережень підвищеної протяжності з тим, щоб отримати циклічну криву зміни помилок через відбиття; подальше усереднювання дозволяє суттєво ослабити цей вплив;

- недопущення наявності перешкод на шляху поширення прямого сигналу, що може призвести до його послаблення;

- при обробці результатів спостережень можна обмежитися введенням у розрахунок тільки тих результатів, які відповідають таким положенням супутників, при яких поверхні відбиття роблять якнайменший вплив.

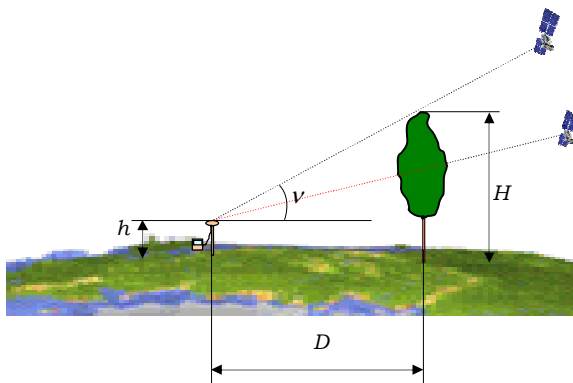
Сукупність перерахованих вище заходів дозволяє мінімізувати вплив багатопутності до рівня, при якому це джерело помилок не перешкоджає виконанню високоточних супутникових вимірювань.

#### **9.3.4. Затінення навігаційного радіосигналу**

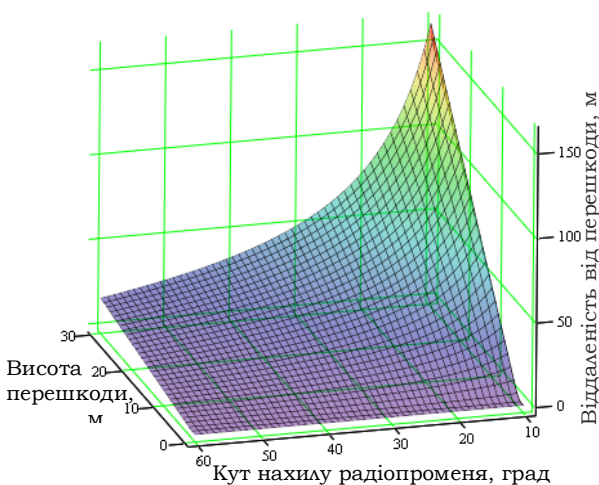
Наявність перешкод на шляху поширення сигналу призводить до послаблення рівня сигналу і може повністю зірвати спостереження. Завдяки явищу дифракції навігаційний радіосигнал здатний обігнути перешкоди, лінійні розміри яких співвідносяться з довжиною хвилі, що для СРНС становить близько 2 дм [4]. При цьому здатність радіохвилі до обгинання перешкод є функцією відстані між НАС і перешкодою:

$$D = \frac{H - h}{\operatorname{tg} \nu},$$

де  $H$  – висота перешкоди;  $h$  – висота антени приймального пристрою,  $\nu$  – кут нахилу радіопроменя. На рис. 9.7 зображена залежність необхідної відстані від лінійних розмірів перешкоди і кута нахилу приходу радіохвилі.



a



б

Рис. 9.7. До затінення навігаційного радіосигналу: а – співвіднесення параметрів перешкод; б – залежність мінімальної віддаленості між НАС і перешкодою від висоти перешкоди та кута нахилу радіопроменя

Перешкодою в загальному випадку виступають різноманітні будівлі, пагорби, дерева з листвою, причому рівень діелектричної проникності перешкоди залежить від ступеня вологості.

Найбільш критичними для наявності перешкод є фазові виміри, де радіонавігаційний параметр визначається однією частотою (несучою сигналу), і зрив спостережень призводить до зриву підрахунку цілої кількості фаз сигналу. У випадку з кодовими вимі-

рами корисний сигнал має достатньо широкий частотний спектр з базою сигналу  $B \gg 1$ , завдяки чому полегшується його приймання, і спостереження можливі навіть під кроною дерев.

#### **9.4. Інструментальні джерела помилок**

Інструментальні джерела помилок пов'язані з недосконалістю роботи або інструментального виконання тих або інших вузлів, що входять до складу бортової апаратури НКА й апаратури споживачів. Найбільш значимими інструментальними похибками навігаційних вимірювань є:

- неточність знання положення фазового центра антени приймального пристрою;
- неврахування часової затримки під час проходження інформаційних сигналів через навігаційну апаратуру;
- наявність внутрішніх шумів радіотракту приймача;
- похибки відстеження моменту приходу (часового положення) сигналу супутника.

##### ***9.4.1. Неточність знання положення фазового центра антени приймального пристрою***

Високоточні обчислення відстаней між НКА і НАС передбачають знання з високою точністю просторових положень точок, що є кінцями цих відстаней. Для вимірювань за допомогою радіосигналів прийнято вважати, що подібними точками відносності є фазові центри антен НКА і навігаційного приймача, при цьому вимоги точності до фазового центра антени навігаційного приймального пристрою на декілька порядків вищі ніж для антени НКА. Це пояснюється тим, що похибка визначення фазового центра антени НКА сприймається як неточність знання ефемерид і визначається на метровому рівні точності. Для фазового центра приймального пристрою похибка пов'язана з визначенням різниці координат при усуненні фазової неоднозначності між пунктами на сантиметровому (і навіть на міліметровому) рівні точності.

Положення фазових центрів антен визначаються в заводських умовах із застосуванням спеціальних лабораторних стендів. Сучасні навігаційні приймачі переважним чином комплектуються мікрополосковими антеннами (рис. 9.8, а), що мають симетричну конструкцію щодо осі обертання антенного пристрою, завдяки

чому фазовий центр лежить саме на осі обертання, причому його положення на осі вноситься у паспорт приймального пристрою. Розробники прагнуть того, щоб згадана величина була однаковою для всіх приймачів одного типу, оскільки використання антен різних типів може вносити певну похибку (рис. 9.8, б). Фірми-виготовлювачі геодезичних супутникових приймачів гарантують при цьому точність знаходження і стабільність положення фазового центра на рівні одиниць міліметрів.

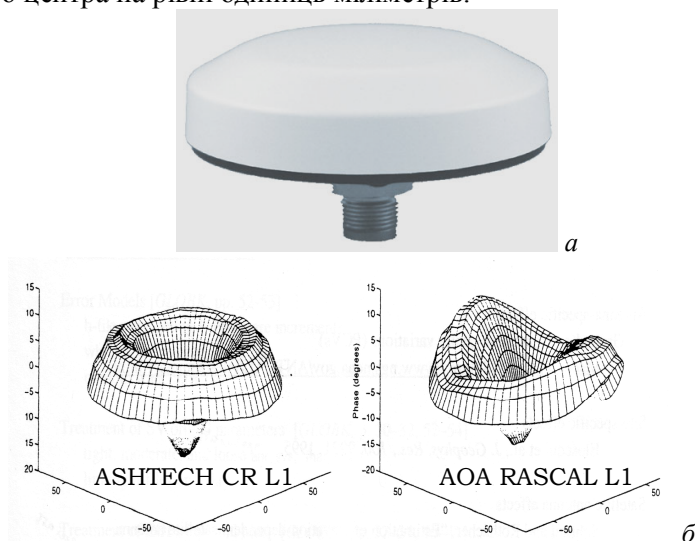


Рис. 9.8. Антени навігаційного приймача: а – мікрополоскова GPS антена; б – варіація фази сигналу для антен різних типів

Проте на практиці фазовий центр приймальної антени зміщується на певну відстань у просторі (у трьох вимірах), що залежить від місцеположення НКА, способу живлення антени (електричного з'єднання антени з іншими елементами схеми) [26]. Оскільки той самий момент відстежуються декілька НКА, причому кожен з них має власні координати, фазовий центр для кожного вимірювання має певний зсув. Подібний зсув фазового центра антени певною мірою усувається при обробці за методом подвійних різниць. Також для зняття проблеми фазового центра для диференційних методів розробники рекомендують використовувати антени одного типу, причому вони повинні бути узгодженими і спрямованими в одному напрямі.

Іноді у приймальну апаратуру вводиться додаткова програмна функція калібрування фазового центра, яка дозволяє вносити виправлення в результати вимірів [12].

#### ***9.4.2. Часова затримка радіотракту***

Неврахування часової затримки під час проходження інформаційних сигналів через навігаційну апаратуру обумовлюються змінами у часі проходження сигналів через радіотракти приймальної апаратури (особливо багатоканальних приймачів), що в кінцевому рахунку визначає похибку вимірювань псевдодальності. Часові затримки радіосигналів при їх проходженні по різних каналах можуть суттєво різнитися. З метою усунення цього явища вводяться лінії затримки, що компенсують нерівномірність затримок радіосигналів для різних каналів або групове перенесення всіх каналів у нижні діапазони частот, де частотний вплив на час проходження сигналу по електричних ланцюгах мінімальний. Для керування затримкою може вводиться спеціальний канал, призначенням якого є оперативне оцінювання розбіжності у затримках для різних каналів прийому. Ці заходи дозволяють звести похибку до величини в межах декільком міліметрів. Вимірювання двома приймальними пристроями на одну приймальну антену дозволяють обчислити часову помилку, яка в подальшому усувається використанням методів подвійних різностей [12].

#### ***9.4.3. Наявність шумів у радіотракті приймача***

Шуми є додатковим фактором погіршення якісного прийому навігаційного сигналу. Здатність корелятора виділяти корисний сигнал залежить від відношення корисний сигнал/шум. У цьому відношенні шум має декілька складових, а саме: білий (гауссівський) шум радіоефіру, який визначається спектральною щільністю у смузі приймального пристрою; різноманітні завади, що потрапляють у смугу пропускання приймального пристрою і визначаються відношенням потужності завади до ефективної ширини її спектра і, нарешті, внутрішні (теплові) шуми високочастотного тракту приймального пристрою, обумовлені хаотичною зміною напруги або струму в нелінійних ланцюгах приймального пристрою і шумом антени. Тобто шуми приймального пристрою безпосередньо впливають на чутливість приймального пристрою і,

відповідно, його здатність до прийому сигналів максимально можливої кількості видимих НКА.

Якісний прийом навігаційного сигналу, його розпізнавання і демодуляція передбачають розпізнавання фронтів модульованих імпульсів на фоні шуму. Причому чим меншою є ця різниця, тим більше помилок допускає приймач і тим більше часу він потребує для накопичення інформації, необхідної для розв'язування задачі позиціонування, а саме альманаху і ефемерид усіх видимих НКА. Залежно від наявності інформації в запам'ятовуючому пристрої навігаційного приймального пристрою розрізняють три пороги достатньої чутливості приймального пристрою:

- **cold start** – рівень сигналу, достатній для холодного старту приймача (максимальна чутливість обумовлена необхідністю збору повного об'єму інформації);

- **acquisition** – сигнал, достатній для визначення координат НАС (гарячий старт);

- **tracking** – сигнал, достатній для відстеження навігаційного радіосигналу супутників і обчислення поточних координат.

Наявність такої похибки призводить до виникнення координатної помилки близько 0,2–1 метри для високоточного коду і 1,5–15 метрів для коду стандартної точності. Як правило, виробниками вказується тільки одне значення, і, швидше за все, найоптимістичніше – Tracking Sensivity. Усунути внутрішні шуми повністю неможливо, і нині розробники підійшли впритул до межі фізичної можливості зменшення напівпровідникових шумів.

#### **9.4.4. Похибки моменту приходу сигналу**

Похибки відстеження моменту приходу сигналу супутника обумовлені відносною нестабільністю шкал часу споживача і бортової шкали часу. Наслідком цього є помилкове визначення псевдодальності. Способи розв'язування задачі позиціонування в цих умовах і способи суміщення шкал часу були розглянути раніше.

#### **9.5. Геометричний чинник**

При обчисленні величини кінцевої помилки необхідно ще врахувати взаємне положення споживача і супутників робочого (спостережуваного) сузір'я. Для цього вводиться спеціальний коефіцієнт геометричного погіршення точності GDOP (Geometric



Dilution of Precision), на який необхідно помножити всі перераховані вище помилки, щоб отримати результуючу помилку. GDOP включає похибки двох видів:

- похибки точності положення – Position DOP (PDOP);
- похибки точності часу – Time DOP (TDOP).

Похибки точності положення PDOP, у свою чергу, складаються з похибок таких видів:

- похибки точності планових координат – HDOP;
- похибки точності визначення висоти – VDOP.

Причина появи похибки такого виду визначається похибками виміру реальних дальностей до сузір'їв спостережуваних НКА. Здебільшого величина похибки знаходиться в деяких межах від реальної дальності  $-\Delta x \leq x \leq +\Delta x$ , де  $\Delta x = \left| D_{i \text{ real}} - D_{\text{зм}} \right|$ . Похибки вимірів спотворюють істинну поверхню положення навігаційного приймального пристрою. Перетини хибних поверхонь положень утворюють фігуру, що характеризує невизначеність положення навігаційного приймального пристрою. На рис. 9.9 наведені приклади утворень зон невизначеності при різному відносному положенні двох НКА.

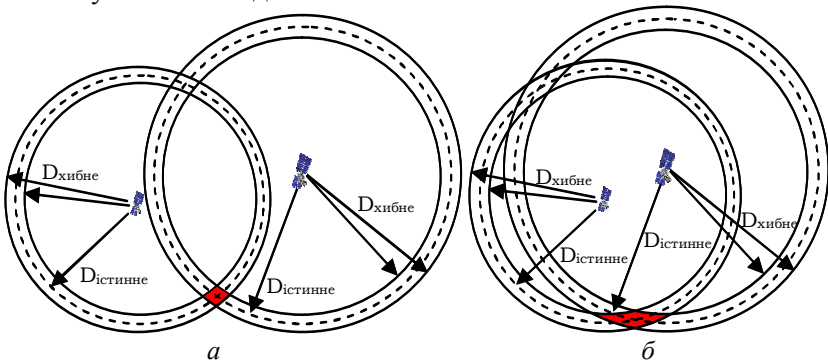


Рис. 9.9. Утворення зон невизначеностей при різному відносному положенні НКА

Розмір зони невизначеності залежить від геометрії відносного розташування НКА і НАС і визначається кутами між напрямками на НКА. Так, з рис. 9.9 видно, що площа (а відповідно й об'єм) області невизначеності у варіанті (а) значно менша за варіант (б). Вдалим вважається розташування НКА при їх рівномірному розосередженні

у видимій небесній сфері. Невдалою є конфігурація лінійного (всі НКА розташовані в одну лінію) або кластерного характеру (близько розташовані НКА). Враховуючи орбітальну щільність НКА і мінливість їх орбітального положення, невідале розташування є дуже рідким явищем і триває не більше 15–30 хвилин.

Більшість навігаційних приймачів із сучасним програмним забезпеченням володіють функцією прогнозування кількості видимих супутників. Для отримання даних найкращої якості у приймальному устаткуванні задається мінімальне значення PDOP, при якому виконується обчислення координат. Так, для GPS-приймачів геодезичного класу фірми Trimble PDOP воно дорівнює 7, для картографічних і ГІС приймачів PDOP – 6 [27]. Більш низьке значення PDOP вказує на кращу якість одержаних даних. Значення PDOP, яке менше 5, вказує на гарні умови спостереження незалежно від кількості супутників, від 5 до 8 – на задовільні умови і більше 9 – на дуже погані. Найбільш критичним до значення PDOP є кінематичний режим вимірювань, при якому період спостереження за НКА нетривалий. Менш критичним є статичний і псевдостатичний режим вимірювань.

Програмне забезпечення навігаційних приймачів дозволяє обчислювати планісфери (Sky Plots) – геометрію видимого сузір'я НКА (рис. 9.10).

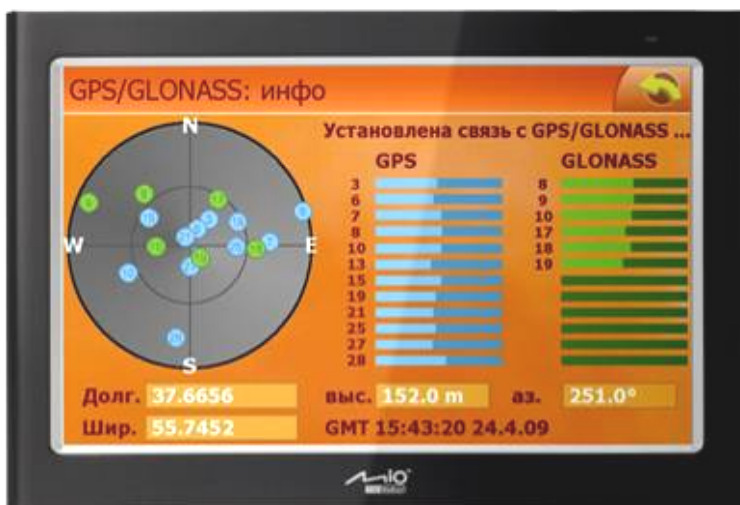


Рис. 9.10. Планісфера навігаційного приймального пристрою фірми Міо

Планісфера має вигляд кола, на якому зображена проекція небесної сфери маркерами, які позначають видиме положення НКА. Супутники, які зображені на краю планісфери, знаходяться на межі радіо-горизонту.

На рисунку 9.11 зображені приклади обчислення планісфер для різних значень PDOP [27]. Кращою конфігурацією є геометрія 4 НКА, один з яких спостерігається у зеніті, а інші розташовані на невеликій висоті над горизонтом симетрично відносно першого (рис. 9.11, *a*). Погана геометрія, як вже зазначалося, спостерігається при розташуванні супутників в одну лінію, або кластерне утворення в одній частини небосхилу. Проте певна геометрія супутників може бути поганою для одного параметра DOP і бути доброю для іншого, наприклад, геометрія, що зображена на рис. 9.11, *г* є поганою для VDOP і доброю для HDOP.

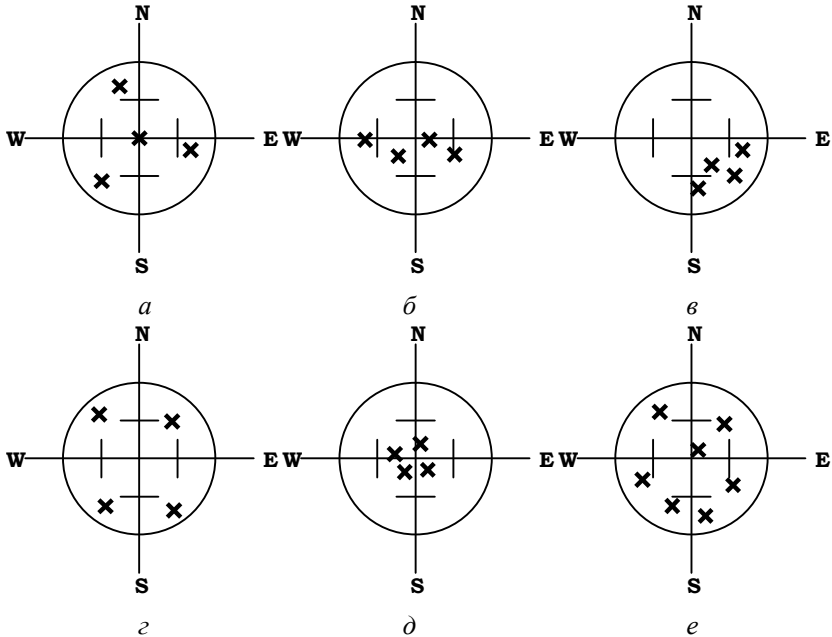


Рис. 9.11. Приклади обчислення планісфер: *a* – добрий PDOP, HDOP, VDOP; *б* – поганий PDOP, HDOP, добрий VDOP; *в* – поганий PDOP, HDOP, VDOP; *г* – поганий PDOP, VDOP, добрий HDOP; *д* – поганий PDOP, HDOP, добрий VDOP; *е* – добрий загальний DOP

Для отримання найкращих результатів вимірювань і, відповідно, достовірних та точних даних є процедура планування проведення навігаційних робіт, у результаті якої визначається графік проведення вимірювань, за яким буде спостерігатися найкраща геометрія сузір'я НКА.

***Питання для самоконтролю:***

- 1. У чому полягає відмінність між випадковими і систематичними помилками?*
- 2. Наведіть основні джерела виникнення помилок позиціонування.*
- 3. Чи впливають неточні ефемериди на поверхню положення в різницево-далекомірному методі позиціонування?*
- 4. Яким чином відбувається вплив іоносфери на точність позиціонування?*
- 5. Як спотворюється навігаційний сигнал під дією явища багатопроменевості?*
- 6. З чого складаються інструментальні помилки позиціонування?*
- 7. Наведіть вдалі конфігурації сузір'я НКА, за яких мінімізується вплив геометричного чинника.*

## Розділ 10. КІНЦЕВЕ ОПРАЦЮВАННЯ СУПУТНИКОВИХ ВИМІРІВ ТА ЇХ ЗРІВНЮВАННЯ

Досягнення прийнятної для геодезичних задач точності супутникових вимірювань за умови доступності лише відкритих кодів вимагає використання методів вимірів фази навігаційного радіосигналу. Усунення багатозначності фазових вимірювань, яка виникає при цьому методі, та мінімізація похибок вимірювання передбачає розв'язання певних обчислювальних задач, які логічно об'єднуються у фазу, званою кінцевим опрацюванням супутникових вимірювань.

### 10.1. Постобробка супутникових вимірювань

**Кінцевою обробкою супутникових вимірювань (постобробкою)** називається етап роботи, наступний за виконанням супутникових вимірювань, результатом якого є остаточна продукція: цифрова карта, каталог координат пунктів геодезичної мережі, геоінформаційна система регіону або об'єкта. Визначальним при цьому є створення каталогу координат й одержання точних і достовірних даних, від чого залежить якість і, зокрема, можливість розв'язання всіх подальших задач. Кінцева обробка супутникових вимірювань є автоматизованою процедурою, де користувач (або оператор) здійснює загальне управління процесом обробки даних, а безпосередні обчислення виконуються електронно-обчислювальним пристроєм відповідно до закладених алгоритмічних процедур.

Основними обчислювальними задачами постобробки є обробка супутникових фазових вимірювань, яка полягає в розв'язанні **багатозначності фазових вимірювань і обчислення вектора бази**, тобто **обчислення компонентів вектора, який з'єднує пункти виміру, на яких встановлені навігаційні приймачі (референцна станція і ровер)**. В основу алгоритмів постобробки покладений параметричний метод, який пов'язує вимірювані величини з величинами, які визначаються, як-то:

- координати ровера;
- параметри БШЧ і ШЧС;
- апаратурні затримки в радіотрактах НКА і НАС;
- поправки до елементів орбіт НКА;
- тропосферні та іоносферні поправки;

- параметри для кожної нерозв’язаної неоднозначності і кожного втраченого рахунку циклів.

У процесі постобробки в камеральному режимі здійснюється перевірка й оцінювання результатів супутникових спостережень – необроблених даних (“*сирих*” даних, *raw data*), виявлення та усунення помилок у цих даних, розв’язання багатозначності фазових вимірів, додавання результату вимірів до бази даних, а також **зрівнювання – узгодження результату поточних вимірів з попередніми вимірами** (узгодження отриманих різниць координат з каталожними різницями координат початкових пунктів, нев’язності замкнених фігур тощо). Зрівнювання необхідне для виключення проблеми узгодження результатів поточних супутникових вимірювань із координатами опорних пунктів створених раніше геодезичних мереж. Істотні помилки вимірів призводять до нев’язності замкнених фігур, для яких векторна сума баз повинна дорівнювати нулю:

$$\begin{cases} \sum_n \Delta \bar{X}_n = 0; \\ \sum_n \Delta \bar{Y}_n = 0; \\ \sum_n \Delta \bar{Z}_n = 0. \end{cases}$$

Розрізняють два види зрівнювання:

- первинне зрівнювання (зрівнювання супутникових спостережень), мета якого знаходження векторів базових ліній і відповідних коваріаційних матриць;

- вторинне зрівнювання (зрівнювання геодезичних мереж), в якому результати первинного зрівнювання використовуються як спостереження для подальшого зрівнювання геодезичних мереж.

Для виконання зрівнювання супутникових спостережень розроблені і використовуються такі методики:

- зрівнювання спостережень, що виконані на одній станції (забезпечує одержання абсолютних координат точки в системі WGS-84 або ПЗ-90);

- зрівнювання одинарної базової лінії з наступним об’єднанням базових ліній у мережу (забезпечує одержання компонентів

вектора базової лінії  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  і відповідної коваріаційної матриці  $K_{XYZ}$ . Ця методика є строгою тільки для двох одночасно спостережуваних приймачів і не є строгою для мережних рішень, оскільки не враховується стохастична інформація між одночасно спостережуваними лініями. Для покращення мережних рішень необхідне послаблення кореляції та ретельне зважування);

- об'єднане зрівнювання одержаних спостережень багатьох станцій однієї сесії (забезпечує одержання для  $R$  приймачів  $R-1$  незалежних векторів та коваріаційну матрицю розмірністю  $3(R-1) \times 3(R-1)$ ). Ця методика є строгою для мережних рішень, оскільки використовуються всі взаємні стохастичні спостереження);

- об'єднання розв'язків багатьох сесій у строгий загальний мережний розв'язок (розв'язок по багатьох станціях і багатьох сесіях збільшує стабільність і надійність мережі, але вимагає суттєвих обчислювальних ресурсів).

Проте найскладнішою задачею постобробки вважається задача розв'язування неоднозначності фазових вимірювань.

## **10.2. Обробка супутникових фазових вимірювань**

### **10.2.1. Неоднозначності фазових вимірювань**

Фазові вимірювання в СРНС застосовуються для точного виміру віддаленості приймача від НКА, тобто якомога точнішого визначення координат пункту навігаційного спостереження. Висока точність потрібна під час виконання геодезичних і землепорядних робіт, у геофізиці, будівництві та багатьох інших галузях. Клас приймачів, що спроможний виконувати високоточні виміри, має назву геодезичні супутникові приймачі.

Навігаційний радіосигнал є складним фазоманіпульованим радіосигналом, несуча якого модулюється навігаційним повідомленням і псевдовипадковими кодами високої та стандартної точності. Для виділення гармонійного коливання з навігаційного сигналу використовують операцію *квадратування*, тобто отриманий сигнал перемножують самого на себе. В результаті одержують гармонійне коливання подвійної частоти, яке і використовується для фазових вимірювань. Псевдовипадкові коди при цьому використовують для обчислення координат пунктів позиціонування і виділення навігаційного повідомлення.

Сутність фазових вимірювань полягає у визначенні цілої кількості фаз навігаційного радіосигналу і частини нецілої фази на шляху поширення сигналу від НКА до НАС. Для проведення фазових вимірювань здійснюють порівняння гармонійного коливання несучої, яке виділяється з навігаційного радіосигналу НКА і коливання, що формується у навігаційному приймачі (рис. 10.1).

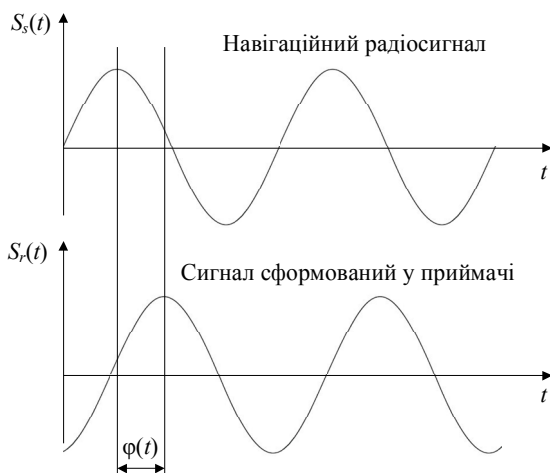


Рис. 10.1. Різниця фаз навігаційного та сформованого у приймачі сигналу

Оскільки довжина хвилі навігаційного радіосигналу дорівнює 17~19 см (при якому фаза сигналу здійснює оборот на величину кута  $2\pi$ ), то, теоретично, одержувана точність визначення поверхні положення навігаційного приймача знаходиться в міліметровому діапазоні. Зсув фази  $\varphi(t)$  (неціла частина фази) навігаційного сигналу визначається за різницею миттєвих фаз при порівнянні гармонійного коливання сигналу НКА і коливання, яке формується в навігаційному приймачі. Для підрахунку цілої кількості фаз використовують складні операції розв'язування неоднозначності фазових вимірів, що є однією з найскладніших обчислювальних задач супутникового навігаційного позиціонування. В ідеальному випадку коливання, що формується у навігаційному приймачі, повинне бути синфазним і когерентним коливанню навігаційного сигналу. При цьому радіус поверхні положення (відстань до НКА) буде визначатися виразом:



$$D_{\varphi}(t) = \frac{V}{f} \left( N + \frac{\varphi(t)}{2\pi} \right), \quad (10.1)$$

де  $D_{\varphi}(t)$  – миттєва відстань до НКА у момент часу  $t$ ;  $V$  – відносна швидкість зближення (віддалення) НКА і навігаційного приймача;  $f$  – частота навігаційного сигналу;  $N$  – кількість цілих фаз на шляху поширення навігаційного сигналу;  $\varphi(t)$  – миттєве значення різниці фаз навігаційного і сформованого у приймачі сигналів.

Проте на практиці забезпечити синфазність і когерентність коливань супутника і приймача технічно неможливо. Початкова фаза коливання навігаційного сигналу є апіорі невідомою, тобто невідома істинна відстань нецілої частини фази  $\varphi(t)$ , яка визначається миттєвим значенням різниці фаз (рис. 10.2).

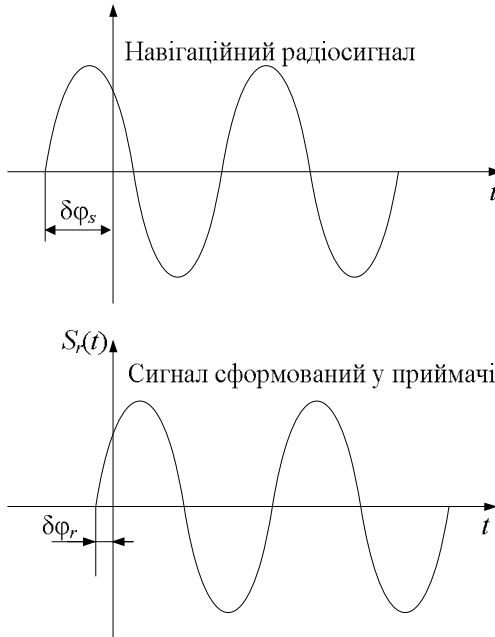


Рис. 10.2. Щодо невизначеності початкових фаз навігаційного та сформованого у приймачі сигналу

За цих умов вираз (10.1) набуде вигляду:

$$D_{\varphi}(t) = \frac{V}{f} \left( N + \frac{\varphi(t) + \delta\varphi_s - \delta\varphi_r}{2\pi} \right), \quad (10.2)$$

де  $\delta\varphi_s$  – початкова фаза навігаційного сигналу;  $\delta\varphi_r$  – початкова фаза коливання, яке формується в навігаційному приймачі.

Додаткове ускладнення вносить той факт, що опорні генератори коливань (еталони частоти і часу) супутника і приймача мають різну стабільність частоти, що викликає повільне відносне відхилення різниці фаз. Крім того, внаслідок ефекту Доплера змінюється (збільшується або зменшується) несуча частота навігаційного сигналу (а відповідно і фаза сигналу), тобто вноситься додаткова похибка у різницю фаз навігаційного радіосигналу і сигналу, сформованого в навігаційному приймачі. Для усунення цього радіотрактом приймача здійснюється підлаштування частоти прийому, але це не виключає наявності певної похибки.

Отже, при застосуванні фазового способу визначення віддаленості до НКА розв'язуванню підлягають дві основні проблеми: підрахунок цілої кількості фаз до НКА і визначення значень початкових фаз навігаційного сигналу  $\delta\varphi_s$  і приймача  $\delta\varphi_r$ .

### 10.2.2. Розв'язування неоднозначності фазових вимірів

Розв'язування неоднозначності фазових вимірів зводиться до визначення цілої кількості фаз  $N$  на шляху поширення навігаційного радіосигналу (рис. 10.3). Складність цієї задачі для супутникових систем полягає в неможливості точного підрахунку величини  $N$ . У наземних системах (наприклад, радіолазі), які використовують

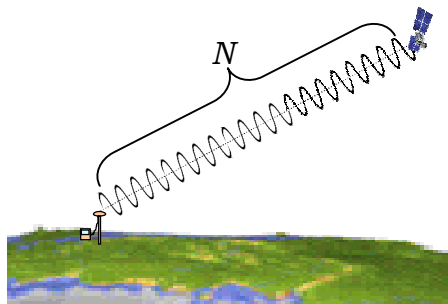


Рис. 10.3. Ціла кількість фаз

принцип фазових вимірів віддаленості, відомим є початкове значення цілої кількості фаз  $N_0$ , що відповідає віддаленості  $D_0$ . При зміні відстані здійснюється постійне спостереження за зміною фа-

зи радіосигналу і відбувається відлік цілих значень фаз  $N_0 \pm N$ . Приріст відстані при цьому становить  $\Delta D = \lambda(N_0 \pm N) - D_0$ . У супутникових системах неможливо визначити початкове значення віддаленості між об'єктами вимірювань (тобто значення  $N_0$ ). Тому при зрівнюванні вимірів параметр  $N_0$ , який має назву параметр неоднозначності, включають до переліку невідомих координат вектора бази.

У СРНС задача визначення неоднозначності фазових вимірів розв'язується стохастичними методами, тобто параметр неоднозначності обирається як найімовірніша величина. Звичайно, за винятком режиму РТК, параметр неоднозначності визначається при постобробці у ході виконання зрівнювання вимірів.

Є декілька способів пошуку значення параметра неоднозначності. Перший з них [4] ґрунтується на спільному використанні кодових і фазових вимірів, сутність якого полягає в наступному: віддаленість для фазових вимірів визначається співвідношенням (10.2), в якому величина  $VN/f = N\lambda$ , де  $N\lambda$  – невідома частина відстані, утворювана кількістю цілих фаз. Частина виразу (10.2) набуває вигляду

$$\frac{V}{f} \cdot \frac{\varphi(t) + \delta\varphi_s - \delta\varphi_r}{2\pi} = \lambda\varphi(t) + \varepsilon,$$

де  $\lambda\varphi$  – виміряна частина нецілої фази;  $\varepsilon$  – похибка, що обумовлена ефектами Доплера і незнанням початкових фаз сигналу і коливання навігаційного приймача. Таким чином, дальність між навігаційним приймачем і НКА для фазових вимірів можна записати:

$$D_\varphi(t) = N\lambda + \lambda\varphi(t) + \varepsilon. \quad (10.3)$$

Водночас геометрична (істинна) дальність для кодових вимірів становить:

$$D(t) = D_c(t) + \delta, \quad (10.4)$$

де  $D_c(t)$  – виміряна дальність між НКА і навігаційним приймачем;  $\delta$  – похибка, обумовлена розбіжністю шкал часу НКА і навігаційного приймача, затримкою проходження навігаційного сигналу тощо.

Різниця, утворювана формулами (10.3) і (10.4), дозволяє сформулювати вираз підрахунку кількості цілих фаз гармонійного колювання навігаційного радіосигналу:

$$N = \frac{D(t) - \lambda\varphi(t) + \delta - \varepsilon}{\lambda} \quad (10.5)$$

Одержані за результатами спостережень параметри багатозначності округлюють до найближчих цілих чисел, одержуючи тим самим набір параметрів багатозначності  $N_0$ . Такий спосіб дозволяє одержати початкові (наближені) значення неоднозначностей цілих фазових циклів. Значення цих параметрів не будуть ні істинними, ні ймовірними. Визначення ймовірних значень забезпечує подальша процедура (рис. 10.4). Визначення цілої кількості фаз [24] ґрунтується на накопиченні статистики спостережень і використанні методу найменших квадратів. При цьому тривалість сесії спостережень і відсутність перешкод суттєво збільшують вірогідність одержання істинних координат. Необхідна тривалість позиціонування є функцією від сприятливості умов спостережень, і при перевищенні деякої часової межі накопичення додаткової статистики втрачає сенс, тобто суттє-

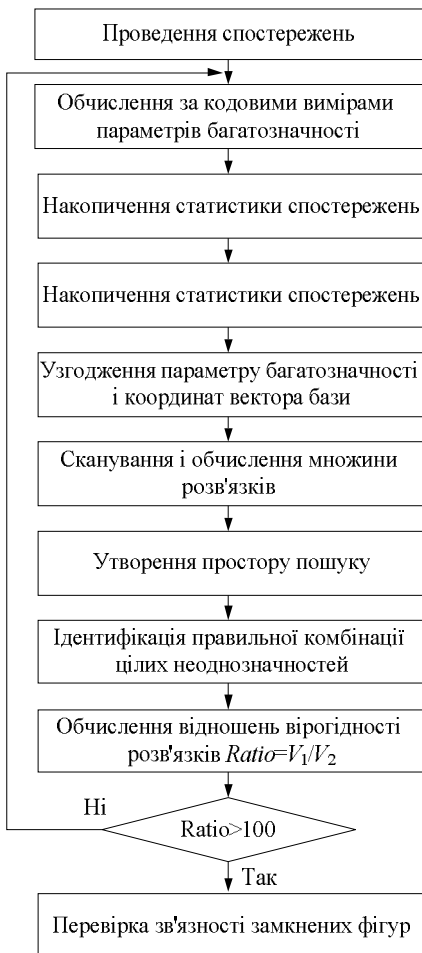


Рис. 10.4. Алгоритм пошуку значення параметра неоднозначності

вого підвищення точності позиціонування, яке може бути критичним для розв'язку практичних задач, не відбувається.

Розв'язування неоднозначності фазових вимірів за методом найменших квадратів використовує наближену оцінку параметра неоднозначності, яка визначається виразом (10.5). Використовуючи набір цілочисельних параметрів багатозначності, обчислюють нові координати вектора бази. Вони також помилкові, оскільки помилковими є значення параметрів багатозначності. Основною задачею на цьому етапі є досягнення відповідності між параметрами багатозначності і координатами вектора бази.

Наступним етапом є достатньо тривалий етап сканування. Комп'ютер послідовно змінює (збільшує і зменшує) на 1, 2, ... значення параметрів багатозначності.

Це роблять у всіх комбінаціях, одержуючи кожного разу нове рішення для вектора бази, при цьому число комбінацій і одержаних розв'язків утворюють так званий простір пошуку (рис. 10.5). Важливим аспектом утворення простору пошуку є залежність продуктивності пошуку розв'язку від наявних обчислювальних ресурсів. Тому необхідно підтримувати баланс між обсягом обчислень і розміром простору пошуку, особливо при кінематичному режимі вимірювань у реальному часі.

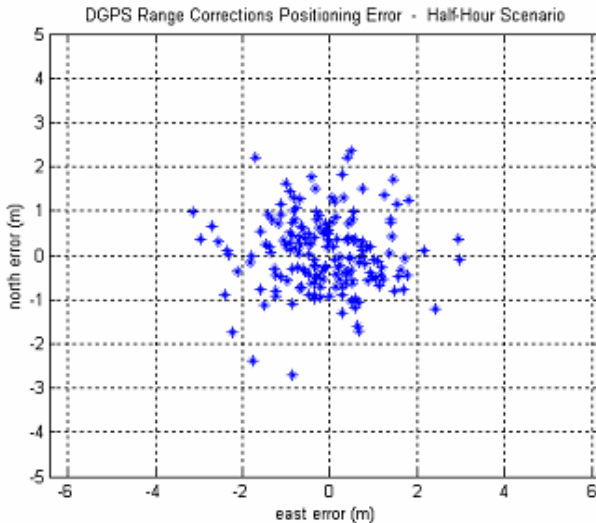


Рис. 10.5. Простір пошуку

Наступним етапом процесу розв'язування неоднозначностей є ідентифікація правильної комбінації цілих неоднозначностей. На основі статистичного аналізу оцінюється вірогідність справедливості кожного з розв'язків, яка одержується завдяки обчисленням для комбінацій вимірів зваженою сумою квадратів нев'язок. Найбільш достовірною вважається комбінація, нев'язки для якої мінімальні, тобто дані для якої підходять найкращим чином.

У подальшому відбувається перевірка одержаних даних, за якої в обчисленні вірогідності ранжуються в ієрархію за їх значенням: найвірогіднішому розв'язку привласнюється вірогідність  $V_1$ ; найвірогіднішому з тих, що залишилися, – вірогідність  $V_2$  і так далі. Для двох найкращих результатів обчислюється відношення –  $ratio = V_1/V_2$ . Цією операцією оцінюється справедливість одержаних розв'язків для першого і другого набору неоднозначностей, і якщо  $ratio$  мале, то одержані варіанти рівноймовірні, неоднозначність вважається нерозв'язаною і спостереження на цій базі треба повторити за більш сприятливої геометрії спостережень та за більшої тривалості сесії. На практиці, за сприятливих умов спостережень  $ratio$  є близьким до сотні, і в цьому випадку вважається, що одержаний результат є достовірним, хоча остаточний розв'язок ухвалюють, проаналізувавши розподіл по мережі незв'язності замкнених фігур.

### 10.2.3. Визначення початкових фаз коливань

Другою важливою задачею точного позиціонування є визначення **несинфазності** коливань опорних генераторів супутника і приймача (початкових фаз коливання несучої радіосигналу та коливання, яке формується у радіонавігаційному приймачі). За допомогою застосування апаратних рішень або організації будь-яких додаткових каналів зв'язку між супутником і приймачем визначити початкові фази сигналів або усунути їх несинфазність неможливо. Для розв'язування цієї проблеми використовують різниці фазових вимірювань, причому залежно від задач обробки, можна утворювати декілька видів різниць [24]:

- одинарні (між фазами з одного пункту спостереження  $A$  на два супутники з номерами  $i$  і  $j$ ; між фазами з двох пунктів спостереження  $A$  і  $B$  на один супутник  $i$ );
- подвійні (між фазами з двох пунктів спостереження  $A$  і  $B$  на два супутники  $i$  і  $j$ );

- потрійні (між фазами з двох пунктів спостереження  $A$  і  $B$  на два супутники  $i$  і  $j$  в різні епохи  $t_0$  і  $t_1$ ).

*Одинарні різниці фаз.* Є два варіанти утворення одинарних різниць фаз (іноді їх називають прості різниці, Single-Difference – SD), які доповнюють один одного і знімають проблему несинфазності коливань супутника і

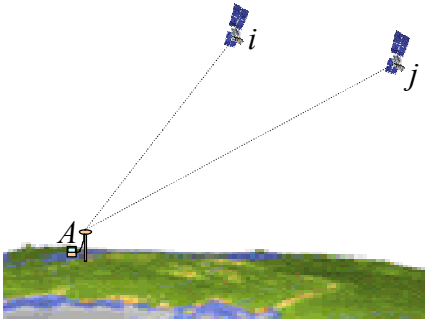


Рис. 10.6. Виключення початкової фази сигналу приймача

приймача.

Перший вид одинарних різниць утворюється між вимірами одного навігаційного приймача, які зроблені одночасно за сигналами двох НКА з номерами  $i$  і  $j$  (рис. 10.6). Різниця виразів виду (10.2) для  $i$ -го та  $j$ -го вимірювання дозволяє виключити значення початкової фази коливання сигналу навігаційного приймача:

$\delta\varphi_{r_i} - \delta\varphi_{r_j} = 0$ , тобто в результаті отримуємо різницю:

$$D_{\varphi_i}^A(t) - D_{\varphi_j}^A(t) = \frac{V}{f} \left( N_i^A - N_j^A + \frac{\varphi_i(t) - \varphi_j(t) + \delta\varphi_{si} - \delta\varphi_{sj}}{2\pi} \right).$$

Індекси  $i$  і  $j$  відображають номери супутників, відносно яких утворені різниці. Ця різниця дозволяє виключати з результатів вимірювань апаратні затримки сигналу, що утворюються у навігаційному приймачі, та похибки годинника навігаційного приймача.

Другий вид одинарних різниць утворюється між вимірами двох просторово рознесених навігаційних приймачів  $A$  і  $B$ , пов'язаних базовою лінією, зроблених відносно одного  $i$ -го НКА (рис. 10.7). У цьому випадку різниці виразів (10.2) забезпечують виключення зна-

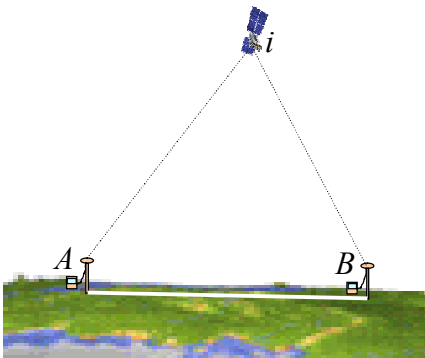


Рис. 10.7. Виключення початкової фази сигналу НКА

чень початкової фази коливання несучої радіонавігаційного сигналу НКА:  $\delta\varphi_{sA} - \delta\varphi_{sB} = 0$ , залишаючи невизначеність початкових фаз коливань, сформованих у навігаційних приймачах  $\delta\varphi_r$ :

$$D_{\varphi_i}^A(t) - D_{\varphi_i}^B(t) = \frac{V}{f} \left( N_i^A - N_i^B + \frac{\varphi_i^A(t) - \varphi_i^B(t) + \delta\varphi_{rA} - \delta\varphi_{rB}}{2\pi} \right).$$

Ці різниці дозволяють виключити з результатів вимірів затримки сигналів, утворених в апаратній частині НКА, та поправки годинника НКА. Крім того, у цій різниці слабшає вплив неточного знання ефемерид НКА.

Обидві різниці на коротких базових лініях (до 50 км) дозволяють зменшити вплив іоносферних і тропосферних похибок. Проте утворювані різниці збільшують шуми вимірювань й інші немодельовані помилки [25].

*Подвійні різниці фаз.*  
Подвійні різниці фаз (Double Difference – DD) утворюються при відніманні одинарних різниць різних видів (рис. 10.8), тобто від одинарної різниці, де усунуто невідоме значення початкової фази коливання, сформованого у приймачі А:  $D_{\varphi_i}^A(t) - D_{\varphi_j}^A(t)$ , відні-

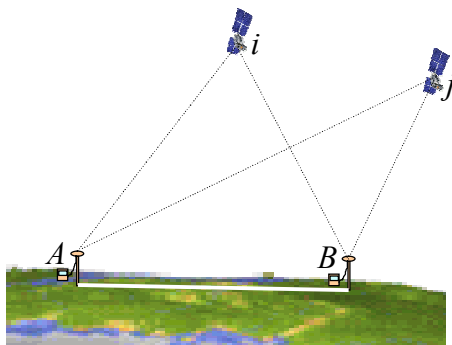


Рис. 10.8. Утворення подвійних різниць фаз

мається одинарна різниця, в якій усунуто невідоме значення початкової фази навігаційного радіосигналу НКА:  $D_{\varphi_i}^A(t) - D_{\varphi_i}^B(t)$ .

Усунення початкових фаз навігаційного радіосигналу та коливання, що формується у навігаційному приймачі, утворює різницю, в якій виключаються початкові фази коливань супутника і приймача, і **теоретично число укладень довжин хвиль у другій різниці є цілим**, що дозволяє у процесі оброблення округляти число укладень довжин хвиль до цілого числа. У рівняння з двома НКА і двома навігаційними приймачами можуть входити чотири окремі неоднозначності, які утворюють новий параметр неоднозначності:



$$N_{ij}^{AB} = N_i^A - N_i^B - N_j^A + N_j^B.$$

Загальна кількість параметрів неоднозначностей, що можуть входити в рівняння при спостереженні  $S$  супутників  $R$  приймачами протягом  $E$  епох, становитиме  $n_N = SRE$ . На практиці для формування подвійних різниць використовуються два основні методи:

- метод базового супутника – один із супутників призначається опорним і його фаза віднімається від решти фаз цієї епохи;
- метод послідовних супутників – здійснюється послідовний перебір супутників, при якому від значень фази наступного супутника віднімається значення фази попереднього.

Як результат, подвійні різниці приводять також до зменшення впливу іоносфери, тропосфери і помилок ефемерид, проте шум вимірювань дещо збільшується. Однак утворення подвійних різниць не дозволяє визначити кількість цілих фазових циклів  $N$ .

*Потрійні різниці фаз.* У СРНС обробка результатів вимірювань заснована на використанні методу найменших квадратів, що передбачає складання та розв'язування системи лінійних рівнянь. Певною проблемою при цьому є те, що вимірювані навігаційні параметри не є лінійними. Для вирішення цієї проблеми функцію вимірної величини від параметрів, що визначаються, розкладають у ряд Тейлора й обмежуються членами з першими частковими похідними, що дозволяє лінеаризувати систему рівнянь. При цьому необхідно знати наближені значення визначених параметрів і передобчислене за цими значеннями наближене значення вимірюваної величини. Наближений розв'язок вектора бази одержують з кодових і доплерівських вимірювань. Програмне забезпечення формує перші різниці фазових вимірювань, з них формує другі різниці, а потім – треті різниці (Triple Difference – TD). Уточнення наближеного значення координат вектора бази здійснюється за потрійними різницями, і в наступному використовується для розв'язування рівнянь за другими різницями. Потрійні різниці отримуються з других різниць, отриманих у різні епохи (рис. 10.9).

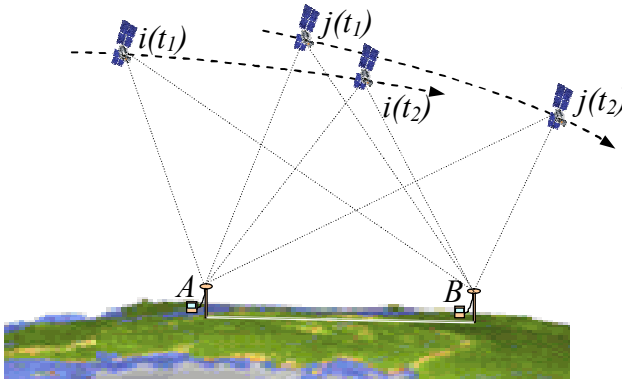


Рис. 10.9. Утворення потрібних різниць фаз

У початковий момент часу  $t_1$  формують другу різницю і продовжують безперервну обробку до моменту  $t_2$ . З різниці виключається параметр багатозначності  $N_0$ , оскільки лічильник циклів безперервної фази починає налічувати її відразу після захоплення сигналу. Тому неоднозначності  $N$  називають початковими цілими неоднозначностями. Таким чином, потрібні різниці не містять помилок годинника і початкових цілих неоднозначностей фаз.

До того ж потрібні різниці використовуються при зриві рахунку кількості цілих фаз. Недоліком потрібних різниць є погіршена геометрія спостережень, за яких поверхні положення перетинаються під гострими кутами, при яких помилка визначення вектора бази знаходиться в межах 1–3 метрів. Помилки моделювання іоносфери і тропосфери в потрібних різницях зберігаються, дещо зменшується вплив помилок ефемерид, але шум вимірювань зростає.

Потрібні різниці зазвичай використовують при обробці спостережень одночастотними приймачами. Якщо приймач двочастотний, то є можливість утворити комбінації фаз різних частот. Якщо  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$  – спостереження фази на частотах  $L_1$  і  $L_2$ , то комбінована фаза  $\Phi_c$  визначається як:

$$\Phi_c = n_1\Phi_1 + n_2\Phi_2,$$

де  $n_1$  і  $n_2$  – деякі дійсні числа. Отриманій фазовій комбінації відповідає інша частота  $f_c$  і довжина хвилі  $\lambda_c$ :  $f_c = n_1f_1 + n_2f_2$ .

Найбільш вживаними є такі комбінації:

- різницева комбінація ( $n_1 = 1$ ,  $n_2 = -1$ ,  $\lambda_c = 86,2$  см);
- сумарна комбінація ( $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1$ ,  $\lambda_c = 10,7$  см);
- іоносферно-вільна комбінація ( $n_1 = 1$ ,  $n_2 = -\alpha_I$ ,  $\lambda_c = 5,4$  мм).

Різницева і сумарна комбінації використовуються в алгоритмах швидкої статистики і кінематики реального часу для швидкого прямого розв'язання неоднозначностей на частоті  $L_1$  [24]. Швидкість пошуку неоднозначності залежить від множини факторів, таких як кількість НКА, за якими здійснюються виміри, їх геометрія, наявність псевдодальностей, шум вимірів, при цьому вважається, що за сприятливих умов час пошуку неоднозначності менший за 1 хвилину, але оптимальним часом є час, менший за 10 секунд.

Іоносферно-вільна комбінація використовується для майже повного виключення впливу іоносфери за подвійними різницями фаз. Іоносферна рефракція, з точністю до членів другого порядку, обернено пропорційна квадрату частоти:

$$I = \frac{40,28TEC \operatorname{cosec} z}{f^2},$$

де  $TEC$  (Total Electron Content) – повний вміст електронів в іоносфері;  $z$  – зенітна відстань супутника. Тобто іоносферні затримки фаз для різних частот обернено пропорційні першому ступеню частоти:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_2}{f_1} = \alpha_I.$$

Виключення впливу іоносфери дозволяє здійснювати вимірювання базових ліній довжиною в тисячі кілометрів, у той час як межею для одночастотних навігаційних приймачів є базові лінії довжиною в 10–15 кілометрів.

### 10.3. Використання фазових різниць у задачах позиціонування

Отже, перерахуємо основні властивості різниць фаз:

- в одинарних різницях фаз відсутні неоднозначності початкових фаз сигналів, сформованих у НКА або навігаційних приймачах;

- у подвійних різницях фаз відсутні неоднозначності початкових фаз сигналів, сформованих у НКА і навігаційних приймачах, а задача фазового позиціонування зводиться до пошуку цілочисельного значення кількості фаз;

- у потрійних різницях фаз відсутні неоднозначності початкових фаз сигналів, сформованих в НКА і навігаційних приймачах, а також цілочисельні початкові неоднозначності фаз, але суттєво погіршується точність визначення вектора бази.

Крім того, у подвійних і потрійних різницях фаз виникають корельовані помилки, що вносяться опорним супутником і які називаються фізичною кореляцією. Інший вид кореляції називається математичний, який ґрунтується на припущенні, що помилки фаз мають випадковий характер з нормальним розподілом з нульовим середнім математичним очікуванням і дисперсією  $\sigma^2$ . При цьому вектор параметрів буде характеризуватися коваріаційною матрицею фаз:

$$K_{\Phi} = \sigma^2 I = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma^2 \end{bmatrix},$$

де  $I$  – одинична матриця вимірів.

Програмна обробка фазових вимірів і використання сформованих фазових різниць при зрівнюванні одинарної базової лінії виконується за таким алгоритмом:

- визначення наближених координат кінця вектора бази абсолютним методом;

- попереднє визначення шуканих координат кінця вектора бази за потрійними різницями (що дає невисоку точність, але підвищений рівень надійності);

- виявлення втрат рахунку циклів і відновлення відліків;

- визначення шуканих координат кінця вектора бази за подвійними різницями з дійсними неоднозначностями (де неоднозначності обчислюються як дійсні числа з плаваючою комою);

- пошук цілих неоднозначностей;

- визначення шуканих координат кінця вектора бази за подвійними різницями з фіксованими неоднозначностями.

Для використання приймачів GNSS, здатних опрацьовувати дані двох СРНС систем (GPS і ГЛОНАСС), були розроблені спеціальні методики сумісного використання даних, які відносяться до різних частот, часу і систем координат [24].

Результати обробки фазових вимірів використовуються в подальшому для зрівнювання геодезичних мереж.

### ***Питання для самоконтролю:***

- 1. Що розуміється під багатозначністю фазових вимірів?*
- 2. Перелічіть джерела виникнення неоднозначності фазових вимірів.*
- 3. Яким чином здійснюється пошук параметра неоднозначності з використанням кодових і фазових вимірювань?*
- 4. Які параметри неоднозначності дозволяють виключити одинарні різниці фаз?*
- 5. Для чого застосовують подвійні різниці фаз?*
- 6. Яким чином виключається  $N_0$  в потрійних різницях фаз?*

## **Розділ 11. ПОБУДОВА ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ З ЗАСТОСУВАННЯМ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

*Висока точність позиціонування об'єктів, що забезпечується фазовими вимірами СРНС, можливість визначення взаємного положення пунктів спостереження, поєднаних великою базою (до декількох тисяч кілометрів), оперативність визначення координат пунктів спостережень спонукала до застосування СРНС у розв'язуванні геодезичних завдань.*

*За допомогою систем GPS і ГЛОНАСС були створені і створюються опорні геодезичні мережі, а можливість позиціонування рухомих об'єктів дозволила використання СРНС у задачах дистанційного зондування землі із застосуванням літальних апаратів при здійсненні топографічного знімання.*

### **11.1. Створення геодезичних мереж методами супутникової радіонавігації**

Опорні геодезичні мережі, що створюються супутниковими методами, прийнято у світовій практиці поділяти на глобальні, континентальні, національні, регіональні і локальні геодезичні мережі. Особливості позиціонування за допомогою СРНС, а саме достатньо висока точність і оперативність визначення координат пунктів у межах земної кулі, були використані при побудові глобальної опорної геодезичної мережі. Глобальні мережі використовують для вивчення геодинамічних явищ за допомогою періодичних уточнень координат пунктів геодезичної мережі, передобчислення точних значень ефемерид НКА, вивчення процесів, що відбуваються в іоносфері і тропосфері. Крім того, радіонавігаційні спостереження можуть використовуватись під час вирішення певних наукових проблем різних галузей. Так, японськими вченими за результатами аналізу іоносферної затримки за декілька хвилин перед землетрусом і цунамі (Фукусіма, 2011 рік) спостерігалось аномальне підвищення концентрації електронів у іоносфері, що було виявлено по збільшенню часу поширення навігаційних радіосигналів.

У 1984 році Міжнародне бюро часу (МБЧ) (Bureau International de l'Heure) на основі супутникових лазерних далекомірних систем (SLR), радіоінтерферометрів із супутникових доплерівських вимірів створило наземну систему – HTS84 (ВІН

Terrestrial System). Призначенням системи було забезпечення точного моніторингу обертання Землі і руху полюсів.

У 1988 році Міжнародна служба обертання Землі IERS (International Earth Rotation Service) замінила ВІН на створену систему координат ITRF 88 (IERS Terrestrial Reference System – Міжнародний наземний референтний каркас), для підтримки якої щорічно вироблялися уточнення через включення в неї нових вимірів і пунктів [28]. ITRF використовувався не лише для встановлення положення і масштабу геоцентричної координатної системи, але і для визначення параметрів обертання Землі і, як наслідок, для встановлення взаємозв'язку із зоряною (небесною) системою координат.

На початку 90-х років була створена Міжнародна служба GPS для геодинаміки (IGS), до складу якої разом з адміністративними підрозділами увійшли не лише численні станції стеження, але і центри з оброблення даних, включаючи й аналіз одержуваних результатів. Точність визначення координат пунктів, що входять до глобальної опорної геодезичної мережі, на початковій стадії характеризувалася середніми квадратичними помилками на рівні близько 15 мм у плані і близько 35 мм по висоті. Пізніше до складу служби IGS увійшли міжнародні центри з оброблення й аналізу одержуваних даних. Для узгодження інформації, що надходила в ці центри, був розроблений спеціальний формат незалежного обміну програмним забезпеченням, який отримав скорочену назву SINEX. У міру вдосконалення методики спостережень і обробки відзначені помилки були зменшені до 5 мм у плані і 8 мм по висоті.

Для контролю за станом вихідної глобальної координатної системи і проведення у разі потреби корегування цієї системи служба IGS з 1 січня 1994 р. перейшла на постійне відстеження координат пунктів глобальної опорної геодезичної мережі і систематичну обробку одержуваних при цьому результатів.

З метою підвищення точності та врахування конкретних континентальних чинників, які здійснюють часовий вплив на визначені координати, були створені континентальні опорні геодезичні мережі. Створення Європейської геодезичної опорної мережі (EUREF) було розпочато наприкінці 80-х років і включало близько 90 пунктів. При її побудові за участю 16 європейських країн разом з використанням GPS були передбачені виміри за допомогою супутникових лазерних далекомірних систем (SLR) і радіоін-

терферометрів з наддовгою базою (VLBI). Отримана при цьому точність, що ґрунтується на формалізованому обліку випадкових помилок вимірів, виявилася на рівні менше 1 см по всіх трьох координатних осях. Водночас, у порівнянні з лазерними вимірами, реальна точність оцінюється на рівні декількох сантиметрів.

У подальші роки EUREF отримала розвиток як за рахунок організації додаткових станцій супутникових спостережень, так і за рахунок підключення до цієї мережі багатьох країн, що раніше не брали участь (Чехія, Угорщина, Польща, Латвія, Україна, Росія тощо).

Стосовно території України, складовими Державної геодезичної мережі є геодезична (планова), нівелірна (висотна) мережа 1–3 класів та гравіметрична мережа 1 класу, пункти яких повинні бути суміщені або мати між собою надійний геодезичний зв'язок [29]. Геодезична мережа включає: українську постійно діючу мережу (УПМ) спостережень GNSS; геодезичні мережі 1–3 класів. Розвиток української постійно діючої мережі спостереження GNSS було розпочато у 1997 році [30].

У 2005 році було розроблено проєкт Концепції створення та експлуатації системи координатно-часового і навігаційного забезпечення України з застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем на період з 2006–2011 роки. Відповідно до цієї Концепції передбачалося створення системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України (СКНЗУ) з застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем для створення умов для гарантованого отримання якісних координатно-часових та навігаційних послуг споживачам інформації ГНСС на всій території України, у національному повітряному просторі та в акваторіях прилеглих морів із необхідними характеристиками по точності, надійності, доступності та сумісності із міжнародними системами навігаційного обслуговування.

Основне завдання СКНЗУ – надання користувачам диференційної коригувальної інформації в реальному масштабі часу, що досягалося завдяки вирішенню таких завдань:

- ведення постійного (із метою контролю цілісності) моніторингу навігаційних полів, створюваних як діючими ГНСС подвійного призначення під військовим контролем – GPS, ГЛОНАСС, так і перспективною цивільною Galileo;



- формування диференційної корегувальної інформації для уточнення цих полів, включаючи формування інформації про їхню цілісність;
- поширення диференційних поправок через супутникові та звичайні канали передачі інформації на територію України і на прилеглі території інших країн.

Архітектура СКНЗУ наведена на рис. 11.1.

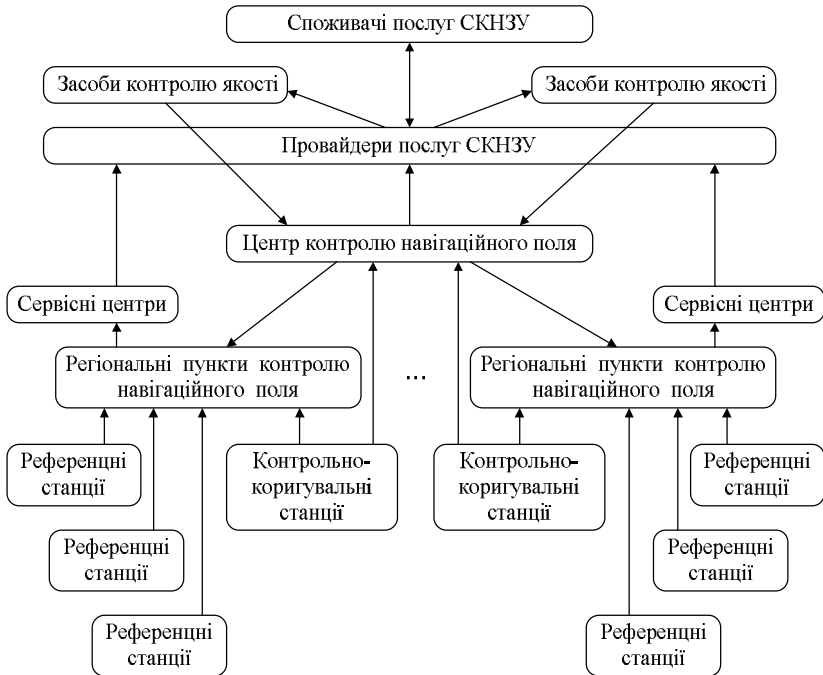


Рис. 11.1. Архітектура СКНЗУ

На другому етапі реалізації проекту (2007–2012 рр.) передбачалося одночасне надання інформації двочастотним користувачам на всій території України з точністю близько 0,1–0,2 м. Для забезпечення розв’язання фазової неоднозначності необхідно розгорнути щонайменше 57 контрольно-коригувальних станцій СКНЗУ (рис. 11.2), рівномірно розподілених по всій території України так, щоб відстань між сусідніми контрольно-коригувальними станціями становила 100–120 км. На жаль, ця програма не була реалізована в повному обсязі.



Рис. 11.2. Мережа контрольно-коригувальних станцій СКНЗУ другого етапу

На 2012 рік на території України діяли 12 постійно діючих станцій спостережень GNSS, які включені до Європейських геодезичних мереж і на яких виконується комплекс супутникових, астрономо-геодезичних, гравіметричних та геофізичних спостережень (рис. 11.3).

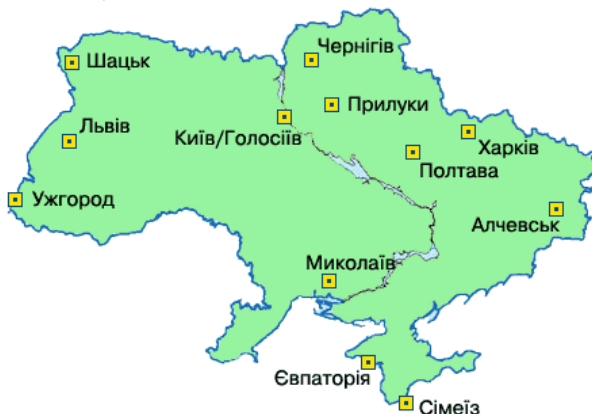


Рис. 11.3. Схема розміщення постійно діючих станцій спостережень GNSS

Сім з них входять до мережі Міжнародної GNSS-служби (IGS – Міжнародна служба GPS для геодинаміки) [31], дев'ять станцій є членами Європейської перманентної GPS-мережі (EPN) [32],

GPS-станція Simeiz (CRAO) входить до Середземноморської GPS-мережі (Mediterranean GPS Network) [33].

До функцій мережі станцій Української постійно діючої мережі GNSS відносяться:

- регулярні супутникові спостереження за міжнародними проектами;
- підтримка систем ITRS і ETRS89 на території України й обчислення параметрів зв'язку системи координат УСК-2000 з цими системами;
- моніторинг вертикальних і горизонтальних рухів земної кори;
- моніторинг пунктів Державної геодезичної мережі, редукування результатів спостережень і координатних визначень на єдину епоху з урахуванням релятивістських ефектів, приливних й інших рухів земної кори;
- побудова моделі квазігеоїда сантиметрової точності для території України;
- впровадження методів і технологій диференційних супутникових визначень (DGPS і RTK).

В IGS за результатами багаторічних спостережень було виділено декілька десятків найбільш стабільних пунктів, які були використані для уточнення Міжнародного наземного референцного каркаса (ITRF). Цей каркас призначений не лише для встановлення положення і масштабу геоцентричної координатної системи, але й для визначення параметрів обертання Землі і, як наслідок, для встановлення взаємозв'язку із зоряною (небесною) системою координат.

За результатами обробки вимірів координат пунктів, що входять до ITRF, було уточнено положення центра мас Землі, який вважається початком геоцентричної системи координат. Досягнута при цьому точність оцінюється середньою квадратичною помилкою на рівні близько 10 см. Вироблювані у зв'язку з цим щотижневі значення протягом декількох років виявили такий розкид зсувів початку координат:

- по осі X від -20 до +60 мм;
- по осі Y від 0 до +90 мм;
- по осі Z від -80 до +30 мм.

Нині кількість станцій GNSS спостережень, які включені до Державної геодезичної мережі, які є складовою Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000, що одержана

від координатної системи ITRS/ITRF 2000 і зафіксована на епоху 2005 року, можна уточнити на електронному ресурсі.

Крім того, в Україні українсько-швейцарським СП System Solutions (ЗАТ «Акціонерна фінансова компанія «Система» (Україна) і Акціонерним товариством Leica Geosystems (Швейцарія)) введена в дію і розбудовується комерційна мережа референцних GNSS станцій, мета якої забезпечення високої точності позиціонування при розв'язанні задач картографічного забезпечення кадастру, промислового та цивільного будівництва, проектних і вишуквальних робіт, прокладання трубопроводів і ліній електропередач, моніторинг зсувів ґрунтів, високоточна навігація на транспорті тощо [34]. Станції обладнані референцними приймачами «північного» типу з веб-доступом GR10 Reference Server, що дозволяють приймати сигнали від СРНС: GPS, ГЛОНАСС, Compass, Galileo, а також від регіональних систем: SBAS: WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS. За даними оператора, до кінця 2013 року планується введення в дію близько 100 референцних станцій.

## 11.2. Зрівнювання геодезичних мереж (вторинне зрівнювання)

Основною особливістю зрівнювання геодезичних мереж, створених за допомогою СРНС, виступає метод їх зрівнювання. При застосуванні СРНС використовується трилатерація, тобто зрівнювання мереж на основі довжин відрізків, поєднуючи геодезичні пункти. **Вторинне зрівнювання**, або зрівнювання супутникових векторних мереж, є необхідним етапом технології геодезичних робіт, головною метою якого є підвищення точності, представлення результатів у потрібній системі координат і одержання оцінки точності. Зрівнювання зазвичай виконується програмним забезпеченням, яке входить до складу НАС фірми виробника.

Процедура вторинного зрівнювання складається з таких завдань [24]:

- узгодження сукупності усіх вимірювань у мережі;
- мінімізація і фільтрація випадкових помилок вимірювань;
- визначення і відбраковування грубих вимірів, виключення систематичних помилок;
- отримання набору зрівноважених координат і відповідних ним базових ліній з оцінкою точності у вигляді помилок або коваріаційних матриць;

- трансформування координат у потрібну координатну систему;
- перетворення геодезичних висот у нормальні висоти.

Процедура зрівнювання супутникових мереж полягає в обчисленні довжин ліній на фізичній поверхні Землі, редукування цих довжин на потрібну поверхню і зрівнювання мережі трилатерації за відомими геодезичними методами.

Робота виконується в такій послідовності [28]:

- визначення всіх ліній у мережі, які були виміряні з достатньою точністю, наприклад, всіх ліній, безпосередньо виміряних двома приймачами;
- відбір із загального числа ліній таких, що задовольняють вимогам до конфігурації геодезичної мережі (за критеріями довжини ліній, кутів у трикутниках, жорсткості геометричних фігур тощо);
- обчислення довжин ліній, відібраних на фізичній поверхні Землі (похилих ліній);
- редукування похилих ліній на задану поверхню відносності (еліпсоїд, площина у трьох або шести градусній зоні, площина місцевої системи координат з умовною висотою й умовним осьовим меридіаном тощо);
- зрівнювання й оцінювання точності одержаної мережі трилатерації з використанням однієї з відомих програм зрівнювання геодезичних мереж.

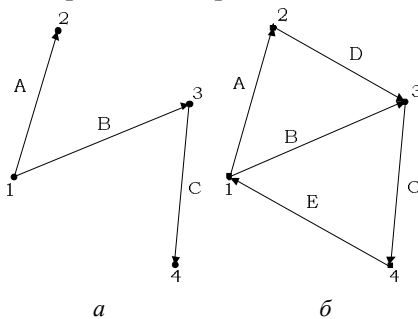


Рис. 11.4. Фрагмент геодезичної мережі: *а* – надлишкові виміри відсутні; *б* – надлишкові виміри є

Обов'язковою умовою зрівнювання геодезичних мереж методом трилатерації є умова надмірності вимірів. На рис. 11.4 відображені фрагменти геодезичних мереж. Наявність надлишкових вимірів у вигляді векторів *D* і *E* (рис. 11.4, *б*) дозволяє кожному з величин, що визначається, отримати багатократно, різними способами (наприклад, точки 3 і 4). При цьому похибки, що наявні при визначенні координат пунктів геодезичної мережі, призведуть до нев'язності векторів геодезичної мережі і появи неоднозначності визначених параметрів – координат і висот.

Зрівнювання виконується для одержання однозначних результатів за рахунок виправлень вимірів такими поправками, за яких усуваються нев'язки і точність параметрів, що визначаються, підвищується [4]. Рівняння зв'язку, за допомогою якого виконується зрівнювання, визначає співвідношення між виміряними величинами (компонентами вектора бази) і параметрами векторної мережі, у ролі яких виступають координати пунктів спостережень [24].

Залежно від складності геодезичної мережі можна застосовувати **корелятний** (для відносно простої мережі) або **параметричний** метод зрівнювання (для складної мережі з великою надмірністю вимірів) [4]. Обидва методи відносяться до строгих методів зрівнювання і використовують метод найменших квадратів (МНК). При рівноточних вимірах координат пунктів мережі задача пошуку поправок за МНК формулюється так, щоб сума квадратів поправок була мінімальною. Для нерівноточних вимірювань мінімізується сума добутків відповідних ваг вимірювань на квадрати поправок.

Перед обчисленням необхідно визначити, що зрівнювати, як визначати ваги, враховувати корельованість або некорельованість вимірів [4].

Для мереж трилатерації зрівнюванню підлягають прирощення координат векторів бази, тобто  $D_x, D_y, D_z$  вектора  $D$ . Ваги  $p_i$  визначаються як відношення дисперсії виміру  $\mu^2$  (вага якого прийнята за одиницю) до дисперсій поточних вимірів  $\sigma^2$ :  $p_i = \mu^2 / \sigma_i^2$ . Дисперсії обчислюються згідно з виразами  $\mu = \alpha + \beta D_{km}^\circ$ ,  $\sigma_i = \alpha + \beta D_{km}$ , де  $D_{km}^\circ$  – довільна величина, яка кількісно дорівнює середньому з довжин векторів, км;  $D_{km}$  – довжина вектора, км; коефіцієнти  $\alpha = 3 - 10$  мм,  $\beta = 1 - 2$  мм/км. Вважають, що  $\mu^2 = 1$ . Ваги  $p_i$  розташовують на головній діагоналі вагової матриці  $P$ , при цьому для рівноточних вимірів  $p_i = 1$ .

Нехтування кореляцією вимірів спотворює поправки з рівняння до 20 %. Для їх врахування складається кореляційна матриця  $K = \mu^2 P^{-1}$ .

### 11.2.1. Корелатний метод зрівнювання

У корелатному методі зрівнювання, який називається ще методом умов, використовуються математичні співвідношення, складені з надлишково вимірними величинами [35]. Задача розв'язується способом Лагранжа з невизначеними множниками – *корелатами*.

Вид співвідношення залежить від характеру прокладеного векторного ходу. Якщо векторний хід утворює замкнений контур (рис. 11.4, б), наприклад, контур, який поєднує пункти 1-3-4-1, то векторна умова набуде вигляду [4]:

$$\sum D_{x,y,z}^{ij} = 0,$$

де  $D_{x,y,z}^{ij}$  – вектор, що пов'язує всі пункти  $i$  і  $j$ .

Якщо вектор прокладений між векторами  $D^A$  і  $D^B$  пунктів 2 і 3 (рис. 11.2, б), координати яких не підлягають виправленню, то векторна умова становитиме:

$$\sum D_{x,y,z}^{ij} - (D_{x,y,z}^A - D_{x,y,z}^B) = 0.$$

Розкладання векторів на складові по трьох координатних осях та підстановка значень вимірювань призведе до отримання трьох нев'язок по відповідних осях  $W_x, W_y, W_z$ :

$$\sum D_x^{ij} = W_x, \text{ або } \sum D_x^{ij} - (D_x^A - D_x^B) = W_x.$$

Кількість нев'язок  $r$  дорівнює потрібному значенню надлишкових векторів.

З математичних співвідношень, пов'язаних з кожною вимірюваною величиною, обирають одне, переважно найбільш просте, і складають рівняння поправок вигляду:

$$\sum B V_x^{ij} + W_x = 0,$$

де  $V_x^{ij}$  – шукані поправки до векторів  $D_{ij}^x$ ;  $B$  – матриця коефіцієнтів перед поправками в умовних рівняннях,  $B = \{1; 0; -1\}$ .

Для всіх умов в мережі отримують систему рівнянь:

$$B V + W = 0.$$

Вектори корелат і поправок обчислюються за формулами:

$$K = - (B P^{-1} B^T)^{-1} W, \quad V = P^{-1} B^T K.$$

Оцінка точності визначається середньоквадратичною похибкою одиниці ваги  $\mu^2 = \frac{V^T P V}{r}$ , де  $r$  – число надлишкових вимірів,  $r = 3d - 3N$ ;  $d$  – кількість базових ліній;  $N$  – кількість визначених пунктів.

### 11.2.2. Параметричний метод зрівнювання

У параметричному методі, званому також *методом необхідних невідомих*, як параметри обирають необхідні величини, такі, щоб їх використання дозволило одержати всі визначувані та вимірювані величини. Для кожної вимірної величини складають параметричне рівняння поправок, в якому вимірну величину виражають через обрані параметри. В подальшому розв'язок зводиться до задачі на абсолютний екстремум [35].

У параметричному методі у результаті зрівнювання отримують поправки  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$  у визначені наближені координати пунктів  $X_0, Y_0, Z_0$  і поправки  $V_x, V_y, V_z$  у «виміряні» прирости векторів баз  $D_x^j, D_y^j, D_z^j$ . Рівняння складають з урахуванням обох видів поправок [4]:

$$\begin{aligned} V_x^{ij} + D_x^{ij} &= (X_0^j + \delta_x^j) - (X_0^i + \delta_x^i); \\ V_y^{ij} + D_y^{ij} &= (Y_0^j + \delta_y^j) - (Y_0^i + \delta_y^i); \\ V_z^{ij} + D_z^{ij} &= (Z_0^j + \delta_z^j) - (Z_0^i + \delta_z^i). \end{aligned}$$

Звідси поправки становлять:

$$\begin{aligned} V_x^{ij} &= \delta_x^j - \delta_x^i + I_x^{ij}, \quad I_x^{ij} = X_0^j - X_0^i - D_x^{ij}; \\ V_y^{ij} &= \delta_y^j - \delta_y^i + I_y^{ij}, \quad I_y^{ij} = Y_0^j - Y_0^i - D_y^{ij}; \\ V_z^{ij} &= \delta_z^j - \delta_z^i + I_z^{ij}, \quad I_z^{ij} = Z_0^j - Z_0^i - D_z^{ij}. \end{aligned}$$

Загальна кількість рівнянь становитиме  $3n$ , де  $n$  – кількість вимірних векторів. Координати опорних пунктів виправленню не підлягають, тобто для опорних пунктів  $\delta_{x,y,z} = 0$ , що спрощує рівняння поправок.

Для всіх рівнянь поправок у векторно-матричному записі матимемо [36]:

$$V = A\delta + I,$$



де  $V$  – матриця поправок у виміряні величини;  $\delta$  – матриця поправок до наближених координат пунктів, що визначаються;  $I$  – матриця вільних членів рівняння поправок  $I_{x,y,z}^{ij}$ ;  $A$  – матриця коефіцієнтів рівнянь поправок розмірністю  $3n \times 3k$ , в якій елементами виступають  $\{+1; 0; -1\}$ . Для станцій  $i$  і  $j$  матриця матиме вигляд:

$$A^{ij} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

в якій кожна базова лінія вносить у матрицю три рядки, а кожній станції належить три стовпця.

Вимога МНК визначає мінімізацію зваженої суми квадратів поправок, для чого необхідно виконати умову  $V^T P V = 0$ , де  $0$  – нульова матриця. Звідси виходить система нормальних рівнянь для обчислення параметрів  $\delta$ :

$$A^T P A \delta + A^T P I = 0.$$

Для оцінки точності обчислюють:

- СКП одиниці ваги:

$$\mu^2 = \frac{V^T P V}{3(n-k)};$$

- коваріаційну матрицю поправок у координати:

$$Q = (A^T P A)^{-1};$$

- СКП  $q$ -ої координати у векторі поправок  $\delta$ :

$$\sigma^2 = \mu^2 Q_{qq},$$

де  $Q_{qq}$  – діагональний елемент на перетині  $q$  стовпця і рядка матриці  $Q$ .

### 11.3. Розв'язування системи рівнянь поправок для мережі

Розв'язування системи рівнянь поправок  $V = A\delta + I$  здійснюється в такому порядку:

- з коваріаційних матриць окремих базових ліній утворюється коваріаційна матриця  $K$  для всієї мережі;

- обчислюється повна вагова матриця  $P$  через визначену апіорну дисперсію одиниці ваги  $\sigma_{apriori}^2$ :  $P = \sigma_{apriori}^2 K^{-1}$ ;

- складається система нормальних рівнянь  $\mathbf{N}\delta + \mathbf{L} = \mathbf{0}$ , де  $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$  – матриця коефіцієнтів нормальних рівнянь;  $\mathbf{L} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$  – матриця вільних членів нормальних рівнянь;

- обчислюється вектор оцінених параметрів  $\hat{\delta} = -\mathbf{N}^{-1} \mathbf{L}$ ;

- обчислюється вектор оцінених поправок у виміри  $\hat{V}$ , знаходиться величина  $\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} = \mathbf{I}^T \mathbf{P} \mathbf{l} - (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l})^T \hat{\delta}$ ;

- оцінюється апостеріорна дисперсія одиниці ваги:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{\mathbf{V}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{V}}}{r},$$

де  $r$  – число надлишкових вимірів,  $r = 3d - 3N$ ;  $d$  – кількість базових ліній;  $N$  – кількість визначених пунктів;

- складання коваріаційних матриць зрівняних параметрів координат пунктів  $\mathbf{K}_\delta$  і поправок у виміри  $\mathbf{K}_{\hat{V}}$ :

$$\mathbf{K}_\delta = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}, \quad \mathbf{K}_{\hat{V}} = \mathbf{K} - \mathbf{A} \mathbf{K}_\delta \mathbf{A}^{-T}.$$

Зрівнювання геодезичних мереж за МНК рідко дає негайні задовільні результати. Тому ці результати повинні бути перевірені або протестовані, що робиться для виявлення та усунення будь-яких помилкових впливів. Одержана коваріаційна матриця  $\mathbf{K}_\delta$ , що містить дисперсії оцінених параметрів і кореляції між ними, використовується для побудови еліпсів (еліпсоїдів) помилок положень пунктів, або еліпсів (еліпсоїдів) помилок ліній, що характеризують точність зрівняних параметрів. Додатково отримані параметри: поправки у вимірювання (остаточні нев'язки)  $\hat{V}_i$ , їх коваріаційна матриця  $\mathbf{K}_{\hat{V}}$ , гістограми розподілу помилок та числа надлишковості  $r$  можуть використовуватись для тестування.

Основними методами тестування є:

- статистичне тестування;
- тест  $\chi^2$  (хі-квадрат);
- тестування помилок вимірювань;
- $\tau$  тест;
- метод data snooping.

**Статистичне тестування** передбачає обирання гіпотез, що описують деяку ситуацію, для якої обчислюються статистики, характеристики яких, наприклад, функція щільності імовірності відома, якщо гіпотеза правильна. Залежно від величини значень статистики, що береться за критерій, виробляється рішення або прийняти, або ні цю гіпотезу. Якщо гіпотеза не приймається, то приймається альтернативна гіпотеза.

**Тест  $\chi^2$  (глобальний тест)** ґрунтується на сумі зважених квадратів поправок  $V$ , числі ступенів свободи  $r$  і рівні довіри (відсоток імовірності). Статистикою для тесту є квадратична форма оцінених поправок. Якщо тест виконаний, це свідчить про нормальний розподіл помилок вимірювань, а також про те, що досягнута точність відповідає очікуваній точності. В іншому випадку необхідно перевірити декілька спостережень або виконати їх повторно.

**Тестування помилок вимірювань** передбачає, що остаточні нев'язки мають нормальний розподіл. При цьому очікується, що порівняно великі нев'язки одержуються значно рідше, ніж малі нев'язки. В подальшому на цій основі робляться висновки про прийняття або усунення аномальних нев'язок.

**$\tau$  (tau) тест** належить групі тестів Стьюдента, які використовують отриману зі спостережень апостеріорну дисперсію величини одиниці ваги. При виконанні  $\tau$  тесту перевіряється гіпотеза про те, що всі нев'язки додержуються нормального розподілу.

**Метод data snooping (перегляд даних)** передбачає, що у наборі спостережень наявний лише один "промах". З цієї позиції здійснюється оцінювання статистики спостережень, де ітераційно видаляються спостереження з найбільшим "промахом".

### **Питання до самоконтролю:**

1. До яких міжнародних геодезичних мереж включені постійно діючі станції спостереження GNSS на території України?
2. У чому полягає процедура вторинного зрівнювання геодезичних мереж, утворених засобами СРНС?
3. Для чого необхідна надлишковість вимірювань?
4. Поясніть сутність корелатного методу зрівнювання геодезичних мереж.
5. Перелічіть основні методи тестування зрівняних геодезичних мереж.

## **Розділ 12. ЗАСТОСУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ**

*Сучасний прикладний розвиток застосувань супутникових радіонавігаційних способів позиціонування отримав розвиток майже у всіх галузях забезпечення національної безпеки держави, національній економіці, передових технологіях, господарській та суспільній діяльності. Залежно від кінцевої мети застосування СРНС для позиціонування довільної точки простору можна розрізнати первинне координатне визначення положення об'єкта у тій чи іншій координатній системі, чи визначення зміни положення об'єкта у часі за рахунок організації періодичних координатних визначень.*

### **12.1. Розв'язування топографо-геодезичних задач**

Основною вимогою до традиційних топографо-геодезичних вимірювань є вимога досягнення високого рівня точності під час проведення зйомки в умовах приземних шарів атмосфери, тобто в умовах середовища з постійно змінними параметрами. Особливістю проведення геодезичних робіт можна вважати застосування, переважним чином, триангуляційних (кутомірних) методів. Альтернативний підхід дає застосування СРНС, що ґрунтується на методах трilaterації, тобто вимірювання дальності до опорних точок з відомими координатами, якими є НКА.

#### ***12.1.1. Концепція геодезичного вимірювання супутникових радіонавігаційних систем***

Застосовність СРНС для розв'язування топографо-геодезичних задач пов'язана з забезпеченням високої точності координатних вимірювань, здатністю визначення взаємного положення віддалених геодезичних пунктів, база між якими може сягати декількох тисяч кілометрів, а також оперативністю і порівняно невеликими трудовитратами вимірювань, що в кінцевому підсумку здешевлює вартість одержаних координатних даних. Сфера застосування також доволі широка, від задач геофізики і вивчення геодинамічних планетарних і континентальних явищ і процесів до локальних задач інженерної геодезії при відведенні земельної ділянки або будівництві споруди.

В основі геодезичного СРНС вимірювання застосовуються диференційні та відносні методи позиціонування, за яких референсна станція (базовий приймач) протягом всього періоду вимірювань розташовується на пункті геодезичної основи з відомими координатами, до якого прив'язується просторовим вектором (базовою лінією) ровер (рухомий приймач), який переміщується по визначених точках (або виносить точки в натуру). Залежно від типу приймача, необхідної точності координатних визначень, часових обмежень на процедури вимірювання використовується диференційний або відносний метод. Диференційний метод дозволяє одержувати дані в режимі реального часу, але потребує організації каналів зв'язку між референчною станцією і ровером для оперативної передачі поправок. Відносні методи ґрунтуються на проведенні сумісної постобробки масивів даних, одержаних як ровером, так і референчною станцією.

Слід зазначити, що геодезичні вимірювання за допомогою СРНС, у порівнянні з традиційними геодезичними приладами (теодоліти, нівеліри, тахеометри тощо), володіють певними технічними особливостями і зумовлюють застосування спеціальних методик проведення вимірювань. При цьому СРНС володіє певними перевагами і недоліками перед традиційними геодезичними методами вимірювань. Так, у СРНС немає обов'язкової умови наявності оптичної видимості між кінцевими (або проміжними суміжними) геодезичними пунктами вектора бази. Це суттєво скорочує обсяг і термін робіт у порівнянні, наприклад, з теодолітною зйомкою. До того ж традиційні геодезичні оптичні спостереження у приземних шарах атмосфери характеризуються високою динамічністю, що ускладнює досягнення необхідної точності.

Додатковими складнощами при організації традиційного геодезичного знімання є складності організації цілодобового знімання. У випадку з СРНС знімання в темну пору доби є переважним, оскільки при цьому мінімізується похибка, яка вноситься іоносферною затримкою поширення радіохвиль. Ще однією перевагою використання СРНС є можливість організації геодезичного знімання у динаміці з підтримкою заданого рівня точності координатних визначень як геодезичних пунктів, так і маршруту руху. При цьому спостерігається суттєве скорочення часу виконання зйомок і, відповідно, її здешевлення. Поширеного використання

СРНС набули у сфері моніторингу геофізичних процесів, які грунтуються на організації постійного спостереження за зсувом геодезичних пунктів, на яких організоване постійне високоточне навігаційне спостереження.

Ці особливості забезпечують ефективність геодезичного знімання, а технологічне, апаратне та програмне удосконалення СРНС суттєво підвищує точність координатних визначень, а отже, і спроможність СРНС замінити методи традиційного геодезичного знімання.

На жаль, існують певні недоліки, які виступають обмеженнями під час проведення геодезичних робіт з використанням СРНС. Основним з них є умова наявності вільного небосхилу для безперешкодного спостереження за сузір'ям НКА, що не завжди можна виконати. Перешкодами на шляху поширення радіохвиль можуть бути дерева, будівлі або інші споруди, які можуть як повністю екранувати трасу поширення радіохвиль, так і бути джерелом додаткових радіозавад, викликаних перевідбиттям навігаційного радіосигналу.

Набуло розвитку сумісне використання методів супутникового позиціонування і традиційної геодезії, причому найбільшого поширення одержало поєднання навігаційних приймачів та електронних тахеометрів [37]. Це дозволяє здійснювати синхронні СРНС спостереження на декількох пунктах з відомими координатами (опорних пунктах) та на визначених пунктах, які забезпечують прив'язування вимірювань координат меж, одержаних за допомогою тахеометрів.

### ***12.1.2. Особливості проведення геодезичних і топографічних зйомок з використанням супутникових радіонавігаційних систем***

Розвиненість нині методів супутникового радіонавігаційного позиціонування дозволяє проводити різноманітні геодезичні і топографічні зйомки, як-то:

- топографічні зйомки;
- створення регіональних, локальних і місцевих геодезичних мереж;
- зйомки, пов'язані з землепорядними роботами;

- геодезичне забезпечення геолого-геофізичних робіт;
- зйомки при прокладенні трас тунелів, шосейних, залізничних трас, трубопроводів, будівництві, спорудженні мостів й інших великих інженерних споруд тощо;
- зйомки, пов'язані з веденням лісового господарства, тощо.

Під час організації геодезичних робіт основним критерієм застосування радіонавігаційних систем є здатність системи до точного позиціонування в заданих умовах. Точне знімання з використанням лише методів супутникового радіонавігаційного позиціонування, як свідчить досвід, можливе лише за умови відкритої місцевості. Інакше за наявності обмежувальних факторів (у випадку екранування суттєвої частини небосхилу) можливе застосування комбінованих методів, які ґрунтуються на сумісному раціональному використанні супутникових спостережень поряд з вимірами наземних геодезичних приладів. Для мінімізації помилок вимірювань, пов'язаних з явищем багатопутності поширення навігаційного радіосигналу, бажане використання додаткових заходів усунення або послаблення відбитих променів. При вирішенні цієї проблеми застосовують три основні способи [38]:

- збільшення відношення рівня корисного прямого радіосигналу до відбитих (паразитних) радіосигналів встановленням додаткових екрануючих пристроїв на шляху їх поширення;
- максимальне підняття антени приймача над підстилаючою поверхнею з метою мінімізації потрапляння до фазового центра антени відбитих від землі радіосигналів, а відповідно, і їх послаблення;
- удосконалення методів обробки навігаційного радіосигналу з метою підвищення його завадозахищеності.

Застосування подібних способів дозволяє використати методи позиціонування СРНС для створення знімального обґрунтування земельних ділянок у складних умовах багатоповерхової забудови. Поширення отримало використання локальних геодезичних мереж, для яких властиві невеликі відстані між геодезичними пунктами і порівняно невеликі вимоги точності координатних визначень. При цьому застосування таких мереж дозволяє використовувати порівняно недорогі одночастотні приймачі, які в поєднанні з наведеними способами і не перевищенні базових лі-

ній довжиною 10–15 км, забезпечують необхідну точність координатних визначень (середньоквадратичні помилки: до 2 см у плані; до 5 см по висоті) і є економічно необтяжливими. Для базових ліній, довших 15 км, доцільним є використання двочастотних геодезичних приймачів, де завдяки прийому на двох частотах можливе прогнозування і корегування іоносферної затримки навігаційної радіохвилі, а також більш швидкий алгоритм розв’язку задачі неоднозначності фазових вимірювань, але вартість таких приймачів орієнтовно вдвічі вища за вартість одночастотних.

Особливістю застосування СРНС для геодезичних вимірювань з використанням місцевих геодезичних мереж є вимірювання висот, одержуваних з нівелювання. Проблема полягає в тому, що супутникові системи дозволяють одержувати геодезичні висоти і відносяться до поверхні еліпсоїда обраної геодезичної координатної системи, які суттєво різняться від нівелірних висот. За деякими оцінками, похибки такого роду можуть сягати 40 см і більше. Розв’язування цієї проблеми ґрунтується на включенні у створювані місцеві геодезичні мережі пунктів з відомими з нівелювання висотними відмітками. Решта висотних відміток знаходиться через прокладання нівелірних ходів. Інший підхід, який дозволяє одержати висотні вимірювання для всієї створюваної мережі, полягає в сумісному застосуванні методів супутникового позиціонування та гравіметрії.

Іноді для подолання проблеми екранування небосхилу рекомендують використання *подовжньої полегшеної щогли*, довжина якої визначається характером перешкод, що “затінюють”. При цьому необхідно забезпечити стійкість (нерухомість) щогли при впливі зовнішніх чинників. Точність вимірювання при застосуванні стійкої щогли ідентична точності при вимірах на відкритій місцевості.

Супутникове радіонавігаційне позиціонування придатне також і для визначення *орієнтирних напрямів* (вимірювання кутових величин), що використовуються у триангуляційних геодезичних методах, оскільки одержувані у просторі базові вектори характеризуються не тільки лінійною довжиною, але й азимутом. Також орієнтирні методи застосовуються при будівництві тунелів, спорудженні мостів, прокладанні магістральних трубопроводів. Похибка визначення кутових величин залежить від довжини базової лінії, збільшення якої призводить до зменшення похибки.



Зазвичай кутова похибка становить декілька кутових секунд. Досвід проведення робіт з будівництва тунелів визначає похибку визначення кутової міри на рівні близько однієї кутової секунди при взаємній відстані між станціями не меншій за 400 метрів [38].

Загалом, застосування СРНС для розв'язування геодезичних задач дозволяє зменшити час геодезичного знімання, автоматизувати суттєву частину робіт, виконуваних уручну, забезпечити необхідну точність і знизити вартість проведення робіт. Окремо слід зауважити, що іноді під час проведення геодезичних зйомок вимоги точності до отриманих координат не завжди економічно виправдовують застосування коштовних моделей двочастотних геодезичних приймачів. Останнім часом спостерігається розвиток некоштовних кодових супутникових приймачів, що мають функцію диференціальних визначень у реальному масштабі часу. Тому вибір застосування того чи іншого приймача обґрунтовується економічними міркуваннями за умови досягнення необхідної точності координатних визначень.

### ***12.1.3. Радіонавігаційне позиціонування під час проведення аерозйомок***

Фотограмметрична технологія створення карт пов'язана з високою точністю вимірювання координат об'єктів простору поряд з високою продуктивністю координатних визначень (вимірюються не координати множини об'єктів, а їх зображення). Технологія фотограмметрії передбачає проведення дистанційного зондування земної поверхні з будь-якого літального апарата в тому чи іншому діапазоні хвиль (від часток мікрометра – оптичний діапазон, до метрів – радіохвилі). Проведення аерознімальних робіт при створенні карт місцевості пов'язане з багатьма проблемами, однією з яких є зовнішнє орієнтування аерофотознімальної камери (визначення трьох координат фокусного центра об'єктива, позовжнього і поперечного кутів нахилу знімка і кута повороту) у режимі реального часу з заданою точністю.

Одним з напрямів вирішення цієї проблеми є застосування СРНС, що дозволяє одержати дециметровий рівень точності координатних визначень аерофотокамери при застосуванні диференціальних методів супутникового позиціонування. Досягнення високої точності стало можливим завдяки реалізації швидкого

методу розв'язання неоднозначності фазових вимірів (*OTF – On The Fly*), який забезпечує ініціалізацію приймача при спостереженнях лише протягом декількох епох. Навігаційні приймачі встановлюються на літальному апараті, при цьому основними вимогами щодо їх встановлення є:

- визначення елементів ексцентриситету фазового центра антени навігаційного приймача і фокусного центра знімальної камери (що пов'язано з неможливістю їх просторового суміщення). Елементами ексцентриситету виступають відстань між фазовим центром антени і три кути орієнтації. Для забезпечення цього під час польоту можуть використовуватись рознесені у просторі три антени навігаційного приймача або спеціалізоване бортове обладнання (нахилометри);

- забезпечення синхронності роботи затвора аерофотокамери з моментом координатних визначень навігаційного приймача. Асинхронність роботи призводить до помилкового визначення координат фокусного центра фотокамери в момент зйомки, що вносить похибку в точність координатних визначень об'єктів фотографування. Величина похибки залежно від інтервалу розсинхронізації може сягати декількох метрів;

- застосування алгоритмів швидкого розв'язування неоднозначності фазових вимірів для ініціалізації навігаційного приймача на початку польоту або безпосередньо в польоті (у разі втрати рахунку цілих фазових циклів спостережуваних НКА, що може статися, наприклад, у момент нахилу літака під час повороту).

Крім позиціонування аерофотокамери у просторі, супутникові радіонавігаційні визначення застосовуються для водіння літаків по маршрутах знімання. Для цього використовують у режимі реального часу той самий приймач, що позиціонує аерофотокамеру. Досягнення характерного для аерознімальних робіт водіння літака з точністю на рівні близько 10 м не викликає суттєвих ускладнень.

## **12.2. Застосування супутникових радіонавігаційних систем у задачах моніторингу**

Довкілля являє собою систему об'єктів, явищ, процесів природного, технічного, біологічного, техногенного, соціального або іншого характеру, які характеризуються властивостями і мають певне положення у просторі. Під моніторингом розуміється

*спостереження за довкіллям, що має динамічну природу, тобто систему, що постійно змінюється, з метою її контролю, вивчення, прогнозу й охорони* [39]. Своє застосування тут також знайшли методи супутникового позиціонування, які використовуються для моніторингу систем, пов'язаних з визначенням просторового положення елементів цих систем у геопросторі.

### **12.2.1. Геодинамічний моніторинг**

Задачами геодинамічного моніторингу є відстеження, дослідження, оцінювання і прогнозування різних деформаційних процесів, що відбуваються з відносно статичними об'єктами в геопросторі, таких як зсуви земної поверхні, льодовиків, об'єктів будівництва та суміжних об'єктів, осаду або відхилення об'єктів від вертикалі тощо.

Цілями проведення геодинамічного моніторингу є:

- визначення абсолютних і відносних величин деформацій;
- виявлення причин виникнення деформацій і гранично допустимих величин деформації;
- прогнозування розвитку деформаційних процесів і попередження можливих ризиків;
- вживання своєчасних заходів із запобігання розвитку деформації, де це можливо.

Перевагами СРНС перед іншими геодезичними методами в задачах геодинамічного моніторингу є глобальність застосування і можливість безперервного позиціонування протягом тривалого часу (за умови доступності НКА). Це зумовило застосування СРНС у задачах оперативного, постійного і детального моніторингу деформаційних процесів, що відбуваються в земній корі, для чого була створена Міжнародна служба GPS для геодинаміки (IGS). Для ведення геодинамічного моніторингу використовуються геодезичні мережі, де в геодезичних пунктах встановлені навігаційні приймачі, які здійснюють постійне спостереження за НКА. Залежно від масштабів об'єкта дослідження геодинамічний моніторинг земної поверхні засобами СРНС поділяється на [40]:

- моніторинг загальноземних координатних систем ITRF, що включає моніторинг тектонічних плит, параметрів обертання Землі, параметрів руху супутників GPS і ГЛОНАСС, що використовує глобальні та континентальні геодинамічні мережі;

- моніторинг у регіональних геодинамічних мережах;
- локальний геодинамічний моніторинг земної поверхні;
- моніторинг рівня води, поверхні снігу або льоду, руху льодовиків.

На відміну від моніторингу традиційними геодезичними методами, застосування яких передбачає періодичне вимірювання з певною частотою (рік, місяць, тиждень тощо) і вимагає суттєвих людських трудовитрат, моніторинг за допомогою навігаційних приймачів дозволяє одержувати оперативні дані в довільний момент часу з сантиметровою (іноді з міліметровою) точністю. Достиження такої точності вимагає статичних вимірів із застосуванням двочастотних навігаційних приймачів. Періодичність отримання даних залежить від необхідної координатної точності і може становити від миттєвого отримання даних до необхідності спостереження протягом декількох тижнів [41]. Регулярне отримання точних координатних даних геодезичних пунктів дозволяє складати динамічні карти руху земної поверхні, моделювати і прогнозувати розвиток деформаційних процесів, визначати тектонічну активність, встановлювати істинне положення наземного референцного каркаса.

Залежно від масштабу геодезичної мережі, економічної можливості та доцільності виділяють три основні види моніторингу, які визначаються режимом застосування геодезичних приймачів:

- постійно діючі GNSS мережі, при яких масиви навігаційних приймальних станцій мають постійне розташування на геодезичному пункті;
- польові кампанії, при яких геодезичні приймачі періодично, за визначеним розкладом встановлюються на геодезичних пунктах мережі. Зйомки можуть виконуватися статичним або кінематичним методом;
- мультимодальні (багаторежимні) зйомки, які полягають у комплексному застосуванні двох попередніх методів. У цьому разі польові приймачі позиціонують відносно приймачів постійно діючої GNSS.

Останні два види моніторингу застосовуються здебільшого в регіональних і локальних геодинамічних мережах. Підвищення точності таких мереж забезпечується введенням надлишкових

зв'язків між пунктами мережі, відстань між якими зазвичай не перевищує 10–20 км. При обробці даних може здійснюватися прив'язування до геодезичних пунктів IGS, але іноді таке прив'язування вносить додатковий шум у виміри, тому вважається, що більш доцільним тут є точне визначення взаємного положення геодезичних пунктів.

### ***12.2.2. Моніторинг деформацій інженерних споруд***

На сьогодні є чисельні приклади використання геодезичних навігаційних приймачів для моніторингу деформацій і зсувів елементів конструкцій при будівництві й експлуатації різноманітних будівель, башт, енергетичних, гідротехнічних, транспортних споруд цивільного та військового призначення. Подібні деформації пов'язані зі старінням конструкцій і зміною їх фізико-механічних властивостей, сейсмічних явищ і зсувів ґрунтів в їх основі, накопиченням остаточних деформацій тощо. Систематичне проведення такого моніторингу є дуже важливим для забезпечення безаварійного будівництва і використання зазначених об'єктів, зниження ризиків, запобігання аваріям і катастрофам і, відповідно, уникнення людських і матеріальних втрат.

До недоліків моніторингу з застосуванням СРНС слід віднести втрату точності позиціонування у порівнянні з традиційними геодезичними методами, яка на коротких базових лініях (1–2 км) становить одиниці міліметрів. Також певним ускладненням при організації моніторингу є можливість екранування елементами інженерних споруд частини небосхилу. Але можливість організації постійного координатного спостереження деформаційних процесів, відсутність потреби періодичного калібрування обладнання і зумовило широке застосування СРНС у задачах моніторингу різноманітних інженерних споруд.

У ході моніторингу деформацій розрізняють періодичні (добові або сезонні) ефекти, пов'язані з термоеластичною деформацією, і деформаційний рух. Періодичні ефекти при обробці спостережень сприймаються як шум і видаляються, зазвичай, методами спектрального аналізу. Паразитним явищем є випадки маскування сигналу під шум, який насправді відображає рух об'єкта моніторингу.

При організації спостережень використовуються диференційні або відносні методи, за яких два (або більше) референсні приймачі встановлюються поза межами об'єкта, до яких прив'язується множина базових ліній, кількість яких визначається масштабом моніторингу, розміром і складністю об'єкта. Частота виміру координатних даних визначається періодичністю зйомки: у випадку стаціонарного встановлення ровера на точці моніторингу частота отримання даних може сягати 20 вимірювань на секунду; при використанні рухомого ровера (що вимагає значно менших витрат на моніторинг) частота визначається інтервалом його встановлення на точці моніторингу.

Поряд з геодезичними приймачами під час моніторингу споруд також широко застосовується звичайне геодезичне обладнання, яке дозволяє підвищити точність моніторингу деформацій або доповнити СРНС спостереження в умовах, непридатних для їх застосування.

### ***12.2.3. Моніторинг навколишнього середовища***

Застосування СРНС для моніторингу навколишнього середовища здійснюється у двох можливих варіантах:

- позиціонування точки моніторингу стану навколишнього середовища в тій чи іншій системі координат. У цьому разі ця точка відображає числове або якісне значення певного показника або властивості явища, процесу, об'єкта тощо;
- визначення фізичних характеристик середовища поширення навігаційного радіосигналу.

Позиціонування точок моніторингу пов'язано виключно з фіксацією точки геопростору, в якому спостерігається певне природне або техногенне явище, відбувається процес зміни якогось показника або характеристики, властивої саме для цієї точки простору. Залежно від режиму зняття характеристик (відбирання проб) позиціонування точки моніторингу може здійснюватись в автоматичному, автоматизованому або ручному режимі. Автоматичний режим передбачає наявність певного автономного пристрою визначення показника, властивості, характеристики якогось явища (наприклад, автоматичний реєстратор забруднення повітря, що може використовуватись у місті, автоматичний вимірювач дози радіоактивного випромінювання тощо). Необхідність застосування автоматичних

приладів моніторингу пов'язана з неможливістю або недоцільністю безпосередньої участі людини у вимірюваннях унаслідок, наприклад, небезпеки для життя та здоров'я або виробничої доцільності автоматизації рутинної роботи. У цьому разі моніторинговий пристрій синхронізується з навігаційним приймачем, причому пристрій відбирає пробу, фіксує певне значення, а навігаційний приймач фіксує координати місця відбору проби. Інформація при цьому може зберігатися в запам'ятовуючому пристрої або передаватися в аналітичний центр в on-line режимі по каналу зв'язку (наприклад, з застосуванням мереж GSM і протоколу GPRS або безпроводових мереж доступу Wi-Fi).

Автоматизований і ручний режим позиціонування точки моніторингу докільця передбачає наявність оператора у разі проведення вимірів. У першому режимі пристрій вимірювання також може бути технічно суміщений з навігаційним приймачем. У ручному режимі внесення даних про координати точки моніторингу здійснює особисто оператор.

Інше застосування моніторингу навколишнього середовища, а саме визначення фізичних характеристик атмосфери дозволяє оперативно контролювати такі основні параметри:

- концентрація водяної пари в атмосфері;
- стан іоносфери.

Радіонавігаційні технології дозволяють отримати абсолютний вміст водяної пари в атмосфері (або парціальний тиск), а не відносну вологість, що залежить від температури (невідомої для дослідника). Концентрація водяної пари в атмосфері відіграє суттєву роль у глобальному кліматі, стійкості атмосфери, структурі та еволюції штормових систем. Відомо, що вплив концентрації водяної пари на поширення радіохвилі відбувається через збільшення затримки її поширення (до 20 разів) у порівнянні з іншими компонентами атмосфери (азот, кисень, вуглекислий газ, аргон), що пов'язано зі структурою молекули води. Отже, якщо знати концентрацію «сухих» газів із вимірюного тиску повітря на поверхню, координати навігаційного приймача та ефемериди НКА, кута місця НКА, а також час затримки радіонавігаційного сигналу, можна обчислити вміст парів води в атмосфері. Такі дослідження дозволяють підвищити точність метеорологічних прогно-

зів і кліматичних досліджень, що загалом може підвищити безпеку повітряних перельотів та морських шляхів, забезпечити підвищення ефективності сільського господарства за рахунок точного моделювання кліматичного стану [42].

Стан іоносфери може досліджуватись з різною науковою і практичною метою, як-то:

- іоносферне забезпечення диференціальних і відносних вимірювань;
- іоносферне забезпечення частотно-диспетчерської служби короткохвильового радіозв'язку [43];
- контроль іоносферних збурень, пов'язаних з ядерними випробуваннями;
- використання спостережень за іоносферними аномаліями для прогнозування землетрусів [44] тощо.

У всіх випадках стан іоносфери оцінюють за затримкою поширення радіонавігаційних сигналів, що визначається повним електронним вмістом на трасі поширення. Для цього можуть використовуватись два основні методи:

- визначення затримки радіонавігаційного сигналу навігаційними станціями з чітко визначеними координатами (контрольно-вимірювальні станції наземного сегмента контролю та керування, референсні станції опорної геодезичної мережі тощо). При цьому задача визначення затримки зводиться до визначення псевдодальності при відомих координатах пункту спостереження і положення НКА у просторі та обчислення часової похибки поширення радіонавігаційного сигналу;
- визначення іоносферної затримки з використанням лінійних комбінацій фазових вимірів у діапазонах L1 і L2. У цьому випадку, як правило, використовуються мережі двочастотних навігаційних приймачів, що дозволяє аналізувати стан іоносфери в межах простору над мережею.

#### ***12.2.4. Моніторинг положення об'єктів***

Обидві системи, як GPS, так і ГЛОНАСС, створювались як військові системи забезпечення координатного позиціонування мобільних об'єктів, якими можуть виступати підрозділ або окремих солдат, одиниця бойової техніки або засіб ураження. Головним при цьому було координатне визначення у режимі реального



часу з заданою точністю. Згодом ця функція знайшла застосування у цивільних системах моніторингу рухомих об'єктів, причому рухомим об'єктом може вважатися як наземний, повітряний або морський транспортний засіб, так і окрема людина.

Залежно від методу застосування супутникового позиціонування розвиток отримали два різновиди моніторингу мобільних об'єктів:

- засоби персонального позиціонування;
- диспетчерські служби моніторингу рухомих засобів.

Метою засобів персонального позиціонування є доведення до оператора (водія, керівника, капітана, командира, індивідуума, системи автоматичного управління тощо) у режимі реального часу параметрів вектора положення об'єкта навігації (точних координат, швидкості, курсу, прискорення). Одержання такої інформації необхідно для прийняття директивного рішення щодо зміни просторового стану рухомого засобу, причому таке рішення може приймати як людина, так і пристрій автоматичного управління. Іноді для одержання додаткових характеристик положення на транспортному засобі можуть встановлюватися додаткові антенні пристрої або навігаційні приймачі. Переважно, такими засобами є літаки, морські судна, нафтові морські платформи, баштові та портові крани тощо. Використання диференційних методів дозволяє одержувати точність позиціонування на сантиметровому рівні, що необхідно при керуванні складними технічними засобами. Подібні точності необхідні для утримання нерухомого положення нафтових платформ при видобутку нафти, веденні підйомно-завантажувальних робіт портовими кранами, гірничодобувній галузі для виїмки породи та контролю ухилу в режимі реального часу.

Можливість одержання вектора положення в режимі реального часу слугувало розвитку систем наведення високоточної зброї. Засоби навігації знайшли широке застосування в технологіях безпілотних літальних апаратів. Мініатюризація навігаційних приймачів, розмір яких зменшився до декількох кубічних сантиметрів, забезпечує зменшення вагових та габаритних показників високоточної зброї та її здешевлення у порівнянні з високоточною зброєю з системами лазерного наведення. Також мініатюризація наві-

гаційних приймачів сприяє створенню автономних розвідувальних роботів. Поєднання сучасних засобів зв'язку, розвідки та навігаційних систем дозволяє застосовувати солдата на полі бою як окрему бойову одиницю, який повною мірою володіє інформацією про хід бойових дій. Проблемою застосування СРНС для військових потреб є порівняно невисока завадозахищеність радіонавігаційних каналів, для чого розробляються додаткові заходи, як-то введення М-коду в GPS з підвищеною потужністю сигналу.

Диспетчерські служби, до яких можна віднести служби моніторингу рухомого складу спеціальних служб (швидка допомога, поліція, надзвичайних ситуацій), інкасаторські служби, системи охорони транспорту (відстеження вантажів, сигналізація від угону, зазначення маршруту викраденого автомобіля та блокування систем запалювання двигуна), комунальні служби, таксі, служби перевезення пасажирів, авіадиспетчерські служби, системи моніторингу місцеположення суден в умовах приберегового плавання, передбачають використання каналів радіозв'язку, по яких до диспетчерського центру передаються телеметричні дані (складові вектора положення рухомого засобу). У диспетчерському центрі здійснюється відстежування підконтрольних транспортних засобів по електронній карті, координація дій та направлення допомоги у випадку позаштатної ситуації. Зазвичай, для цілей диспетчерських систем достатньо використання одночастотних навігаційних приймачів і абсолютного методу позиціонування, що загалом забезпечує точність позиціонування залежно від умов спостереження НКА в межах 40 метрів.

Залежно від зони моніторингу для зв'язку транспортного засобу з диспетчерським центром можуть використовуватися системи транкінгового радіозв'язку, GSM (глобального мобільного зв'язку) або канали супутникового зв'язку. Найбільше поширення отримало застосування системи супутникового мобільного зв'язку IMMARSAT, що включає мережу геостационарних супутників зв'язку, які забезпечують зв'язок з наземними абонентами та мережу супутників зв'язку на похилих орбітах для забезпечення зв'язку між геостационарними супутниками.

Крім визначення складових вектора положення, системи моніторингу мають певні сервісні служби, зокрема контроль відхилення від маршруту руху, визначення відстані до заданої точки, поз-

начення точки положення та маршруту руху на електронній карті, контроль за цілісністю вантажу, температурним режимом тощо.

Останнім часом набуло розвитку застосування технологій супутникового позиціонування для дослідження міграцій популяцій тварин. Okремо слід звернути увагу на розвиток сервісу позиціонування домашніх тварин, на нашійнику яких закріплюється GPS-трекер, а інформацію про місце знаходження тварини можна отримати навіть по мобільному телефону через мережу Інтернет.

Мініатюризація навігаційних приймачів дозволяє інтегрувати їх у мініатюрні електронні пристрої, годинники, мобільні телефони та портативні комп'ютери для індивідуального позиціонування власника, фотоапарати (для позиціонування точки знімання з наступним закріпленням фотознімку в картографічному електронному сервісі, що отримало назву – геотеґінг). Розвиток безпроводових та геоінформаційних технологій сприяють появі різноманітних електронних сервісів, що забезпечують надання інформації, прив'язаної до точки позиціонування абонента.

### **12.3. Суміщення методів супутникового радіонавігаційного позиціонування з альтернативними методами координатних визначень**

Обмеження використання методів супутникового позиціонування, що пов'язані з випадками екранування частини небосхилу, малої кількості НКА у зоні прямої видимості, їх несприятлива геометрія або іншими несприятливими умовами поряд з необхідністю оперативного одержання позиційних даних зумовили сумісне застосування методів СРНС з іншими методами координатних визначень.

#### ***12.3.1. Використання псевдосупутників***

Одним із способів збільшення кількості видимих НКА є використання псевдосупутників, тобто радіонавігаційних передавачів, які розташовані в різних точках земної поверхні з відомими координатами. За деякими оцінками вважається, що застосування псевдосупутників у бойових умовах суттєво підвищує боездатність СРНС при навмисному впливі засобів радіоприглушення [45].

Псевдосупутники передають радіонавігаційні сигнали, схожі за структурою на сигнали СРНС GPS. Приймання цих сигналів

забезпечується спеціальними приймачами GPS з додатковими модулями радіоприймального тракту та модифікованим програмним забезпеченням. Режими роботи аналогічні режимам стандартних GPS приймачів: кодові та фазові визначення за абсолютним, диференціальним та відносним методом. Найбільший корисний ефект застосування псевдосупутників спостерігається при визначенні висотних координат, точність яких сягає сантиметрового рівня [46].

### ***12.3.2. Використання інерціальної апаратури***

Сутність дії інерціальної апаратури (гіроскопів) полягає у безперервному вимірюванні трьох взаємно ортогональних компонентів прискорення, їх інтегрування й обчислення миттєвих швидкостей для одержання поточного положення об'єкта. Поєднання інерціальних приладів з приймачами СРНС суттєво підвищує надійність вимірювань, що відбувається за рахунок одержання первинних даних з інерціальної системи про початковий стан об'єкта у просторі. У випадку зникнення сигналу з НКА інерціальна система продовжує спостереження просторового стану об'єкта, що в подальшому сприяє швидкому й ефективному захвату радіонавігаційного сигналу.

Також безперервні вимірювання інерціальною апаратурою швидкості об'єкта дозволяють звузити смугу пропускання радіоприймального тракту навігаційного приймача для оцінювання у режимі реального часу величини доплерівського зсуву радіонавігаційних сигналів та визначення вектора користувача доплерівським методом позиціонування. Загалом, поєднання інерціальних систем з апаратурою СРНС дозволяють суттєво підвищити оперативність, надійність і завадозахищеність супутникових методів позиціонування і знаходять широке застосування на практиці в авіації, автоматичній гірській промисловості, сільському господарстві, землечерпальних роботах, управлінні автотранспортними засобами, залізничному та водному транспорті [47–50].

Цікавим є приклад розроблення модуля навігації пішохода (Pedestrian Navigation Module, PNM), який залишається функціональним у закритому приміщенні, підземних переходах або місцях затінення висотними спорудами. Структура модуля PNM має у своєму складі навігаційний приймач GPS, цифровий магнітний

компас із вбудованими програмними геоінформаційними алгоритмами навігації, барометра-висотоміра і гіроскопа. Проектним призначенням модуля є навігація сліпих, для чого він оснащувався голосовими функціями. Додатковими функціями є застосування модуля для навігації рятувальних груп, солдатів на полі бою тощо. Точність позиціонування приладу при масі 150 грамів сягає 10 метрів [51].

### ***12.3.3. Інтеграція супутникових радіонавігаційних систем з електронними геодезичними приладами***

Інтеграція в єдиній геодезичній системі електронного тахеометра і супутникового приймача (рис. 12.1) дозволяє значно підвищити ефективність польових вимірів та забезпечує скорочення часу на підготовку до зйомки за деякими оцінками до 80 %.



*Рис. 12.1. Тахеометр Topcon GPT-9000A*

Скорочення часу досягається завдяки відсутності необхідності пошуку опорних пунктів на місцевості. При цьому прилад встановлюється на відкритій місцевості, де GPS-приймач позиціонує поточне просторове положення станції з використанням RTK-технології, що в подальшому використовується як вихідні положення пікетів для виконання вимірювань. Точність визначення місця розташування становить 10 мм + 1 ppm у плані і 20 мм + 1 ppm по висоті при видаленні від базової станції до 50 км. Під час супутникових вимірів на екран приладу виводиться необхідна інформація, включаючи геометричні характеристики розташування супутників, геометричні фактори зниження точності, визначені координати і ре-

зультати оцінювання точності RTK-рішення. Дані GPS і тахеометричної зйомки зберігаються в єдиному форматі та єдиному проєкті, що зручно для їх подальшого застосування.

При використанні інтегрованого приладу відпадає необхідність у наявності опорного обґрунтування, а також у проєкції довгих ходів і виконання зворотних зарубок. Це особливо актуально при вимірах на великих площах, а також у населених пунктах і на будівельному майданчику, де геодезичне обґрунтування недостатньо розвинене або опорні пункти закриті спорудами, тимчасовими конструкціями, технікою і будівельними матеріалами. У зоні прийому поправок базової станції зйомка виконується легше, швидше і з меншою кількістю перестановок приладу на місцевості. Одним приладом можна визначити координати пунктів вимірювань, виконати зйомку або розбивку, не витрачаючи час на обробку та передачу даних з GPS-пристрою в електронний тахеометр, при цьому виключаються помилки, що виникають при спільній обробці даних супутникових і традиційних вимірювань, та не вимагається додаткових витрат на навчання користувачів. Інтегровані прилади можуть використовуватись у режимі доповнення один одного. При цьому тахеометр застосовується у закритих районах, а GPS-технологія на відкритих територіях або у випадках відсутності прямої видимості між пунктами. Якщо пряма видимість під час зйомки тахеометром відсутня, швидка зйомка точок за допомогою GPS позбавить необхідності пошуку нової станції для тахеометра, його пересування й установки. Одночасне використання приладів може збільшити достовірність даних за рахунок вимірювання точок двома методами для незалежного контролю та підтвердження точності зйомки [52].

#### ***12.3.4. Спільне застосування висотомірів і приймачів супутникових радіонавігаційних систем***

Інтеграція методів визначення висотних координат з методами супутникового позиціонування дозволяє суттєво підвищити точність і вірогідність визначених координат, у тому числі висотних. Завдяки висотомірам в інтересах супутникового позиціонування фактично будується додаткова поверхня положення об'єкта навігації. При цьому точність визначення поверхні залежить від типу радіовисотоміра та його класу точності. Найбільш поширеним є поєднання НАС з такими типами висотомірів:

***Барометричний висотомір*** призначений для визначення барометричної висоти або відносної висоти польоту. Точність вимі-

рювання барометричних висотомірів (допустима похибка вимірювань) визначається діючими стандартами і лежить, здебільшого, в межах до 10 м.

**Радіотехнічний висотомір**, принцип дії якого заснований на вимірюванні відрізка часу між посилкою і прийомом електромагнітних хвиль, відбитих від поверхні, до якої вимірюється висота (земля або вода). На практиці радіовисотоміри використовуються на малих висотах, поблизу земної або водної поверхні, тому застосування цієї технології з великих висот вимагає потужного джерела випромінювань, а також апаратури, здатної ефективно протистояти завадам. Один з основних недоліків полягає в ефективному застосуванні висотомірів цього типу тільки на рівнинній місцевості і практичною непридатністю в гірських районах. Інакше їх сумісне застосування з приймачами СРНС обмежено необхідністю апріорного знання рельєфу земної поверхні для точки проєкції радіонавігаційного приймача.

**Гамма-променевий висотомір**, в якому використовується джерело гамма-випромінювання. Приймач фіксує зворотне фотонне випромінювання, відбите від об'єктів підстилаючої поверхні. Цей тип висотоміра володіє високою точністю, стійкий до впливу різного роду перешкод, що впливають на точність вимірювань, проте його недоліки аналогічні недолікам радіометричного висотоміра.

Окремо слід звернути увагу на використання на практиці з метою авіанавігації GPS-приймачів. При цьому здійснюється передобчислення координат, пов'язане з високими швидкостями авіазасобів і фактичним відставанням визначених координат від реальних.

### ***12.3.5. Приклади інтеграції приймачів супутникових радіонавігаційних систем з іншими приладами***

Відомі технології об'єднання GPS з іншими системами дистанційного вимірювання, наприклад, мікрохвильовими системами дистанційного зондування (типу синтезованого апертурного радара – SAR), мікрохвильовими і лазерними альтиметрами, лазерними сканерами, аерофотокамерами тощо.

Іншим напрямом сумісного використання супутникових навігаційних систем є об'єднання супутникових систем з наземними

радіонавігаційними системами. Є приклади інтегрування GPS і ГЛОНАСС з наземними радіонавігаційними системами «Logan-C» і «Чайка». Мотивацією такого об'єднання є підвищення завадостійкості і надійності координатних визначень, оперативності відновлення робочого стану в разі втрати сигналів від НКА, а також оперативності корегування одержуваних даних, схильних до впливу тих або інших джерел систематичних помилок. Прикладом такої реалізації може служити створена в 1999 році в Росії інтегрована апаратура НК-100, орієнтована на спільну роботу з системою GPS і наземними радіонавігаційними системами «Logan-C/Чайка».

До того ж у наше побутове життя ввійшли технології і сервіси, які дозволяють визначати точні координати транспортного засобу (GPS-навігатор), координати об'єкта, який нас цікавить, наприклад, дитини, літньої особи або тварини (GPS-трекер), координати зробленого знімка (фотоапарат об'єднаний з GPS-приймачем). Ці сервіси невід'ємно пов'язані з геоінформаційними технологіями, які представляють не тільки координатні позиції об'єктів, а і застосування картографічного відображення точки знаходження (маршруту) об'єкта, зручного для сприйняття пересічного користувача.

### ***Питання для самоконтролю:***

- 1. Згадайте вади і переваги геодезичного СРНС вимірювання.*
- 2. Наведіть особливості топографічних зйомок засобами СРНС.*
- 3. Поясніть технологію аерофотозйомок із застосуванням СРНС.*
- 4. Наведіть приклади застосування СРНС у задачах моніторингу.*
- 5. Яким чином використовується НАС у контролі за станом іоносфери?*
- 6. Чим пояснюється необхідність застосування псевдосупутників?*
- 7. Що дає інтеграція НАС з традиційними геодезичними приладами?*



## **Розділ 13. ПЛАНУВАННЯ Й ОРГАНІЗАЦІЯ СУПУТНИКОВИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ**

*Наявність навіть найдосконалішого супутникового геодезичного приймача не забезпечує від одержання хибних результатів під час проведення геодезичної зйомки. Для їх уникнення необхідно врахування всіх можливих небажаних факторів та розроблення заходів для їх мінімізації, що і виконується під час планування виконання геодезичної зйомки. Також її правильна організація дозволяє уникнути надлишкових фінансових і часових витрат.*

### **13.1. Особливості супутникових геодезичних вимірювань**

До традиційних геодезичних вимірювань земної поверхні висувається певні вимоги, серед яких основними можна вважати:

- точність і надійність координатних визначень;
- продуктивність (невелика тривалість) геодезичної зйомки;
- економічність (доступна вартість) та ефективність геодезичної зйомки.

Складність досягнення високої точності вимірювань при застосуванні звичайних геодезичних приладів, дія яких ґрунтується на оптичних вимірюваннях, пояснюється, перш за все, інструментальними і методичними похибками вимірювань, а також непростійністю характеристик приземних шарів атмосфери, що є середовищем поширення оптичних променів, які використовуються при вимірюваннях. До того ж зауважимо, що тривалість геодезичної зйомки та її вартість пов'язані з оплатою праці спеціалістів, собівартістю геодезичного обладнання, одержанням додаткових даних для виконання зйомки.

Вибір тієї чи іншої методики геодезичних робіт і застосування відповідних геодезичних приладів передбачає оцінювання завдання на проведення геодезичної зйомки. Визначальними при цьому є, переважно, такі чинники:

- потенційна можливість забезпечення вимог точності і надійності обраною технологією геодезичної зйомки;
- можливість проведення геодезичних вишукувань у фактичних умовах (пора року, доби, метеоумови, доступність місця зйомки для геодезичних вишукувань);

- наявність геодезичного обладнання (або його вартість), яке задовольнятиме вимоги точності і надійності даних;
- тривалість (продуктивність) проведення зйомки, а відповідно, і вартість одержаних даних;
- вид і формат одержуваних даних, можливість їх швидкого введення й оброблення в автоматизованих інформаційних системах різного призначення, редукування одержаних координат у прийнятій у країні координатній системі.

Геодезична зйомка з використанням супутникових геодезичних приймачів має певні відмінності від вимірювань традиційними геодезичними засобами, які визначаються незалежністю проведення зйомки від погодних умов, часу доби, наявності прямої видимості між пунктами зйомки, вимогою радіовидимості з НКА, можливим впливом об'єктів навколишнього середовища тощо. Відповідно до цього має певні відмінності процес організації проекту спостережень, алгоритми обробки одержаних даних. Першою стадією проекту спостережень є **планування робіт** (зйомки). **Метою планування** є врахування впливу всіх можливих чинників та умов на супутникову геодезичну зйомку, а також заходи, які необхідно вжити для одержання бажаного результату.

Зазвичай, при супутникових геодезичних зйомках планування не є обов'язковою процедурою, але з плануванням тісно пов'язана ефективність і якість одержуваних у процесі вимірювань даних. Вирішальними факторами проведення процедури планування супутникових геодезичних зйомок є поставлена мета зйомок і вимоги до точності і достовірності одержуваних координат пунктів спостереження. Обов'язковою процедура планування є у випадках створення геодезичних мереж, організація моніторингу і виконання високоточних вимірювань в інтересах розв'язування стратегічних задач або наукових досліджень. Для розв'язування поточних задач кадастру, картографування, будівельних та будь-яких інших інженерних проектів виконання планування не є обов'язковим (крім випадків екранування частини небосхилу або наявності перешкод), але при цьому слід пам'ятати, що ефективність проведення супутникових геодезичних зйомок багато в чому визначається обраним режимом спостережень, вибором пункту й організацією спостережень.

## **13.2. Планування супутникових геодезичних вимірювань**

Планування супутникової геодезичної зйомки полягає у розгляді таких позицій:

- оцінювання завдання на проведення зйомки (точність та надійність даних);
- аналіз геодезичного обладнання для вимірювань;
- розроблення стратегії побудови геодезичних мереж;
- аналіз мережі НКА;
- обґрунтування режиму проведення зйомки;
- оцінювання і рекогностування пунктів проведення зйомки;
- планування графіка робіт;
- параметри збору даних;
- процедури збору даних;
- обробка вимірювань;
- економічні фактори.

Для полегшення процедури планування можуть використовуватись автоматизовані модулі, які з використанням даних альманаху дозволяють прогнозувати геометрію сузір'я НКА, що будуть знаходитись у зоні радіовидимості на момент зйомки, визначати сесії спостереження для заданих пунктів, аналізувати під час зйомки наявні перешкоди та кути маски піднесення тощо.

Результатом планування є створення макета організаційного плану, в якому визначаються склад польових бригад, обладнання для проведення зйомки, встановлюються пункти вимірювання і сесії спостереження цих пунктів.

### ***13.2.1. Оцінювання наявного польового обладнання***

Оцінювання наявного польового обладнання проводиться для з'ясування можливостей під час проведення супутникової геодезичної зйомки, обґрунтування потреб у додатковому обладнанні та визначення методів і режимів ведення супутникової геодезичної зйомки, які можуть мінімізувати часові й економічні витрати на її проведення при заданій точності і достовірності одержаних координатних даних.

Польове обладнання у процесі проведення супутникової геодезичної зйомки призначено для розв'язання взаємопов'язаних задач, серед яких основними вважаються такі:

- впевнений прийом навігаційних радіосигналів від НКА;
- визначення радіонавігаційних параметрів;
- попередня обробка й обчислення навігаційних параметрів на пункті спостереження;
- постобробка навігаційних параметрів у камеральних умовах і одержання остаточних даних.

Польове обладнання під час проведення супутникових геодезичних вимірювань включає в себе супутникові геодезичні приймачі й додаткове обладнання, а саме апаратне і програмне забезпечення польових засобів обробки даних геодезичних вимірювань, метеосенсори, трегери, штативи, фідери тощо. Визначальним при цьому є тип наявного геодезичного приймача та бажаний рівень точності та надійності геодезичних вимірів. Виходячи з цього обирається та чи інша методика вимірювань.

Спектр супутникових геодезичних приймачів дуже широкий з різними характеристиками, але для досягнення необхідної точності і достовірності позиційних даних основними характеристиками приймачів вважаються такі:

- кількість частотних діапазонів, що здатний приймати геодезичний приймач від окремого НКА;
- кількість радіоканалів, в яких приймач здатний приймати сигнал від декількох супутників;
- можливість сумісного використання різних СРНС;
- ширина смуги пропускання радіосигналу та можливість її адаптації (зміни ширини) до умов прийому сигналу;
- стабільність фазового центра антен приймача під час прийому радіосигналів різних діапазонів;
- місткість запам'ятовуючого пристрою та швидкість оброблення первинних даних;
- інтеграція з іншими геодезичними приладами (зокрема, з електронним тахеометром);
- можливість сумісної роботи між супутниковими геодезичними приймачами різних типів;
- масогабаритні та енергоживильні характеристики приймача;
- наявність у комплекті додаткового устаткування для виконання зйомок у складних умовах (наприклад, виносних щогл).

**Кількість частот, які здатний приймати геодезичний приймач від окремого супутника.** Кількість частот (або кількість діапазонів: L1 – одночастотний приймач, або L1 та L2 – двочастотний приймач) визначає здатність приймача самостійно усувати похибку, обумовлену іоносферною рефракцією сигналу. При прийманні сигналів у двох діапазонах L1 та L2 комбінація фаз залишається вільною від впливу іоносфери, що дає можливість компенсувати, а то і повністю усунути іоносферну похибку. У зв'язку з цим є певні обмеження щодо застосування одночастотних приймачів для геодезичних вимірювань, оптимальним при цьому, за деякими оцінками, вважається відстань одночастотного ровера до референцної станції на відстані, що не перевищує 10 км; при перевищенні цієї відстані величина похибки починає стрімко зростати. Граничною відстанню вважається довжина базової лінії 30 км.

**Кількість радіоканалів, в яких приймач здатний приймати сигнал від декількох супутників,** теоретично не повинна бути менше 4, що забезпечує перетинання поверхонь положення від НКА. При фактичній кількості 5–12 НКА, що знаходяться у зоні радіовидимості у будь-який момент часу, приймач повинен мати змогу одночасного прийому радіонавігаційного сигналу від усіх НКА, що забезпечить вибір сузір'я супутників з найкращою геометрією їх положення у просторі і, відповідно, зменшить похибку PDOP.

Збільшення кількості каналів прийому приводить до збільшення обсягу одержаних даних, що накладає вимогу **на місткість запам'ятовуючого пристрою**, в якому зберігається статистика вимірювань, і **швидкість оброблення одержаних даних**. Цього ж вимагає проведення тривалих польових робіт і вимірювання в кінематичних режимах, особливо в режимі ініціалізації ровера «на льоту» (On The Fly). У статичних режимах швидкість оброблення даних забезпечує швидке виявлення стрибків фази і відновлення рахунку кількості цілих фаз радіосигналу.

**Можливість сумісного використання декількох СРНС.** Останнім часом з'явилась технологія побудови навігаційних приймачів, що забезпечують одночасний прийом сигналів від різних СРНС, а саме GPS і ГЛОНАСС. Очевидно, що ця технологія суттєво збільшує кількість одночасно видимих НКА різних сис-

тем, що забезпечує мінімізацію похибки, викликаної поганою геометрією сузір'я НКА. Авторам відомі спроби поєднання в окремому навігаційному приймачі радіотрактів і відповідного навігаційного забезпечення, здатних приймати навігаційні радіосигнали від чотирьох навігаційних систем: GPS (США), ГЛОНАСС (Росія), GALILEO (Євросоюз), COMPASS (КНР).

**Ширина смуги пропускання радіосигналу та можливість її адаптації до умов прийому сигналу** важлива при виконання зйомок у кінематичному режимі, що пов'язано з доплерівським зсувом частоти радіосигналу. При цьому ширина смуги пропускання радіотракту приймача повинна бути достатньою для запобігання втрати радіосигналу. З іншого боку, ширина смуги пропускання приймача впливає на відношення сигнал/(шум+завада), тобто чим ширше смуга пропускання, тим більше сигналів, які заважають, потрапляє на вхід корелятора сигналу і зменшує його енергетику. Оптимальним при цьому є можливість приймача до автоматичного регулювання ширини смуги пропускання радіосигналу відповідно до умов прийому.

**Стабільність фазового центра антени приймача** визначає стабільність точки простору, для якої визначаються координати. Проблемним при цьому є зсув фазового центра під час прийому сигналів від НКА двох діапазонів – L1 і L2, де існує явище залежності положення фазового центра від частоти сигналу, що приймається. Вирішення цієї проблеми лежить у площині застосування мікрополоскових антен та виконання калібрування положення фазового центра антенних пристроїв, що виконується під час зйомки перед початком вимірювань.

**Несумісність геодезичних приймачів різних типів** може виявитися при їх різних технічних характеристиках як прийому сигналу (кількість частот, кількість каналів прийому), так і сумісної обробки одержаних даних спостережень (різні формати даних, різні шкали нанесення міток часу спостереження у приймачі, різні методи обробки, різні координатні системи тощо).

**Додаткове устаткування** виявляється дуже важливим під час проведення супутникових геодезичних зйомок в умовах затінення, де може з'явитися потреба у використанні виносних антен, їх піднятті на щогли над об'єктами-перешкодами. Зазвичай у комплект додаткового устаткування можуть входити щогли та

коаксіальні антенні кабелі довжиною до 60 м. Небезпека при цьому полягає у додатковому послабленні корисного сигналу в коаксіальному кабелі великої довжини. Важливим також є питання надійного і стабільного положення антени на щоглі, на яку впливатимуть небажані зовнішні фактори, наприклад, вітер.

### ***13.2.2. Розроблення стратегії побудови геодезичних мереж***

Визначальним при побудові або реконструкції геодезичних мереж, створюваних методами GNSS, є вибір загальної стратегії супутникових геодезичних спостережень, яка складається з таких складових:

- загальні принципи побудови мережі;
- методи побудови мережі;
- режим супутникових спостережень і наступних обчислень.

При формуванні загальних принципів побудови геодезичних мереж визначальним є застосування диференційних методів, які дозволяють одержати різниці між координатами визначених пунктів. Для одержання повних значень координат необхідно мати хоча б один опорний (референційний) пункт з повним значенням трьох координат. Оптимальним варіантом є наявність трьох опорних пунктів, з'єднаних у мережу. Важливим також є той факт, що в GNSS координати опорного пункту подають у рухомій геоцентричній системі координат OXYZ, і похибка координат опорного пункту буде редукуватися на точність геометричних побудов у створюваній мережі.

У більшості публікацій рекомендовані такі методи побудови геодезичних мереж з використанням супутникових технологій:

- променевий метод;
- мережний метод.

Променевий метод визначає радіальний тип геодезичної мережі, коли координати всіх пунктів мережі визначаються за вимірами векторів баз з одного референцного (опорного) пункту. До недоліків променевого методу відносяться невисока надійність критеріїв оцінювання точності визначених координат. На практиці для мереж радіального типу застосовують оцінки, які ґрунтуються на аналізі замкненості утворених геометричних побудов. Такі оцінки можуть містити похибку у відображенні точності визначених координат пунктів, оскільки при цьому методі нев'язки

для координат вершин замкнених фігур повинні дорівнювати нулю, що не завжди досягається внаслідок несприятливих умов спостереження за НКА або недосконалістю методів оброблення одержаних результатів. Дійсним контролем при променевому методі є незалежний контроль вимірювань, виконуваний іншими засобами вимірювань на визначуваних пунктах від інших вихідних пунктів, або між визначеними пунктами, пов'язаними прямими спостереженнями з використанням аналітичних зв'язків.

Мережний метод визначається типом замкненої геометричної фігури, в якій вимірювання проводиться на кожній базі або на кожному пункті мережі. При цьому використовуються декілька опорних пунктів, які на практиці часто є незалежними. Для організації вимірювань складається схема спостережень, мета якої зв'язання найбільшої кількості суміжних пунктів. Схема спостережень передбачає послідовне вимірювання всіх суміжних пунктів з наступним зсувом по мережі. Важливим при цьому є зв'язання геометричних побудов за допомогою повторного послідовного вимірювання того самого пункту під час різних сесій спостереження, при цьому цей пункт був би «зв'язуючим» пунктом геометричних побудов різних сесій спостереження. Раціональним при цьому є використання різних приймачів на «зв'язуючому» пункті під час різних сесій, що дозволить мінімізувати інструментальні систематичні похибки одного приймача. Поширене застосування одержав трьохштативний метод, який полягає в ослабленні похибок центрування завдяки установленню одночасно на декількох суміжних пунктах мережі штативів з підставками для розміщення в них приладів, і який забезпечує необхідну перевірку для замкнутої фігури та дає максимум продуктивності.

Вважається, що основною проблемою практичної побудови геодезичної мережі цим методом є підвищені вимоги точності до базисних ліній опорної мережі, до якої входять незалежні опорні пункти. Вирішенням цієї проблеми є побудова за посиленою програмою спостережень каркасної мережі (мережі першого рангу), яка складається з кількох взаємопов'язаних пунктів, визначуваних відносно одного опорного пункту (рис. 13.1). У подальшому каркасна мережа слугує опорною мережею для визначення інших пунктів і формування мережі другого рангу.



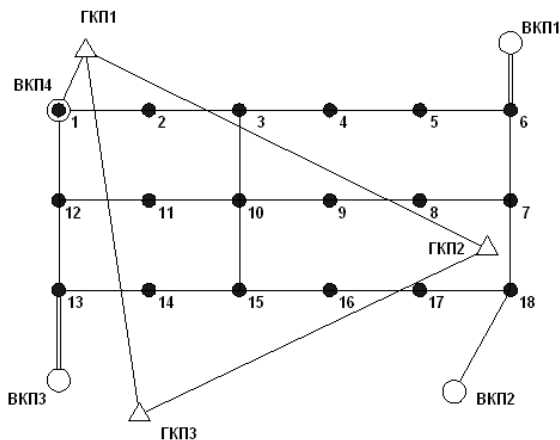


Рис. 13.1. Мережний метод

Вибираючи метод побудови мережі, слід враховувати можливості програмного забезпечення обробки одержаних даних, а саме підтримку режимів обчислення для однобазового або багатобазового розв'язку для векторів баз. Максимальна точність геодезичних мереж досягається при використанні мережного методу в поєднанні зі статичними режимами вимірювань.

### 13.2.3. Обґрунтування режимів супутникових геодезичних вимірювань

Залежно від типу супутникового приймача, його можливостей та вимог до кінцевого результату вимірювань обирають той чи інший режим фазових вимірювань (які володіють суттєвою перевагою у точності позиціонування перед кодовими вимірюваннями). Наслідком використання фазових вимірювань є зростання вимог до процедур збирання та оброблення «сирих» даних. Одержання точних даних також пов'язане зі збільшенням часу спостережень на окремій точці виміру.

Зазвичай для геодезичних приймачів доступні такі режими робіт:

- режим чистої статички (статичний режим, Static);
- режим прискореної статички (Rapid Static);
- псевдостатичний (режим вимірювань з поверненням, напівкінематичний, Reoccupation);

- напівкінематичний режим вимірювань («Stop & go»);
- режим статичної ініціалізації (кінематичний режим вимірювань, Kinematic);
- безупинний режим ініціалізації (On The Fly, Kinematic 2);
- навігаційний режим.

Сутність наведених режимів вимірювань викладалася у 8 розділі, тому розглянемо лише основні характеристики одержуваних даних при виконанні вимірювань.

Абсолютні вимірювання можуть використовуватися при невисоких вимогах до одержуваної точності. Зазвичай абсолютні статичні режими дозволяють одержати точність на рівні 5–10 метрів, абсолютні кінематичні режими на рівні – 10–100 метрів.

Для геодезичних вимірювань використовують переважно диференційні *статичні режими* супутникових спостережень. *Режим чистої* та *прискореної статики* на довгих базових лініях при спостереженнях чотирьох і більше супутників вимагає близько однієї години спостережень. На коротких базових лініях при спостереженні сузір'я з п'яти і більше НКА, за умови вдалої геометрії розташування НКА, точність одержуваних результатів може сягати сантиметрового рівня точності при значному зменшенні тривалості спостереження, яка зазвичай становить декілька хвилин. Вирішальними факторами тривалості сесії вимірювань є продуктивність обчислювального пристрою та застосовані алгоритми обробки супутникових спостережень. Обов'язковим для статичних вимірювань є хороша геометрія НКА та відсутність їх затінення.

У випадку недостатньої кількості НКА в зоні радіовидимості або поганої геометрії спостережуваного сузір'я при досягненні тієї ж точності бажано використання *псевдостатичного режиму* вимірювань. При цьому передбачаються нетривалі (5–10 хвилин) періодичні спостереження на визначених закріплених точках з інтервалом, за який сузір'я НКА змінює власну геометрію. При плануванні вимірювань слід враховувати, що тривалість знаходження НКА в ідеальних умовах не перевищує чотирьох годин. Різновидом псевдостатичного режиму є повернення на пункти позиціонування при невдалих статичних вимірюваннях, якщо масив одержаних даних містить помилки, пов'язані з нерозв'язанням не-

однозначності під час першого сеансу спостережень, при цьому, зазвичай, виконуються об'єднання масивів даних першої та наступних сесій спостереження.

**Кінематичні режими** вимірювання дозволяють визначати траєкторію руху геодезичного приймача щодо референцної станції. Траєкторія позначається координатними точками, які визначаються через заздалегідь встановлені інтервали часу. Застосування кінематичних режимів роботи для геодезичних вимірів не рекомендується, але бажані при топографічній зйомці.

У загальний термін проведення польових робіт режимами «Stop & go» і кінематичним входить період ініціалізації, під час якої приймач знаходиться в нерухомому положенні, що необхідно для розв'язання неоднозначності фазових вимірів. Зазвичай, за 5-10 хвилин ініціалізації за кодом і фазою на двочастотних спостереженнях можна одержати точність сантиметрового рівня. Після ініціалізації приймач переміщується між точками, причому маршрут переміщення фіксується координатними точками, позиціонованими через встановлені інтервали часу. Обов'язковою умовою цих кінематичних режимів є постійна радіовидимість всіх НКА, що використовуються приймачем під час виконання вимірювань. У випадку припинення спостережень відбувається втрата кількості цілих фаз і, відповідно, зрив ініціалізованого стану приймача, що вимагатиме його повторної ініціалізації. Для подолання цієї незручності використовують **безупинний режим**, який не вимагає статичного режиму ініціалізації ровера. Аналогічно статичним режимам, точність одержуваних даних у кінематичному режимі залежить від довжини базових ліній (віддаленості від референцних приймачів) і знаходиться в тих самих межах, що і статичні режими. Основною незручністю використання кінематичних режимів для геодезичних вимірювань є складність практичного встановлення просторової відповідності траєкторії руху ровера з реальними вимірюваними об'єктами, які в геодезії позиціонуються точками, що з'єднуються лінійними відрізками. Отже, при позиціонуванні лінійного об'єкта в кінематичних режимах спостерігатиметься надмірність точкових вимірів на прямій лінії, які не несуть корисного інформаційного навантаження і до того ж можуть володіти просторовою похибкою суміщення траєкторії руху ровера і безпосередньо самого лінійного об'єкта.

### **13.2.4. Оцінювання і рекогнозування пунктів проведення зйомки**

Оцінювання і рекогнозування пунктів виконується як підготовчий до проведення зйомки захід з метою одержання бажаного результату.

**Оцінювання пунктів проведення зйомки** проводиться з метою встановлення придатності пункту для проведення супутникових геодезичних вимірювань. Необхідність оцінювання пов'язана з вимогами радіовидимості НКА, мінімізацією перешкод на шляху поширення радіосигналу й уникнення явища багатопроменевості. Вважається, що відкритий для спостереження простір починається з кута маски піднесення над горизонтом 15–20 градусів.

Особливу увагу слід приділяти вибору опорного пункту для прив'язування створюваної мережі. Для цього бажано використовувати пункти національної геодезичної мережі. Застосування опорних пунктів сумнівної точності може призвести до зсуву пунктів всієї визначеної мережі. Для повного прив'язування мережі, що визначається, до національної вимагається виконання відносних вимірювань як мінімум на трьох контрольних пунктах.

Під час проведення геодезичних зйомок високої точності чіткі вимоги висуваються до конструкції центрів геодезичних пунктів (і відповідно до центрів антенного блока), які повинні володіти стійкістю за трьома координатними напрямками. Зазвичай такі пункти іменують **монументами**, які встановлюють на жорстких поверхнях (скеля, бетонна опора (стовп), сталеві конструкції), які мають мати відповідне зовнішнє оформлення (марку). У порівнянні з традиційними геодезичними вимірюваннями, при супутниковій зйомці немає необхідності дотримання жорстких умов прямої видимості між визначеними пунктами.

Поряд з зазначеними технічними вимогами до пунктів проведення зйомки висуваються такі організаційні вимоги, що слугують покращенню продуктивності робіт:

- легкість і швидкість доступу до пункту спостережень;
- зручність розташування апаратури на пункті;
- забезпечення безперервності електроживлення та ведення польового журналу.

**Рекогнозування пунктів** виконується з метою якісної організації робіт і підвищення їх продуктивності. На початку рекогнозування складається карта району робіт (масштабу 1:25 000 до 1:100 000), на яку наносять всі опорні пункти і плановані пункти супутникової геодезичної зйомки. Кожному пункту привласнюється унікальний ідентифікатор, який краще обирати коротким і лаконічним, наприклад, умовний порядковий номер пункту в мережі. Саме рекогнозування передбачає виїзд на кожний вимірюваний пункт та перевірку можливості ведення надійних супутникових спостережень.

Найбільш критичними до наявності перешкод на трасі поширення навігаційного сигналу є кінематичні методи зі статичною ініціалізацією, де втрата спостережень неприпустима. Проблема перешкод на пункті спостереження вирішується за допомогою підбору часового «вікна» спостереження, за якого число і геометрія супутникового сузір'я дозволяють виконувати вимірювання із заданою точністю. У випадку вимірювання вектора бази, часові умови повинні задовольняти прийнятну якість спостереження на обох кінцях бази, при цьому сузір'я спостережуваних НКА повинно бути однаковим для обох навігаційних приймачів, оскільки НКА, за якими спостерігає лише один приймач, виключаються з обчислень. Сучасне програмне забезпечення дозволяє автоматизовано виконувати процедуру вибору оптимального вікна спостереження (рис. 13.2) [53].

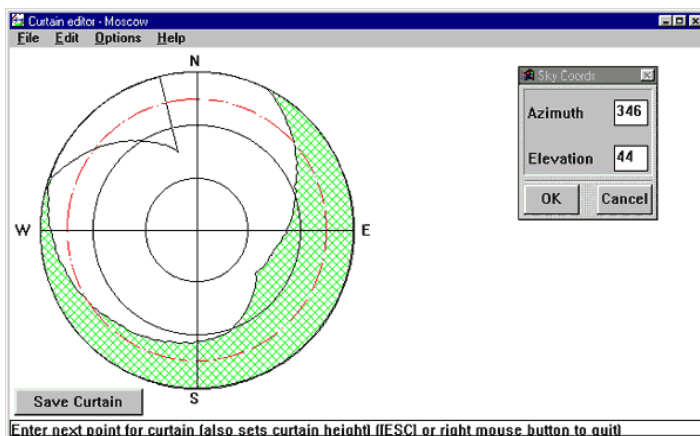


Рис. 13.2. Редактор перешкод

Іншим методом усунення перешкод є підняття антен приймачів на щоглові пристосування, за якого перешкоди не стануть створювати затінення радіонавігаційному сигналу спостережуваного сузір'я НКА. При цьому необхідно створювати умови нерухоливості антени приймача, що зазвичай забезпечуються встановленням розтяжок.

Подолання явища багатопутності зазвичай здійснюється через виключення близького розташування антен приймача та об'єктів, які мають великий коефіцієнт відбиття радіосигналу, наприклад, залізні або залізобетонні конструкції. Іноді ця проблема вирішується за рахунок підняття антени на певну висоту, за якої відбиті промені сигналу не потрапляють до фазового центра антени.

### ***13.2.5. Планування графіка спостережень***

Метою планування графіка спостережень є синхронізація дії геодезичних бригад та забезпечення оптимальної якості одержуваних даних у дійсних умовах спостережень на кожному окремому пункті.

Графік спостережень визначає такі характеристики супутникових вимірювань:

- вибір оптимального вікна спостережень;
- розрахунок довжини і кількості сесій спостережень;
- розроблення організаційного плану.

***Вибір оптимального вікна спостережень*** дозволяє користувачам проводити спостереження при оптимальній геометрії сузір'я НКА та мінімізації впливу іоносфери на поширення навігаційного радіосигналу. Оптимальним вікном для спостереження вважається часовий інтервал, коли кількість видимих НКА максимальна, а їх розташування у небесній сфері забезпечує мінімальну похибку PDOP. З погляду мінімізації іоносферної рефракції оптимальними є спостереження у нічний час.

Сучасне програмне забезпечення, яке входить у комплект супутникових геодезичних приймачів, дозволяє розв'язувати задачу визначення оптимального вікна на основі даних діючого альманаху, в якому міститься ефемеридна інформація для всього угруповання НКА. На заданий час для району спостереження здійснюється прогнозування траєкторій супутників як функції висоти над горизонтом і азимуту. Альманах вважається актуальним про-

тягом трьох місяців, але перед зйомками його бажано оновити, оскільки супутники можуть переводитися в режим технічного обслуговування, або на орбіту може бути виведений новий супутник. Також інформацію про діючі НКА можна одержати на офіційних сайтах СРНС та інших сайтах геодезичних служб.

Для точного визначення видимості супутника необхідно безпомилково ввести дату, місцевий час (або різницю з Гринвіцьким часом) та місце розташування. Помилка у введенні дати дає похибку у 4 хв/добу, яка виникає через різницю у тривалості сонячних та зіркових діб.

До розрахунків «вікна» для кожного пункту спостереження додаються результати аналізу перешкод, які можуть обмежувати зону радіовидимості і, відповідно, часовий інтервал «вікна». Геометрія розташування НКА відображується на планісфері (див. рис. 9.9, 9.10). Для кінематичних режимів умова розподілення НКА по небесній сфері є обов'язковою, причому бажаним є розташування НКА по всіх квадрантах планісфери. Для статичних спостережень погана геометрія може бути компенсована збільшенням тривалості сесії вимірювань або проведенням повторних вимірювань з іншою геометрією сузір'я НКА. Тривалі сесії спостережень дозволяють спостерігати рух НКА відносно один одного, тобто різні геометрії, що позитивно відбиваються на одержуваних розв'язках. Для перевірки часових інтервалів оптимального вікна можна використовувати відомі вектори баз.

***Розрахунок довжини і кількості сесії спостереження.*** Сесією називається певний проміжок часу спостереження за сузір'ям видимих НКА з кількістю не менше чотирьох. При організації відносних супутникових спостережень на декількох пунктах обов'язковою умовою є одночасність спостережень приймачів на всіх пунктах. На довжину сесії впливають такі основні фактори [54]:

- вимоги до точності одержуваних координат;
- геометрія спостережуваного сузір'я НКА та їх кількість;
- ступінь збурення іоносфери (для одночастотних приймачів);
- довжина бази;
- наявність перешкод та ступінь їх впливу.

Велика кількість НКА та вдала геометрія спостережуваного сузір'я супутників у небесній сфері, а також стабільна іоносфера

(під час виконання робіт у нічній час, відсутності сонячних сплесків тощо) скорочує тривалість сесії спостереження. Збільшення довжини бази вимагатиме збільшення тривалості спостереження. Так, при базах 1–2 км з використанням одночастотних приймачів тривалість сесії зазвичай не перевищує 45 хвилин за наявності п'яти супутників, збільшення довжини бази може потребувати 90 хвилин для отримання хороших результатів [54]. У табл. 13.1 наведена залежність тривалості сесії спостереження від довжини бази за наявності видимого сузір'я з чотирьох НКА і стабільної іоносфери.

Таблиця 13.1

*Залежність тривалості сесії спостереження від довжини бази*

| Довжина бази, км | Сесія, хв |
|------------------|-----------|
| 0,1–1,0          | 10–30     |
| 1,1–5,0          | 30–60     |
| 5,1–10,0         | 60–90     |
| 10,1–30,0        | 90–120    |

Фазові супутникові вимірювання дозволяють визначати координати з міліметровою точністю, але сама процедура фазових вимірювань пов'язана з необхідністю виключення неоднозначності цілої кількості фаз на трасі НКА – приймач, обчислення якої потребує певного часу. Для статичних режимів при коротких базах (менш 1 км) і одночастотних спостереженнях цілу кількість фаз можна визначити на 5–10-хвилинних сесіях. При довгих базах (15 км) і двочастотних спостереженнях з використанням Р-коду для усунення фазової неоднозначності сесія спостереження становить до 10 хвилин.

Вважається [54], що найкращим методом визначення оптимальних сесій спостережень для великих проектів є виконання більш довгих, ніж прийнято, спостережень у перший день (тривалість сесій для коротких баз 90 хвилин, для довгих баз – 120 хвилин) з метою отримання рядів типових даних високої точності. В подальшому з одержаних рядів поступово зменшують час спостережень з метою визначення ряду даних, за якого не одержується задана точність даних. Мінімальний ряд з якісними даними буде граничним значенням тривалості сесії. Зменшення тривалості сесій використовується для зменшення загального часу проекту і, відповідно, його здешевлення.



Для кінематичних зйомок тривалість сесій визначається часом ініціалізації базової станції і ровера, а також часом пересування ровера, але обов'язковою умовою при цьому є постійна під час сесії видимість НКА в кількості не менше п'яти.

На точність даних при застосуванні диференційної корекції ровера також впливає інтервал запису даних у пам'ять приймача [55]. Для базових станцій можна використовувати короткі інтервали (рекомендований інтервал запису на базовій станції становить 5 секунд), для роверів бажано виконувати більш тривалі інтервали запису протягом подовжених сесій спостереження.

**Розрахунок кількості сесій спостережень.** Мінімальна кількість сесій спостереження  $n$  мережі з  $s$  пунктів з використанням  $r$  приймачів та  $o$  пунктів, які використовуються в декількох сесіях, визначається виразом [54]:

$$n = \frac{s - o}{r - o}. \quad (13.1)$$

Якщо одержане  $n$  не є цілим числом, то воно округлюється за правилом. Інакше, мінімальна кількість сесій обчислюється з розрахунку відвідання кожного пункту  $m$  разів:

$$n = \frac{ms}{r}. \quad (13.2)$$

При цьому одержане  $n$  округлюється до найбільшого цілого.

Кількість надлишково відвідуваних пунктів  $i$  за умови одного пункту перекриття становить:

$$i = nr - (s + (n - 1)). \quad (13.3)$$

**Розроблення організаційного плану.** Організаційний план визначає порядок проведення вимірювань пунктів геодезичної мережі всіма геодезичними бригадами. Організаційний план складається на кожний день вимірювань, де дата вимірювань вказується порядковим номером доби поточного календарного року. Номер сесії спостережень зручно позначати літерами «а», «б», «с» тощо. Організаційний план являє собою таблицю, в якій вказуються номери пунктів вимірювань для кожної бригади, на яких здійснюються спостереження у конкретній сесії. Складаючи організаційний план, слід враховувати те, що одночасні спосте-

реження бажано передбачати на сусідніх пунктах, оскільки розв'язування неоднозначностей на коротких базах проводиться більш впевнено. Приклад організаційного плану наведений у табл. 13.2.

Таблиця 13.2

*Організаційний план зйомок*

| Приймач (бригада) | Сесія |    |    |    |    |    |
|-------------------|-------|----|----|----|----|----|
|                   | a     | b  | c  | d  | e  | f  |
| A                 | П1    | П4 | П5 | П8 | П6 | П7 |
| B                 | П2    | П5 | П6 | П3 | П1 | П9 |
| C                 | П3    | П2 | П7 | П9 | П4 | П8 |

У табл. 13.2 представлені рішення для геодезичної мережі з 9 пунктів, причому, якщо при вимірюваннях використовується один пункт прив'язування, то мінімальна кількість сесій становитиме 4 (a–d) (згідно з (13.1)), якщо необхідно відвідати всі пункти двічі, то мінімальна кількість сесій становитиме 6 (відповідно до (13.2)).

**13.2.6. Параметри збору даних**

Виконання спостережень супроводжується реєстрацією вимірюваних величин (радіонавігаційних параметрів) та їх автоматичним перетворенням у навігаційні для подальшої обробки на геодезичному обчислювальному комплексі. Одержувані дані являють собою статистичну інформацію («сирі» дані), яка накопичується на запам'ятовуючих пристроях супутникових геодезичних приймачів. Використання фазових вимірювань передбачає більш тривалу та складну обробку «сирих» даних, які являють собою статистику неперервних супутникових спостережень протягом 10 хвилин. Тому до параметрів запам'ятовуючих пристроїв, параметрів запису та безпосередньо типів файлів висувуються певні вимоги, які забезпечують відповідну якість первинних даних [55].

Зазвичай, виконання диференційних спостережень передбачає сумісну обробку декількох файлів:

- файл ровера;
- файл референцної станції;
- файл альманаху;
- файл мікрокомп'ютера.

**Файл ровера** містить результати спостережень у вигляді координат пунктів, їх номери, атрибутивну інформацію і примітки оператора. Іноді файл ровера використовується спільно з **файлом мікрокомп'ютера**. Файл ровера також може містити супутникові орбітальні дані, характеристику геометрії спостережуваного сузір'я НКА та налаштування приймача. Точність координатних даних до диференційної корекції становить близько 5 метрів.

**Файл референційної станції** використовується для диференційної корекції даних ровера і накопичується у запам'ятовуючому пристрої приймача для постобробки, або передається по каналах зв'язку для корекції даних ровера в режимі on-line. Файл містить поправки від кожного відстежуваного НКА і може бути використаний будь-яким ровером за таких умов:

- одночасні спостереження референчним приймачем і ровером;
- відстань між референчним приймачем і ровером не повинна перевищувати допустимих значень для заданої точності (10–20 км);
- наявність поправок від всіх НКА, що використовуються ровером для визначення координат пункту спостереження.

**Файл альманаху** або **ефемеридний файл** містить орбітальну інформацію для всіх НКА, по якій приймач обчислює розташування супутників у небесній сфері. Час передачі всього файла різниться для СРНС GPS і ГЛОНАСС. Якщо альманах застарів, то перед початком сеансу спостереження він записується автоматично.

### **13.2.7. Прив'язування до національної системи координат**

Прив'язування до національної системи координат і висот передбачає використання діючої контрольної мережі, при цьому передбачаються прямі вимірювання між її пунктами. Метою таких вимірювань є перевірка точності діючої контрольної мережі, визначення масштабу, зсуву і повороту між контрольною і створюваною геодезичною мережами [54]. У подальшому здійснюються вимірювання між пунктом контрольної мережі і плановим пунктом створюваної мережі, чим забезпечується їх прив'язування. Повне прив'язування створюваної мережі до національної системи координат вимагає виконання спостережень мінімум на трьох контрольних пунктах.

Висотні прив'язування зазвичай виконуються з висотного контрольної пункту, найближчого до пункту створюваної мережі.

Основними положеннями створення мережі є [54]:

- мережа повинна складатися із замкнутих геометричних фігур;
- повинні бути виконані прив'язування щонайменше до трьох планових контрольних пунктів, на яких теж повинні бути виконані супутникові вимірювання;
- повинні бути виконані прив'язування щонайменше до чотирьох висотних контрольних пунктів з використанням безпосередніх (прямих) вимірювань.

### 13.3. Практичні супутникові геодезичні вимірювання

Практична фаза виконання супутникових геодезичних вимірювань передбачає послідовне виконання таких етапів [54]:

- підготовка до виконання спостережень;
- виконання спостережень;
- завершення сесії спостережень;
- прив'язування до контрольного пункту.

#### ***Підготовка до виконання спостережень***

Підготовчі заходи виконуються на пункті спостереження безпосередньо перед виконанням спостережень і складаються з таких робіт:

- встановлення антени;
- вимірювання висоти і зміщення антени;
- калібрування і програмування приймача;
- ініціалізація спостережень.

***Встановлення антени.*** Розташування антени планується відповідно до рекомендацій щодо усунення перешкод та явища багатопутності сигналу. Встановлюється антена на опорах, штативах з трегерами, щоглово-му пристрої, обладнаному стабілізуючими розтяжками (рис. 13.3).

Різновидом щогли є протяжний або призмий стовп фіксованої висоти – біпод (рис. 13.4), обладнаний стабілізуючими стійками.



Рис. 13.3. Телескопічна щогла з розтяжками



Рис. 13.4. Біпод  
з телескопічною вішою

Використання біпода суттєво прискорює кінематичну зйомку та дозволяє уникнути грубих висотних помилок (визначення висоти фазового центра антени над маркою) при статичній зйомці.

Важливим моментом є центрування антени над маркою пункту спостереження. У цьому разі бажано використання виску на складеному коліметруючому трегері, здатному обертатися. Висок забезпечить центрування антени та перевірку центрувального пристрою.

**Калібрування приймача.** Алгоритми функціонування приймача передбачають його самокалібрування, але іноді проводять тест, який одержав назву “Тест на одній базі”. Сутність тесту полягає у підключення двох приймачів через спеціальний розгалужувач до однієї антени. Після виконання сесії спостереження довжина утворюваної приймачами бази повинна бути нульовою, оскільки вимірювання виконувалися на одну антену.

**Ініціалізація приймача** при статичній зйомці передбачає введення параметрів приймача: інтервал запису даних, ширина смуги пропускання радіотракту, мінімальна кількість спостережуваних НКА, параметри сесії спостереження, граничний кут маски, вказівку імені файла для запису тощо.

Ініціалізація приймача при кінематичній зйомці передбачає визначення цілої кількості фаз на трасі поширення радіосигналу НКА – приймач. Способи ініціалізації приймача були розглянути раніше.

**Виконання спостережень.** Практична фаза виконання спостережень вимагатиме синхронізації часу спостережень між різними пунктами (бригадами), вимірювання метеопараметрів, здійснення контролю за ходом вимірювань, виконання повторної ініціалізації приймача.

Синхронізація спостережень між різними пунктами передбачає наявність радіозв'язку між бригадами. З умови карти радіопокриття GSM для України синхронізація дій між бригадами не викликає ускладнень. Для віддалених районів (за відсутності

GSM-зв'язку) можна пропонувати застосування транкінгових або інших мобільних радіостанцій. Для синхронізації дій всіх бригад доцільно використання режимів конференц-зв'язку, де в розмові беруть участь декілька бригад одночасно.

Накопичений досвід проектування та створення регіональних і локальних мереж за допомогою СРНС свідчить, що для мереж середніх розмірів бажаним є застосування від 4 до 10 приймачів, що дозволяє оптимально поєднувати швидкість виконання робіт та надійність вимірювань. Вимірювання на одному пункті бажано виконувати двічі через певний інтервал часу, коли змінюється геометрія НКА, що дозволить виявити грубі помилки. При цьому повторні вимірювання рекомендується здійснювати з переустановленням антени приймача. Повторне вимірювання деяких базисних ліній мережі дозволить підвищити надійність одержаних даних. Після завершення сесії бажано перевірити положення та висоту антени над маркою.

Проведення зйомки у кінематичному режимі вимагає проведення початкової ініціалізації ровера. У процесі пересування ровера по маршруту зйомки може відбутися втрата ровером видимих НКА або лічильника кількості цілих фаз (наприклад, у разі затінення НКА), у цьому випадку проводиться повторна ініціалізація (реініціалізація), тобто ровер повертається на вихідний пункт з відомими координатами. На практиці в кінематичних режимах зйомки для підвищення точності і надійності одержаних даних використовують перевірку вимірювань, наприклад, пункти зйомки зазвичай відвідують двічі, при цьому одержана різниця між координатами пунктів різних сесій свідчить про низьку якість даних. Також під час виконання кінематичної зйомки бажано в маршрут включати пункти з відомими координатами (наприклад, одержаними у статичних зйомках), що забезпечує підвищення достовірності даних.

Наприкінці спостережень на пункті рекомендується виконати його опис, який буде містити таку інформацію [54]:

- назва пункту;
- ідентифікатор станції, який використовується в назві файла;
- ім'я спостерігача;
- серійні номери антени і приймача;
- висота антени;
- час початку та кінця спостережень;

- номери спостережуваних НКА;
- навігаційне положення пункту;
- проблеми, що виникли під час спостережень.

Також корисним вважається виконання фотографічного знімку марки або схеми пункту вимірювання.

### **13.4. Обробка даних супутникових спостережень**

Кінцевою фазою супутникових геодезичних вимірювань є оброблення одержаних у результаті спостережень «сирих» даних та формування геодезичної мережі; якість одержаних результатів багато в чому визначається цією фазою. Оброблення являє собою послідовне виконання операцій, а саме: вивантаження даних із супутникового геодезичного приймача, безпосередньо обробка даних, перевірка якості одержаних векторів баз і побудованої мережі та перетворення координат пункту в систему координат мережі, які можуть виконуватися одним або декількома прикладними комп'ютерними додатками.

#### ***13.4.1. Вивантаження даних із супутникового геодезичного приймача***

Вивантаження даних передбачає передачу даних супутникових спостережень, накопичених у пам'яті приймача, у комп'ютер, в якому інстальоване відповідне програмне забезпечення. До масиву накопичених даних зазвичай входить така інформація [53]:

- результати спостережень, що включають статистики кодівих і фазових спостережень, доплерівського зсуву тощо;
- дані про пункт спостереження, тип приймача, режим спостереження тощо;
- навігаційне повідомлення;
- інші дані (метеорологічні, метадані, відомості про спостерігача).

Основним питанням копіювання даних є забезпечення правильного найменування файлів, ідентифікатора приймача і значень характеристик і обставин виконання спостережень (висота антени, час початку і закінчення сесії спостережень). Для запобігання випадкової втрати (спотворення) імпортованих даних бажано виконати їх резервну копію.

### *13.4.2. Обробка даних*

На цьому етапі здійснюється попередня обробка даних та обчислення векторів баз. Обробка статичної і кінематичної зйомки аналогічні. Програмне забезпечення обробки зазвичай не вимагає ручного втручання. Під час попередньої обробки даних виконується перевірка даних фазових спостережень на предмет наявності стрибків фаз, що відбулися під час спостереження, перетворення ефемеридної інформації з визначенням координат НКА під час конкретних епох спостережень (або одержання точних ефемерид з відповідних інтернет-сервісів).

Обчислення векторів баз для статичного режиму зйомки реалізується за двома типами програм обробки [54]:

- обчислення одиничних векторів;
- обчислення багатобазового (мережного) розв'язку.

Вважається доцільним первинне обчислення мережі виконувати для одиничних векторів. У випадку грубої помилки одного з пунктів, для багатобазового рішення, ця помилка розподілиться на всі вектори, і її виявлення буде складним. При обчисленні одиничних векторів помилка набагато помітніша, наприклад, під час аналізу статистики векторів, де вихідним пунктом є пункт з помилкою, стандартна похибка буде більшою, ніж для інших базових рішень. Крім того, застосовується метод перевірки векторів замкненої фігури, в якій сума не повинна бути великим числом, інакше вважається, що в координатах одного з пунктів є суттєва помилка.

Програмна обробка одиничного вектора виконується у такому порядку [53; 54]:

1. Обчислюються найкращі положення пунктів за кодovими псевдодальностями (які мають найменші нев'язки спостережень), під час чого здійснюються обчислення трьох координат кінців базових векторів і поправки ШЧК.

2. Обробка фазових даних за фазовими вимірюваннями та супутниковими орбітальними даними. На цьому етапі також можливе врахування диференційних поправок у режимі DGPS.

3. Обчислення різностей фаз і їх кореляцій.

4. Обчислення оцінки вектора з потрійних різниць фаз.

5. Обчислення оцінки вектора і дійсних значень неоднозначностей фаз з подвійних різниць.



6. Зведення дійсних значень фазових неоднозначностей до цілих значень і прийняття рішення про подальшу обробку з цими значеннями.

7. Обчислення оцінки вектора з обробки подвійних різниць з використанням найкращих оцінок цілих значень неоднозначностей фаз.

8. Обчислення декількох інших оцінок вектора з використанням інших значень неоднозначностей фаз, які мають мінімальне розходження від попередньо обчислених.

9. Обчислення середньоквадратичного відхилення спостережених значень фази одержаних оцінок до середньоквадратичного відхилення найкращого рішення. Відношення одержаних середньоквадратичних похибок має перевищувати числа 2–3, що свідчить про найкраще одержане рішення.

Одержані коефіцієнти коваріаційної матриці потім можуть бути використані у програмах зрівнювання GPS-вимірювань для визначення ваг.

Програмне забезпечення обчислення векторів базових ліній має інструментарій для одержання оптимальних значень, наприклад, для статичних режимів вимірювань можна встановлювати порядок обчислення векторів; автоматично з'єднувати всі станції вимірювань, які працюють під час спостережень; відбракувати надлишкові вектори, які можуть зменшити точність при подальшому зрівнюванні; поєднувати вектори, які мають найкращі показники коефіцієнтів точності визначення вектора; проводити більш детальний контроль за рахунок зміни параметрів маски піднесень, іоносферної і тропосферної корекції, типу інтерполяції (лінійна або квадратична); змінювати кількість супутників, які брали участь у вимірюваннях.

Після завершення обчислень одержуються дані про обчислені вектори: довжина вектора, величина дисперсії та коефіцієнт фільтрації. Якщо характеристики точності одержаних векторів баз незадовільні, то змінюються установки обробки і переобчислюються значення векторів баз.

### ***13.4.3. Контроль якості обчислень векторів базових ліній***

Оцінювання якості одиничних векторів може здійснюватися за багатьма показниками: порівнянням оцінок рішень, одержаних з потрійних та подвійних різниць (для дійсних та цілих значень неоднозначностей), стандартними похибками для різниць декартових та

геоцентричних координат (які є компонентами вектора бази), відношенням обраного фіксованого рішення до наступного найкращого рішення та середньоквадратичним відхиленням спостережуваних значень від обчислених. Найбільш важливим вважається показник відношення обраного фіксованого рішення до наступного найкращого рішення, який при прийнятному рішенні має бути більше трьох.

Для мережного рішення найкращою перевіркою вважається програмне обчислення нев'язки мережі через додавання векторів за заданим периметром. На першому етапі перевірки здійснюється виявлення поганої бази, для чого використовуються різні комбінації векторів з включенням і виключенням досліджуваної бази. Далі, за допомогою програм обчислення нев'язок, замикання здійснюється зрівноваження мережі з мінімальним накладенням умов. При використанні програмами зрівнювання методу найменших квадратів виконуються три основні задачі:

- зсув векторів для утворення з'єднаної мережі;
- додавання мінімальних поправок до кожної компоненти вектора для отримання "гладкої" геометричної фігури;
- обчислення координат пунктів.

Використання програмним забезпеченням кореляційної матриці при зважуванні векторів дає формальні стандартні оцінки, які зазвичай у декілька разів менші, ніж реальні оцінки, тому одержану вагову матрицю множать на скаляр, який визначається або дослідним шляхом, або зазначається у документації додатків. Додатки, які не використовують кореляційні матриці, потребують апіорних оцінок помилок векторів.

Також для перевірки якості мереж використовується метод, що ґрунтується на перегляді двох списків нев'язок, одержуваних із зрівнювання. Перший список містить дійсні величини поправок компонентів векторів, при яких забезпечується замикання мережі. У другому списку містяться нормалізовані нев'язки, які одержуються множенням на скаляр дійсних нев'язок. При великих значеннях нормалізованих нев'язок слід відшукати та виключити погані бази.

#### ***13.4.4. Перетворення координат пунктів у систему координат***

Після видалення поганих баз і одержання якісних оцінок обчислюються координати пунктів мережі. Перше таке обчислення виконується під час вільного зрівнювання, у якому використовуються всі хороші бази.

Планова система координат пунктів мережі обчислюється аналогічно координатам пунктів триангуляції і полігонометрії. Для визначення координат використовуються виміряні вектори для розподілу значень координат між фіксованими контрольними пунктами, що забезпечує прив'язування геодезичних координат мережі до опорної системи координат. Для обчислення геодезичних координат в іншій системі необхідно використання відповідних параметрів еліпсоїда та фіксованих контрольних точок. Для зрівнювання за методом найменших квадратів використовуються відповідні параметри еліпсоїда.

Для обчислення планових координат для усіх пунктів використовується кілька проєкцій (наприклад, проєкція Гаусса-Крюгера, або проєкція Ламберта). Більшість програм обробки супутникових даних та програм САД (Computer Assisted Design) пакета мають у своєму складі програмні модулі для взаємного перетворення проєкцій, перетворення як еліпсоїдальних, так і планарних координат між системами координат і проєкціями, які здійснюють апроксимацію одержаних координат у новій системі координат. Проте слід враховувати можливу похибку перетворення, яка може сягати 1 м.

Для одержання геодезичної точності перетворення координат у різних системах можна обчислити параметри перетворення, використовуючи відомі координати пунктів у старій і новій координатній системі. В подальшому ці параметри перетворення застосовуються до решти координат пунктів, що забезпечує геодезичну точність.

Висотні положення пунктів у СРНС обчислюються в геодезичній системі координат відносно референц-еліпсоїда, що робить ці координатні визначення несумісними з традиційним нівелюванням, в якому висотні позначки обчислюються відносно геоїда.

Для місцевості, де кривизна еліпсоїда та геоїда близькі, перетворення висот відносно еліпсоїда до висот відносно геоїда виконується фіксуванням висот чотирьох пунктів у процесі зрівнювання, при цьому вся мережа буде повернута та зсунута так, що ортометричні висоти пунктів мають достатнє наближення до істинних висот. У певних випадках, при надлишку відомих ортометричних висот, здійснюється вибір висот, які утворюють прийнятний геометричний розподіл. Точність ортометричних висот, одержаних

супутниковими геодезичними спостереженнями, залежить від форми геоїда в обраному регіоні. Для континентальних регіонів невеликих розмірів (10x10 км) з «гладким» геоїдом точність визначення висот знаходиться в межах 3 см. У гірських районах інтерпольовані (завдяки фіксуванню трьох ортометричних висот) ортометричні висоти можуть мати помилку кілька дециметрів.

### **13.5. Підготовка звіту про супутникову геодезичну зйомку**

Метою підготовки звіту є систематизація і збереження відомостей про хід виконання супутникової геодезичної зйомки. Така інформація може виявитися корисною для аналізу іншими фахівцями умов та результатів проведення зйомки, а також відтворення обчислень.

Звіт має містити таку інформацію:

1. Опис місцевості, де виконувалася зйомка, і місце розташування пунктів зйомки. Для кращого сприйняття інформації рекомендується додати карту місцевості.

2. Мета зйомки, ступінь виконання завдань зйомки, відповідність стандартам і вимогам до процедур зйомки.

3. Опис використаних монументів з зазначенням типу використаних марок (підземні або наземні (поверхневі)), результатів робіт з пошуку монументів з оцінкою витраченого часу на пошуки. Доцільно навести список всіх розшукуваних, знайдених та використаних контрольних пунктів.

4. Перелік та опис використаного обладнання, а саме засобів вимірювання (супутникові геодезичні приймачі та інші геодезичні прилади) із вказівкою типу та серійного номера, додаткового устаткування (антени, штативи, біподи, щогли) з вказівкою виконаних заходів щодо їх встановлення та перевірки.

5. Опис схеми виконання зйомки та методів обчислення результатів з вказівкою назви та версії програмного забезпечення, перелік спостережуваних НКА та сесії спостереження, опис чинників впливу на якість спостереження на кожному пункті. Бажаним є опис процедури обчислення координат всіх ексцентричних пунктів та методи перетворення планових та висотних координат пунктів.

6. Опис незапланованих подій під час зйомки (поломок обладнання, надзвичайної сонячної активності, чинників, що заважають, тощо).

7. Додатки до звіту повинні містити:

- перелік замкнених фігур;
- схему відвідування пунктів;
- статистику векторів;
- результати вільного зрівнювання;
- частину результатів зрівнювання з повним накладенням умов і відображенням кутів повороту і статистики;
  - список зрівняних положень і планарних координат;
  - статистика для проекту;
  - копії оригінальних протоколів відвідування пункту;
  - протокол неполадок устаткування;
  - схема проекту, що показує всі пункти, включаючи контрольні, із заголовком, масштабом, мітками довжини;
  - копія оригінальних спостережень або їх версія в незалежному від типу приймача форматі RINEX;
  - копії вхідного файлу і вихідні файли для векторів для програми зрівнювання.

Якісне складання звіту забезпечить подальше використання результатів вимірювань в інших проектах.

### ***Питання для самоконтролю:***

1. *Наведіть чинники, які впливають на вибір тієї чи іншої методики супутникових геодезичних вимірювань.*

2. *Назвіть складові процесу планування.*

3. *Які параметри НАС є визначальними під час проведення супутникових геодезичних зйомок?*

4. *Які режими супутникових спостережень прийнятні для виконання геодезичних зйомок?*

5. *Що передбачає рекогнозування пунктів проведення зйомки?*

6. *Назвіть етапи планування графіка спостережень.*

7. *Яка мета складання організаційного плану?*

8. *Назвіть складові звіту про супутникові геодезичні зйомки.*

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Физическая* енциклопедія : в 5 т. / гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Советская энциклопедия, 1988. – Т. 4. – 704 с.
2. *Глобальная* спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / под ред. В. Н. Харисова, А. И. Петрова, В. А. Болдина. – М. : ИПРЖР, 1998. – 400 с.
3. *Основні терміни у сфері користування радіочастотним ресурсом* : словник-довідник / за ред. П. В. Слободянюка. – Ніжин : Аспект-поліграф, 2006. – 336 с.
4. *Серापинас Б. Б.* Глобальные системы позиционирования / Б. Б. Серापинас. – М. : ИКФ «Каталог», 2002. – 106 с.
5. *Устименко В. Г.* Системы радионавигации / В. Г. Устименко, О. В. Шабров. – Минск : БГУИР, 2000. – 62 с.
6. *Бордовицына Т. В.* Технологии глобального позиционирования (GPS/ГЛОНАСС) [Электронный ресурс] / Т. В. Бордовицына ; Томский государственный университет. – Режим доступа : <http://www.astro.tsu.ru/TGP/>.
7. *Советский* энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. – 4-е изд. – М. : Советская энциклопедия, 1989. – 1632 с.
8. *Антонович К. М.* Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография. Часть 1 / К. М. Антонович. – Новосибирск : СГГА, 2005. – 330 с.
9. *Концепція створення та експлуатації системи координатно-часового і навігаційного забезпечення України з застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем на період 2006–2011 роки.*
10. *The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (APL) An Overview of the Navy Navigation Satellite System* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://sd-www.jhuapl.edu/Transit/>.
11. *Defense magazine published in Israel* [Електронний ресурс]: India deploys first IRNSS navigational satellite in space. – Режим доступу : [http://defense-update.com/20130703\\_irns.html](http://defense-update.com/20130703_irns.html).
12. *Яценков В. С.* Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС / В. С. Яценков. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005. – 272 с.

13. *Офіційний сайт Інформаційно-аналітичного центру федерального космічного агентства ЦНИИМАШ [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://glonass-iac.ru/GPS/>.*

14. *ГЛОНАСС (GLONASS) – Глобальные навигационные спутниковые системы – общие технические параметры GLONASS (ГЛОНАСС) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://glonass-gps.blogspot.com>.*

15. *Большая советская энциклопедия : в 30 т. – М. : Советская энциклопедия, 1969-1978.*

16. *Постнов К. А. Глоссарий Astronet.ru [Электронный ресурс] / К. А. Постнов. – Режим доступа : <http://www.astronet.ru/db/msg/1178057>.*

17. *Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – 3-е изд. – М. : Высшая школа, 2000. – 462 с.*

18. *Рейли Дж. Эра GPS в 2008 году и взгляд в будущее [Электронный ресурс] / Дж. Рейли. – Режим доступа : <http://www.prin.ru/articles/131/>.*

19. *Урличич Ю. Инновация: ГЛОНАСС. Стратегии развития [Электронный ресурс] / Ю. Урличич, В. Субботин, Г. Ступак. – Режим доступа : [http://www.glonass-portal.ru/articles/2011-04-18/glonass\\_innovation.avcms](http://www.glonass-portal.ru/articles/2011-04-18/glonass_innovation.avcms).*

20. *Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (редакция пятая). – М., 2002. – 60 с.*

21. *Селекция сигналов различных спутников [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.gps-chel.ru>.*

22. *Поваляев Е. Системы спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS. Часть 2. Аппаратура потребителей системы [Электронный ресурс] / Е. Поваляев, С. Хуторной. – Режим доступа : <http://chipnews.ru>.*

23. *Анучин О. Н. Интегрированные системы ориентации для морских подвижных объектов / О. Н. Анучин, Г. И. Емельянцева ; под ред. В. Г. Пешехонова. – 2-е изд. – СПб. : ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 390 с.*

24. *Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография. Часть 2 / К. М. Антонович. – М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 360 с.*

25. *Аким Э. Л.* Ионосферная составляющая измерений псевдодалности околосемных космических аппаратов [Электронный ресурс] / Э. Л. Аким, Д. А. Тучин. – Режим доступа : [http://www.keldysh.ru/papers/2004/rep04/rep2004\\_04.html](http://www.keldysh.ru/papers/2004/rep04/rep2004_04.html).

26. *Мікрополоскові* GPS антени ASHTECH CR L1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.geototal.ru/goodescr/621/>.

27. *Точность* GPS измерений [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.geo-garant.ru/>.

28. *Генике А. А.* Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии / А. А. Генике, Г. Г. Побединский. – М. : Картгеоцентр, 2004. – 355 с.

29. *Основні положення побудови Державної геодезичної мережі України* [Электронный ресурс] // Офіційний сайт Державного земельного агентства України. – Режим доступа : [http://www.dazru.gov.ua/terra/control/uk/publish/article?art\\_id=114396&cat\\_id=38306](http://www.dazru.gov.ua/terra/control/uk/publish/article?art_id=114396&cat_id=38306).

30. *Кучер О. В.* Внедрение государственной референтной системы координат Украины. Проблемы и решения [Электронный ресурс] / О. В. Кучер // CREDO-DIALOGUE. – 2012. – № 3(46). – С. 67–73. – Режим доступа : <http://www.credo-dialogue.com/getattachment/47de3a0a-a1f0-41c9-ae3a-cce58c1e3377/Vnedrenie-gos-system-coordinat-Ukraine.aspx>.

31. *Офіційний сайт International GNSS Service (IGS)* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://igsceb.jpl.nasa.gov/>.

32. *Офіційний сайт EUREF Permanent Network* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.epncb.oma.be/>.

33. *Офіційний сайт Mediterranean GPS Network* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/dbShowArraySitesMap.cgi?array=MGN>.

34. *На Украине* запущена пилотная сеть наземных станций ГНСС-наблюдений [Электронный ресурс] // Офіційний сайт ГІС асоціації. – Режим доступа : <http://www.gisa.ru/82337.html>.

35. Портал о геодезии и картографии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.topomaps.ru/>.

36. *Герасимов А. П.* Уравнивание государственной геодезической сети / А. П. Герасимов. – М. : Картгеоцентр–Геодезиздат, 1996. – 216 с.



37. *Марков С.* Использование GPS для целей кадастра [Электронный ресурс] / С. Марков. – Режим доступа : <http://loi.sscs.ru/gis/GPS/chapter101.html>.

38. *Генике А. А.* Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии / А. А. Генике, Г. Г. Побединский. – М. : Картоцентр ; Геодезиздат, 1999. – 272 с.

39. *Большой энциклопедический словарь.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Большая российская энциклопедия ; Норинт, 1997. – 1456 с.

40. *Антонович К. М.* Спутниковый мониторинг земной поверхности / К. М. Антонович, А. П. Карпик, А. Н. Клепиков // Геодезия и картография. – 2004. – № 1. – С. 4–11.

41. *Жуков Б. Н.* Геодезический контроль инженерных объектов промышленных предприятий и гражданских комплексов : учебное пособие / Б. Н. Жуков, А. П. Карпик. – Новосибирск : СГГА, 2006. – 148 с.

42. *GPS meteorology* [Электронный ресурс] // Paroscientific Inc. – Режим доступа : <http://www.paroscientific.com/gpsmet.htm>.

43. *Смирнов М.* Модуль ионосферного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС [Электронный ресурс] / М. Смирнов, Е. Смирнова // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 6. – Режим доступа : [://jre.cplire.ru/alt/jun10/3/text.html](http://jre.cplire.ru/alt/jun10/3/text.html).

44. *Черкашин К. В.* Диагностика состояния ионосферы по данным двухчастотных GPS-приемников [Электронный ресурс] / К. В. Черкашин, Л. В. Козиенко. – Режим доступа : <http://econfr.rael.ru/pdf/2009/10/b137fdd1f7.pdf>.

45. *Савченко В. А.* Методика синтезу функціонально стійкої просторової структури псевдосупутникової радіонавігаційної системи : дис. ... канд. техн. наук : спец. 20.02.14 / В. А. Савченко. – К., 2004. – 235 с.

46. *Cobb, S.* Pseudolites: enhancing GPS with ground-based transmitters / S. Cobb, M. O'Connor // GPS World. – Vol. 9. – No 3. – 1998. – P. 55–60.

47. *Schipper, B.* High performance, low cost commercial INS/GPS design / B. Schipper, W. Soehren, C.E. Mueller // ION GPS 2000, Book of Abstracts, September 19–22, 2000. – Salt Palace Convention Center, Salt Lake City, Utah.

48. *Yang, Y.* Low-cost single frequency DGPS aided INS for vehicle control / *Y. Yang* // Proc. of ION GPS-99, 12-th Int. Tech. Meet. of the Satellite Division of the Inst. of Navigation, Nashville, Tennessee, Sept. 14-17. – 1999. – P. 1419–1427.

49. *Multi-frequency* pseudolites for instantaneous carrier ambiguity resolution / *K.R. Zimmerman, W.C. Melton, D.G. Lawrence, C.E. Cohen* // Proc. of ION GPS-99, 12-th Int. Tech. Meet. of the Satellite Division of the Inst. of Navigation, Nashville, Tennessee, Sept. 14-17. – 1999. – P. 1419 – 1427. – Англ.

50. *Щербаков В. В.* Координатний спосіб діагностики залізничної колії / *В. В. Щербаков, К. М. Антонович, В. Д. Вівчарів* // Сучасні проблеми геодезії і оптики : зб. матеріалів ЛІІ Міжнар. наук.-техн. конф., присвяч. 70-літтю СГГА, 11-21 березня 2003 р. – Новосибірськ : СГГА, 2003. – Ч. III. – С. 180–182.

51. *Ladetto, Q.* In step with INS: navigation for the blind, tracking emergency crews / *Q. Ladetto, B. Merminod* // GPS World. – Vol. 13. – No 10. – 2002. – P. 30–38.

52. *Современная* технологичная модульная система для высокопроизводительной GPS съёмки [Электронный ресурс] // Офіційний сайт Геокад. – Режим доступа : <http://www.geocad.ru/hard/oborudovanie/geodezif/gps/gps-dlja-geodezii/total-station-5700>.

53. *Марков С.* Программное обеспечение обработки результатов GPS-измерений [Электронный ресурс] / *С. Марков, В. Бабченко.* – Режим доступа : <http://loi.sccc.ru/gis/GPS/chapter101.html>.

54. *Нурутдинов К.* Национальная обсерватория. Создание геодезических сетей с использованием GPS [Электронный ресурс] / *К. Нурутдинов.* – Режим доступа : <http://loi.sccc.ru/gis/GPS/chapter101.html>.

55. *Точность* GPS-измерений [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.geogar.ru/gps>.



**НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ**

**Корнієнко Ігор Валентинович**  
**Богом'я Володимир Іванович**  
**Терещук Олексій Іванович**  
**Корнієнко Світлана Петрівна**

## **СУПУТНИКОВІ РАДІОНАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ**

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**

Літературний редактор  
Коректор  
Комп'ютерна верстка і макетування

Л.М. Сила  
О.С. Смелова  
В.М. Олефіренко  
Т.В. Коваленко

Підписано до друку 24.12.2014. Формат 60x84/16. Друк різнографія.  
Гарнітура Times New Roman. Умов. друк. арк. – 16,28. Тираж 300 пр.  
Замовлення № 248/14.

---

Редакційно-видавничий відділ  
Чернігівського національного технологічного університету  
14027, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру  
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції  
серія ДК № 4802 від 01.12.2014 р.