ГЕОДЕЗІЯ

УДК 528.8.04

В. Г. Бурачек, д.т.н., профессор,
В. И. Зацерковный, к.т.н., доцент,
В. Ю. Беленок, аспирант

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СУБПИКСЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СИНТЕЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ

В статье рассмотрены современные проблемы цифровой аеросъёмки, возможные пути повышения качества съёмочных работ. Описаны новые способы съёмки, позволяющие за счёт использования субпиксельной технологии получать снимки более высокого пространственного разрешения.

Ключевые слова: *аэрокосмическая съёмка, дистанционное зондирование Земли, субпиксельные технологии.*

В. Г. Бурачек, д.т.н., професор,
В. І. Зацерковний, к.т.н., доцент,
В. Ю. Беленок, аспірант

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ СУБПІКСЕЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ СИНТЕЗУ ЗОБРАЖЕНЬ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ВЕЛИКОМАСШТАБНОГО АЕРОКОСМІЧНОГО ЗНІМАННЯ

В статті розглянуто сучасні проблеми цифрового аерознімання, можливі шляхи підвищення якості виконання знімальних робіт. Описані нові способи знімання, які дозволяють за рахунок використання субпіксельної технології отримувати знімки більш високої просторової розрізненості.

Ключові слова: *аерокосмічне знімання, дистанційне зондування Землі, субпіксельні технології.*

V. H. Burachek, doctor of technical sciences, professor,
V. I. Zatserkovny, candidate of technical sciences, associate professor,
V. Yu. Belenok, postgraduate student

THE OPERATIONAL EFFECTIVENESS OF SUBPIXEL TECHNOLOGIES OF OBJECTS' IMAGE SYNTHESIS FOR THE LARGE-SCALE AEROSPACE SURVEY

The modern issues of digital aerial survey are discussed in the article. The authors also present the possible ways of quality improvement in surveys. It is also stated that the new survey methods with the use subpixel technologies allow making surveys of much higher spatial resolution.

Keywords: *aerospace survey, remote sensing of the Earth, subpixel technologies.*

Актуальность темы исследования. Методы аэрокосмической съёмки обеспечивают определение точного географического положения исследуемых объектов, процессов и явлений и получение их качественных и количественных биогеофизических характеристик. Научно-технические достижения последних лет в области создания и развития космических

систем, технологий обработки, хранения, интерпретации и использования получаемых данных способствовали расширению круга задач, решаемых с помощью дистанционного зондирования Земли.

Современные аэрокосмические снимки по точности и разрешающей способности в значительной степени удовлетворяют принятым в Украине требованиям к планам и картам, что позволяет эффективно развивать картографическую основу для решения задач кадастра и мониторинга земель.

Для решения задач картографирования, кадастра и мониторинга земель важным аспектом является крупномасштабная цифровая стереосъёмка с автоматизацией геодезической привязки к местности и оперативной обработкой данных.

Важнейшим условием крупномасштабной съёмки является высокая разрешающая способность цифровой съёмочной камеры. Современные цифровые камеры обеспечивают необходимую точность и разрешение аэроснимков, в основном, с мелких высот.

Постановка проблемы. Взаимосвязанные и противоречивые требования точности оценки положения наземных объектов, высокого разрешения снимка и, в то же время, большого поля зрения цифровой камеры, пока не позволяют получать необходимые характеристики космических снимков и высотных аэроснимков (при высоте съёмки свыше 1000 м).

Рассмотрим возможные пути повышения разрешающей способности цифровых аэрокосмических камер.

1. Увеличение фокусного расстояния объектива камеры – ведёт к существенному повышению разрешающей способности камеры, однако в таком же порядке уменьшает поле зрения, что сокращает размер снимаемой площади и, соответственно, эффективность съёмки.

2. Уменьшение размера пикселя фототоприёмной матрицы – может повысить разрешение снимка при условии достаточной фоточувствительности уменьшенных пикселей. С другой стороны, увеличение числа пикселей матрицы требует увеличения тактовой частоты опроса матрицы, или построения в одном блоке группы матриц, работающих параллельно. Очевидно, что все перечисленные варианты приводят к значительному усложнению технического аспекта производства и резко повышают стоимость съёмочной аппаратуры и съёмки в целом.

Кроме того, увеличение числа пикселей матричного блока камеры приводит к значительной нагрузке бортовой памяти, что сокращает автономность съёмочного цикла.

3. Применение субпиксельной технологии съёмки – позволяет получать цифровое изображение более высокого разрешения за счёт разделения пикселей.

Анализ последних исследований и публикаций. Рассмотрим известные съёмочные системы, использующие субпиксельную технологию. В [1] в четырехканальной системе на передающей стороне (т.е. в приборе наблюдения), сетки сдвинуты по горизонтали и вертикали друг относительно друга на 0,5 пикселя. А при синтезе на приемной стороне псевдоцветного изображения используется сетка с шагом в два раза меньшим, чем это необходимо для получения изображения в отдельном спектральном канале. И при этом обеспечивается геометрическое соответствие каналов между собой. Это позволяет воссоздать в синтезированном изображении геометрическую структуру, обеспечивающую в два раза большее

пространственное разрешение, чем это определено исходным шагом дискретизации. Описанный алгоритм носит название «субпиксельной» обработки.

В [2] описан сканерный способ цифровой аэрофотосъёмки с самолёта системой ADS 40 (Airborne Digital Sensor), камера которой состоит их трёх панхроматических линеек, направленных «вперёд» (28° к надиру), «назад» (42° от надира) и «в надир». В этой системе применяются приборы с зарядовой связью (ПЗС) в виде линейки пикселей, а для формирования изображения применяется принцип действия электрооптического сканера. В добиваются повышения разрешающей способности в два раза за счёт смещения на полпикселя расположенных одна возле другой ПЗС-линеек. В надирном направлении снимают ещё четыре ПЗС-линейки (RGB + NI). Камера ADS 80 имеет в сравнении с ADS 40 намного больший объём памяти для записи изображений и позволяет получать цветные и спектрозональные изображения для трёх направлений визирования.

В [3] рассмотрен способ покадровой съёмки местности цифровой камерой, аналогичный способу традиционной аэрофотосъёмки.

Постановка задачи. Целью статьи является рассмотрение основных возможностей предложенных систем субпиксельной аэрокосмической съёмки.

Изложение основного материала. В [3] описан способ субпиксельной обработки цифровых снимков, где при съёмке выполняют угловое смещение оптической оси съёмочной камеры по направлению строк и столбцов фотоприёмной матрицы на n позиций с интервалом $P\rho/f'n$, где P – линейный размер стороны квадрата пикселя матрицы; f' – фокусное расстояние объектива цифровой камеры; $\rho = 206265''$ – радиан, выраженный в угловых секундах. При дешифрировании определяют уровень электрических сигналов от засвечивания прямоугольных участков пикселей, размером $P\dfrac{p}{n}$, где p/n – короткая сторона прямоугольного участка, соответственно по направлениям строк и столбиков. Далее, базируясь на группе пикселей с одинаковым уровнем сигналов от их засветки, преимущественно минимального уровня, по данным сигналам от прямоугольных участков определяют уровень электрического сигнала для каждого участка пикселя площадью $(p/n)^2$, что соответствует его засветке, и, таким образом, делят каждый пиксель ПЗС-матрицы на n^2 субпикселей.

Техническим результатом является повышение разрешающей способности аэрокосмических снимков по площади в n^2 раз за счёт замены пикселей субпикселями.

На рис. 1 представлена схема оптико-электронного прибора для реализации способа аэрокосмической съёмки: 1, 2 – блок объектива; 3 – блок фотоприёмной матрицы; 4 – блоки пьезопластин; 5 – пружинные блоки; 6 – блок обработки информации; 7 – блок управления; 8 – программный блок; 9 – блок коммутации; 10 – блок субпиксельного дешифрирования; 11 – блок формирования цифрового изображения; 12 – блок записи и хранения информации.

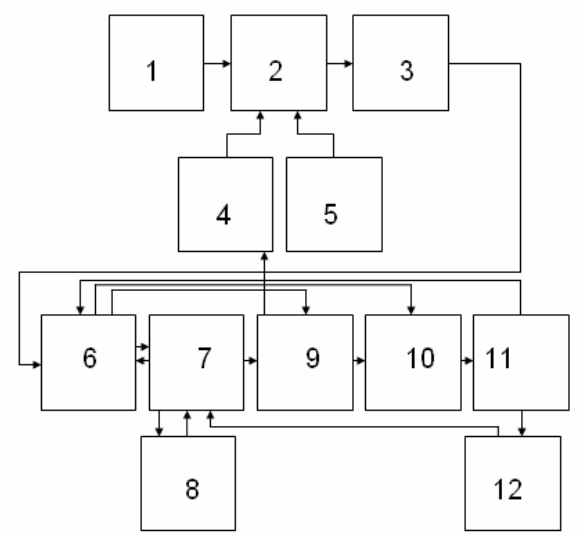


Рис. 1. Блок-схема устройства для дистанционной съёмки

Световые лучи от объекта съёмки попадают в блок объектива 1, 2 и фокусируются на мишени фотоприёмной матрицы 3. Блок 3 преобразует информацию в электрические сигналы и через блок 6 направляет их в блок управления 7, который включает программный блок 8, сигналы от которого преобразуются блоком 7 в управляющие команды и направляются через блок 9 в блок 4. При этом с блока коммутации 9, согласно заданной программе, последовательно с заданным блоком 6 интервалом времени в определённом порядке подаётся напряжение на пластины 4.1, 4.2,…4.*n* по оси *X*, а затем по оси *Y*. Как следствие, образуется дискретный сдвиг оптической оси прибора в направлении одной из осей матрицы (рис. 2).

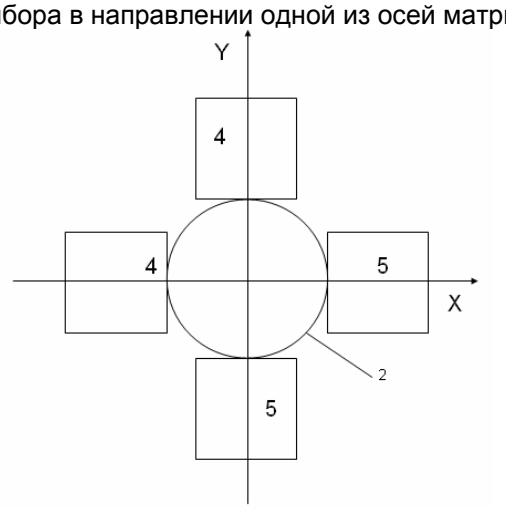


Рис. 2. Дискретный сдвиг оптической оси прибора

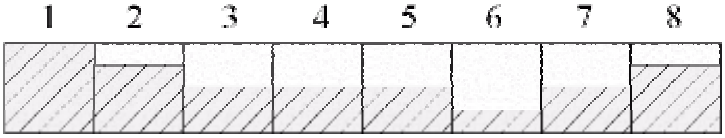
При съёмке повторяют цикл за циклом, выполняя 2*n* экспозиций (пакет) для каждого участка местности с перекрытием между пакетами кадров объекта съёмки.

Принимаемая от объекта информация предварительно обрабатывается в блоке 6. В блок 6 с блока 3 поступают электрические

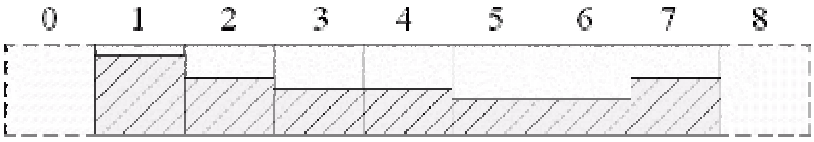
сигналы от засветки пикселей ПЗС-матрицы – от каждого пикселя, в блоке 6 выполняется ранжирование и кодирование этих сигналов. Эту обработанную информацию направляют в блок дешифрирования 10. В блоке 10 анализируют, соответственно, сигналы по каждой строке и каждому столбику для *n* сдвигов оптической оси прибора.

Рассмотрим порядок определения уровня засветки субпикселей в строке в блоке 10. При *n* сдвигах получают *n*+1 субпикселей прямоугольной формы.

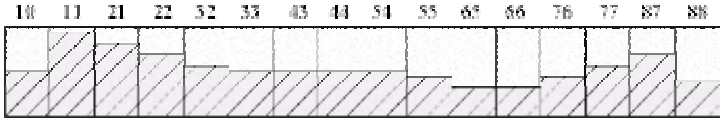
Пускай *n*=1. На рис. 3-а изображён фрагмент строки, состоящей из 8 пикселей (№№ 1 .. 8). Контроллер блока 10 решает задачу: найти группу равносигнальных пикселей в строке и выбирает группы смежных равносигнальных пикселей (не менее двух или трёх).



а)



б)



в)

Рис. 3. Получение субпикселей: а – исходные равносигнальные пиксели; б – «вторичные» равносигнальные пиксели; в – прямоугольные субпиксели

Выполняется сравнение значений электрических сигналов от засветки пикселей в строке (на рис. 3 с интервалом, равным 25%, штриховкой показаны уровни сигналов).

После сдвига оптической оси прибора имеет место сдвиг изображения на ПЗС-матрице на величину $P/(n+1)$, где P – линейный размер квадратного пикселя.

Обратим внимание, что на рис. 3-а равносигнальную границу образуют сигналы в квадратах 3, 4, 5, на рис. 3-б – в квадратах 3', 4' и на рис. 3-в – в прямоугольниках 33', 43', 44', 54'.

Необходимо отметить, что в равносигнальной группе 33', 43', 44', 54' полученные значения и эквивалентность уровней сигналов являются более точными и достоверными по сравнению с другими «полупикселями» строки. При этом, чем больше пикселей в равносигнальных границах (в строке, столбце) и больше таких границ, тем точнее результаты определения уровней сигналов от всех «полупикселей».

Базируясь на равносигнальной группе 33', 43', 44', 54', определяют в блоке 10 уровни сигналов во всех прямоугольниках строки (то есть в соответствующих «полупикселях»), контролируют полученные значения по другим равносигнальным группам в данной строке и при необходимости выполняют вычислительное уравнивание сигналов.

Согласно вышеизложенной технологии в блоке 10 определяют (по сигналам в прямоугольниках $P(p/2)$) сигналы в прямоугольниках $P(p/4)$, $P(p/16)$, $P(p/32)$ и т.д. по строкам и столбикам.

Для каждого пикселя в блоке 10 определяют уровень засветки субпикселей из вычисленных сигналов *n* прямоугольников по строкам и столбцам.

Таким образом, разработанный способ дистанционной съёмки и устройство для его реализации позволяет выполнять дистанционную съёмку и регистрацию аэрокосмических изображений с повышенной разрешающей способностью за счёт построения субпиксельной фотоприёмной анализирующей матрицы.

Среди методов усовершенствования аэрофотосъёмки, заслуживает внимания способ аэрокосмической съёмки, описанный в [3], сущность которого состоит в том, что при съёмке выполняют покадровое сканирование местности, перемещая изображения картины местности в поле зрения цифровой аэрофотосъёмочной камеры в направлении, перпендикулярном к направлению движения летательного аппарата, и выполняют экспозицию снимков дискретно с учётом заданных перекрытий. Одновременно со сканированием, оптически выполняют колебания изображения местности в картинной плоскости камеры, действуя ультразвуковым методом на элементы оптического тракта аэросъёмочной камеры. При этом определяют моменты взаимной компенсации движения изображения за счёт сканирования и перемещения летательного аппарата и за счёт ультразвуковых колебаний оптического элемента (эффект «антисмаза») и в эти моменты в зоне центра кадра выполняют экспозицию.

Дальнейшее развитие этого способа позволило применить субпиксельную технологию, которая состоит в том, что в процессе покадрового сканирования местности в группе кадров для каждого блока кадров выполняют «*n*» экспозиций с интервалом, который содержит дробную часть проекции пикселя фотоприёмной матрицы съёмочной камеры на местность, при этом контролируют скорость перемещения изображения местности на фотоприёмной матрице и по этому параметру регулируют скорость сканирования по оси, перпендикулярной к направлению продольной оси летательного аппарата, и задают точки экспозиций и интервалы между этими точками.

На рис. 4 представлена схема устройства, которое реализует разработанный способ, где соответствующим цифрами обозначено: 1 – объектив цифровой съёмочной камеры (ЦСК); 2 – многоэлементный фотоприёмник (ПЗС-матрица) ЦСК; 3 – оптическое зеркало; 4 – пьезоэлектрические шайбы (ПЭШ); 5 – четырёхгранная отражающая зеркальная призма; 6 – пластина-основа ПЭШ, жёстко закреплённая на корпусе устройства; 7 – электронный блок обработки информации; 8 – электронный блок управления; 9 – механизм вращения призмы 5 около горизонтальной оси; 10 – генератор с распределителем напряжения; 11 – преобразователь; 12 – датчик вертикали; 13 – GPS-приёмник; 14 –земная поверхность; 15 – датчик скорости носителя; 16 – лучи светового потока,

идущие в объектив устройства от местности; 17 – блок записи и хранения информации; 18 – блок измерения скорости перемещения изображения; 19 – блок субпиксельного дешифрирования.

Устройство устанавливается на летательном аппарате, оптическая ось ЦСК направлена вниз по вертикали. Все оптико-механические элементы и часть электронных элементов размещены в едином корпусе.

Элементы 1, 2 образуют оптико-электронный блок, элементы 4, 6, 10 и 11 образуют пьезоэлектрический блок, элементы 3 и 5 образуют зеркально-призменный блок.

Оптическое зеркало и пьезоэлектрические шайбы образуют акустооптический рефлектор.

Во время движения летательного аппарата вдоль оси *Y* в поле зрения ЦСК для каждого блока кадров выполняют «*n*» экспозиций, где одна экспозиция соответствует кадру блока. При этом плотность точек экспозиций задаётся через блок управления, в зависимости от необходимого поперечного и продольного перекрытий. Каждой из «*n*» экспозиций в блоке кадра соответствует определённое положения зеркальной призмы, непрерывное вращение которой обеспечивает расширения угла поля зрения системы (этому соответствуют именно «*n*» кадров блока, размещённых вдоль оси *Y*).

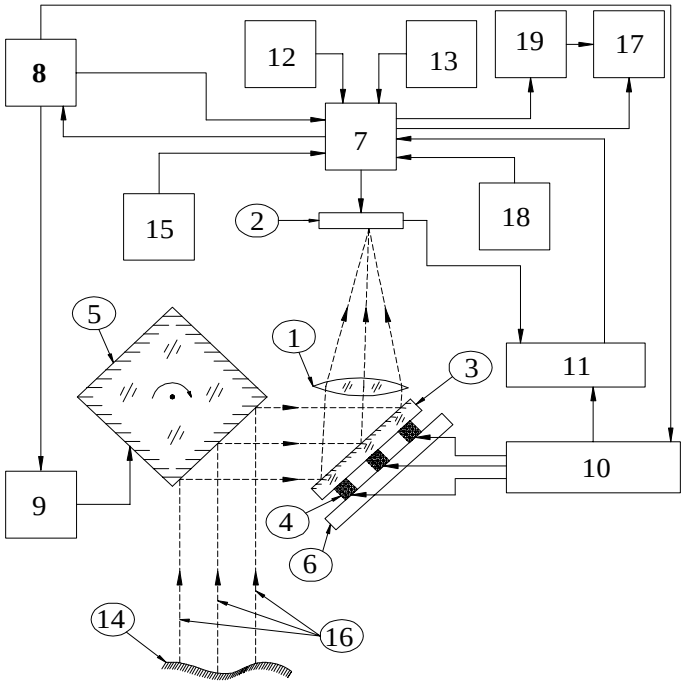


Рис. 4. Схема устройства для цифровой аэрокосмической съёмки

После выполнения первого смещения кадров относительно друг друга акустооптическим рефлектором вдоль оси X на дробный интервал, имеет место смещение засвети в пикселях кадров (сдвиг изображения относительно пикселей матрицы) вдоль оси Y.

Заметим, что дробная часть, на которую выполняют смещение засветки в пикселях кадров вдоль осей X и Y, может быть и не $0{,}5p$. При

другой величине дробного смещения будем иметь другое количество экспозиций для каждого блока кадров.

Информация, принимаемая от объекта, предварительно обрабатывается в блоке 7. Заметим, что в блок 7 с блока 2 поступают электрические сигналы от засветки пикселей ПЗС-матрицы – от каждого пикселя, в блоке 7 выполняется ранжирование и кодирование этих сигналов. Эту обработанную информацию направляют в блок дешифрирования 19, в котором анализируют, соответственно, сигналы по каждой строке и каждому столбцу для n экспозиций.

В связи с колебаниями высоты съёмки, креном, тангажом, рысканьем, отклонением курса вследствие разных явлений в атмосфере, скорость летательного аппарата может изменяться, поэтому блок обработки информации через блок управления и механизм вращения призмы регулирует угловую скорость вращения зеркальной призмы таким образом, чтобы отношение скоростей движения световых лучей по осям X и Y было постоянным.

Представляет интерес способ аэрокосмической съёмки линейных объектов [3, 5], который обеспечивает повышение точности дешифрирования линейных объектов и обеспечивает высокую точность определения их размеров. Это достигается за счёт того, что фотоприёмную матрицу оптико-электронного съёмочного прибора поворачивают около оптической оси прибора, при этом измеряют величину угла поворота. При формировании цифрового плана по величине электрических сигналов от засвеченных пикселей вдоль границ линейного объекта определяют точные границы и ширину объекта и учитывают измеренный угол поворота для перехода в систему координат осей носителя.

Техническим результатом является повышение точности дешифрирования линейных объектов, повышение точности определения их размеров (ширины).

Рассмотрим субпиксельное определение ширины линейного объекта на примере дороги в центре г. Киева по снимку (рис. 5), полученному со спутника QuickBird з разрешающей способностью 0,61 м. После преобразования исходного изображения с «оттенков серого» в монохроматическое, получим бинарную матрицу F={0;255} монохромного изображения, где 0 отвечает чёрному цвету («отсутствие цвета»), а 255 - белому. После этого строим в программе MathCAD монохромное изображение дороги, соответствующее матрице F. В результате различных преобразований при помощи программы MathCAD после опознавания дороги определяем её ширину в пикселях по матрице F. Программно определяем среднее значение номеров столбиков из всех строк, где начинается и заканчивается дорога (линии переднего и заднего фронта фигуры), вычисляем усреднённое количество пикселей между линиями фронта, определяем угол наклона дороги к рамке снимка и, зная величину пикселя на местности, находим ширину дороги на местности. В результате применения данного алгоритма получили ширину дороги 32,25 м.

Процесс определения ширины дороги поэтапно показан на рис. 6.

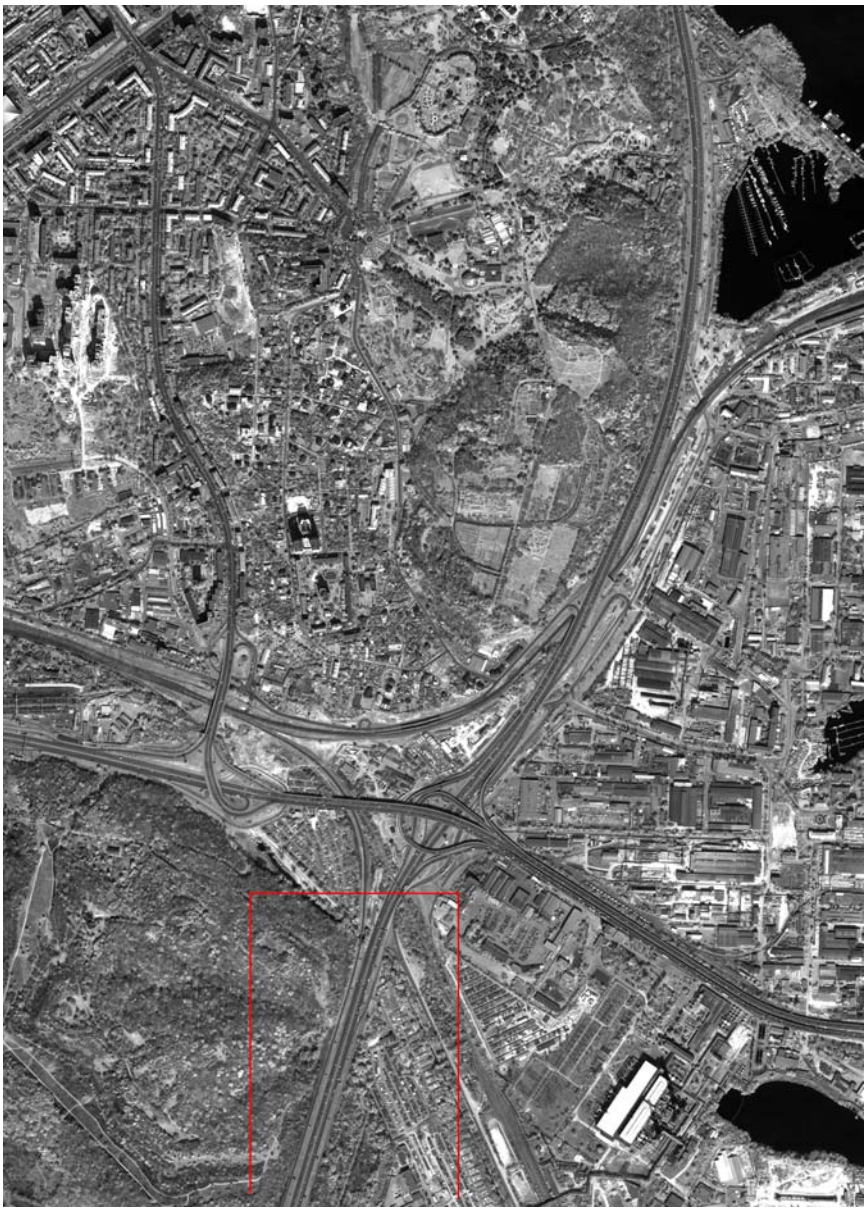


Рис. 5. Снимок центра Киева (выделена определяемая дорога)

Ширину h дороги можно определить по формуле: $h = n \cdot p \cdot \sin\alpha$, где n – усреднённое количество пикселей между линиями переднего и заднего фронта фигуры; p – размер пикселя на местности; α – угол наклона дороги к южной рамке снимка.

В результате вычислений получаем значение ширины дороги $h = 32,25$ м.

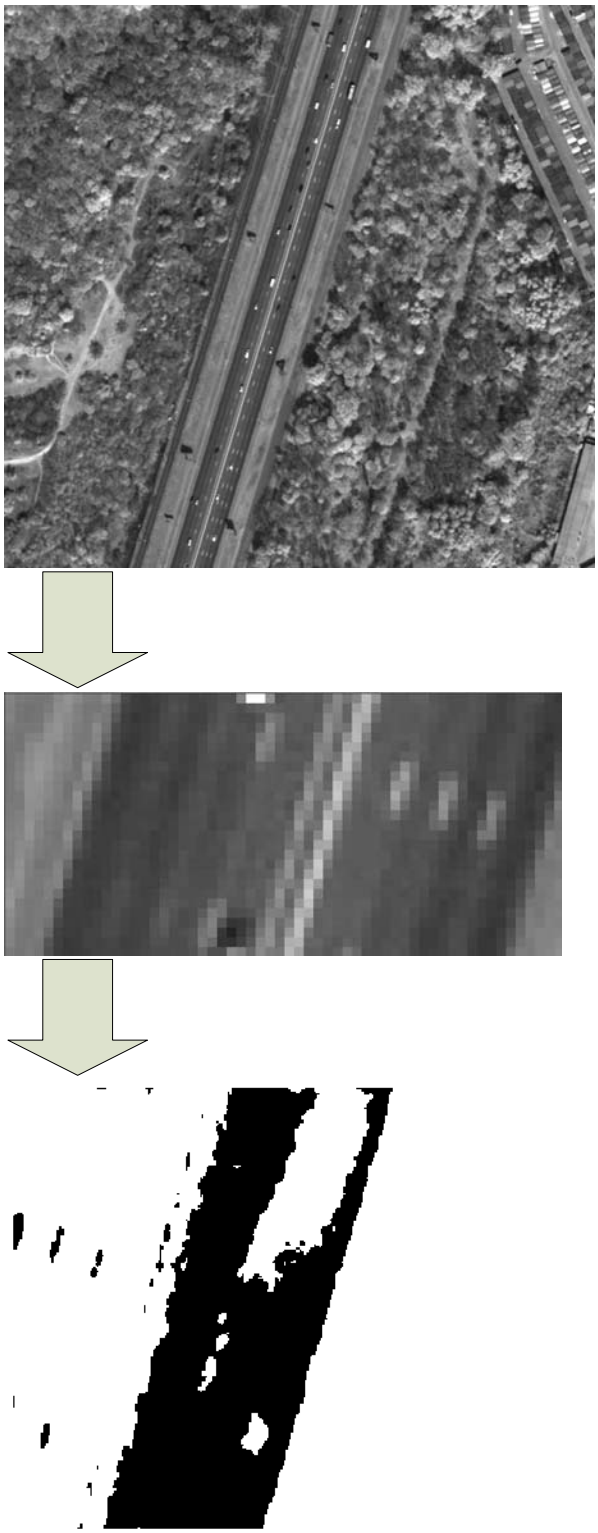


Рис. 6. Последовательное определение ширины дороги

Выводы. В аспекте решения задач крупномасштабного картографирования необходимо отметить, что используемые сегодня для аэрофотосъёмки цифровые камеры заметно уступают фотографическим по разрешающей способности, но имеют много преимуществ, таких как возможность автоматизации фотограмметрического процесса, сокращение его трудоемкости и др.

Приведённые примеры решения проблемы повышения разрешающей способности аэрокосмических снимков показывают реальность и эффективность применения субпиксельной технологии синтеза изображений наземных объектов в матричном поле сенсора аэрокосмической съёмочной системы.

Література

1. Селиванов А. С. Субпиксельная обработка как способ повышения пространственного разрешения в системах дистанционного зондирования / А. С. Селиванов // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. Вторая открытая всероссийская конференция. – 2004. – С. 47.

2. Бурштинська Х. В. Аерокосмічні знімальні системи: навч. посіб. / Х. В. Бурштинська, С. А. Станкевич. - Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2010. – 288 с.

3. Научно-исследовательская работа «Применение технологий дистанционного зондирования Земли для решения задач кадастра и мониторинга земель» / Д.Ф. Байса , В.Г. Бурачек , В.И. Зацерковный, В.Ю. Беленок. – Чернигов-Киев, 2011 р. (номер государственной регистрации 0211U008173).

4. Пат. 79505 Украина, МПК (2006), G02B 13/08, G03B 37/00. Способ цифровой аэрофотосъёмки / Бурачек В. Г., Железняк О. А., Крельштейн П. Д., Надточий А. В., Шульц Р. В.; заявитель и патентообладатель Черниговский государственный институт экономики и управления. – № 200503806; заявл. 21.04.2005; опубл. 25.06.2007, Бюл.№9.

5. The Eighth International Conference on Digital Technologies 2011 / University of Zilina, Univerzitna 8215/1, 01026, Zilina. – November 10 -11, 2011.

Надійшла 07.11.2011 р.