

0 (чорний). Якщо ж значення не менше граничного значення, то «піксель» зараховується до «білих» та йому присвоюється значення 255 (білий).

Таким чином, з подинних ітерацій побудови «цифрової карти» можуть бути одержані монохромні зображення, що представляють «зрізи поверхні» на певній висоті. Результати описаної обробки представлені на рисунку 2.

Об'єднання останніх представляє цифрову карту в цілому, а за умови визначення одного з параметрів шорсткості (максимальна або середня висота мікронерівнот) іншими методами (наприклад, оптичним) може бути обчислена товщина шарів, а, надто, цифрова карта може бути переведена з умовного розбиття у розмірне з подальшим визначенням шорсткості та інших характеристик поверхні.

**Висновки.** Запропонований метод моделювання поверхні забезпечує можливість здійснення автоматизованої (мікропроцесорної) обробки результатів безконтактного дослідження останньої (наприклад, фотозйомки) з метою визначення її шорсткості та інших характеристик.

### Список використаних джерел

1. ГОСТ 28441-99. Картография цифровая. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 28441-90; введ. 2000-07-01. – М.: Стандартинформ, 2005.
2. Егоров В. А. Оптические и щуповые методы для измерения шероховатости поверхности / В. А. Егоров. – М., 1965. – С. 115-117.
3. Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов / Ю. Ф. Назаров, А. М. Шкилько, В. В. Тихоненко, И. В. Компанец // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Т. 5, № 3-4. – С. 207-216.
4. Обрадович К. А. Способ измерения шероховатости сверхгладких поверхностей: а. с. 815492, МКл G01b 11/30 / К. А. Обрадович, Ф. М. Солодухо. – Заявл. 03.04.1979, Б.И. №11, 1981 г.
5. Топорец А. С. Оптика шероховатой поверхности / А. С. Топорец. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. – 191 с.
6. Яковлев В. В. Способ определения чистоты обработки поверхности: а. с. 508670, МКл G01b 11/30 / В. В. Яковлев, С. Е. Ярцева. – Заявл. 29.09.1972, Б.И. №12, 1976 г.
7. Dictionary of Computing, 2-nd Edition, Oxford University Press, 1985.
8. Digital Video and HDTV. Algorithms and Interfaces. by Charles Poynton, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2003. – 736 pages.

УДК 004.7:537.8:622.1

**А.А. Кудряшов**, аспирант

Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

## ЗАТУХАНИЕ РАДИОВОЛН И БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЕЙ ДИАПАЗОНА 2,4 ГГц

*Произведён сравнительный обзор различных стандартов беспроводной передачи данных. Рассмотрена возможность использования беспроводных сетей ZigBee для построения промышленных сетей. Представлены результаты исследования влияния влажности и свойств материалов, используемых в строительстве, на затухание электромагнитных волн диапазона 2,4 ГГц.*

**Ключевые слова:** беспроводная сеть, затухание, электромагнитная волна.

*Зроблений порівняльний огляд різних стандартів бездротової передачі даних. Розглянуто можливість використання бездротових мереж ZigBee для побудови промислових мереж. Представлено результати дослідження впливу вологості і властивостей матеріалів, які використовуються в будівництві, на затухання електромагнітних хвиль діапазону 2,4 ГГц.*

**Ключові слова:** бездротова мережа, затухання, електромагнітна хвиля.

*A comparative overview of the different standards of wireless data. The possibility of using ZigBee wireless networks to build industrial networks. The results of studies of the effect of electromagnetic waves attenuation range of 2.4 GHz depend upon moisture and construction materials properties are presented.*

**Key words:** wireless, attenuation, electromagnetic wave.

**Введение.** В последнее время активно применяются беспроводные стандарты передачи данных. Широкое распространение в промышленности получили беспроводные

стандарты класса IEEE 802.1x (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee). Общим для этих стандартов есть возможность использования безлицензионного для Украины диапазона частот 2,400 – 2,485 ГГц [1], дешевизна разработки продукта и широкая поддержка иностранных производителей микросхем. Основная проблема создания радиосети малого радиуса действия – это влияние преград различного рода на распространения электромагнитных волн. Особенно остро задача стоит при использовании диапазона 2,4 ГГц, так как проводилось достаточно мало исследований о затухании радиоволн данного диапазона. Необходимость исследований такого рода малоактуальна для бытовых устройств, ввиду отсутствия необходимости гарантировать покупателю точное расстояние и качество связи. В промышленности – данные о стабильности и качестве связи дают важную информацию для проектировщиков радиосетей и разработчиков беспроводного телеметрического оборудования. Стабильность, качество связи, а также хорошая предсказуемость зон покрытия даёт возможность использовать беспроводные устройства для создания сетей мониторинга подвижных объектов и значительно сэкономить средства и время развёртывания таких сетей.

**Технологии беспроводных сетей.** Одной из важнейших частей автоматизированной системы производства есть сети передачи данных. Для связи всех систем промышленной автоматики в единую структуру и дальнейшей обработки полученных данных используются различные промышленные проводные и беспроводные сети. Примером таких проводных сетей могут быть CAN, Profibus, Modbus, Industrial Ethernet и так далее. Эти сети были созданы для удовлетворения нужд производства различного рода в различное время развития технологий и значительно отличаются по своей структуре. Для централизованной обработки данных приходится использовать различные интерфейсы, что усложняет процесс разработки информационной системы, удорожает центр сбора и обработки информации, за счёт наличия большого количества преобразователей интерфейсов. В большинстве случаев передача данных на большие расстояния через проводные сети датчиков невозможна.

Использование проводных сетей требует значительных материальных затрат, а в некоторых случаях становится и вовсе невозможным (например, если речь идёт о мониторинге персонала шахты). Значительное снижение стоимости беспроводных решений, широкая поддержка со стороны производителей микросхем, открытые стандарты протоколов передачи данных позволяют отказаться от сбора телеметрической информации проводным путём.

Очевидно, что исключение использования проводных линий убирает некоторые ограничения при построении сетей мониторинга объектов и управления производством.

В основном беспроводные сети малого радиуса действия представлены протоколами Bluetooth, UWB, ZigBee и Wi-Fi которые описываются стандартами IEEE 802.15.1, 802.15.3, 802.15.4 и 802.11a/b/g/n соответственно.

Диапазон частот 2,4 ГГц является наиболее интересным для использования его в промышленных беспроводных сетях, так как он наименее «зашумлен» посторонними сигналами и не требует лицензирования для использования на территории Украины [1].

Рассмотрим Bluetooth, ZigBee и Wi-Fi протоколы, что соответствуют IEEE 802.15.1, 802.15.4 и 802.11b/g стандартам соответственно. Протоколы UWB и Wi-Fi/802.11a/n рассмотрению не подлежат ввиду необходимости лицензирования рабочего диапазона частот на территории Украины.

Стандарты IEEE определяют только физические (PHY) и MAC-уровни. Bluetooth/IEEE 802.15.1 стандарт радиосвязи ближнего радиуса действия и предназначен для замены кабелей в компьютерной периферии [2]. И относиться к беспроводным персональным сетям (WPAN). В Bluetooth существуют две топологии сети: пикосети и расп-

ределённые сети. Пикосеть образует WPAN сеть с одним ведущим и остальными ведомыми устройствами. Скачкообразной перестройкой частоты канала ведущее устройство определяет каждый адрес ведомого устройства пикосети. Все устройства, участвующие в коммуникации, синхронизированы с ведущим устройством. Ведомые устройства обмениваются информацией только с ведущим устройством. Передача информации может осуществляться либо в режиме точка-точка, либо в режиме точка-многоточка, и происходит только при участии ведущего устройства. Помимо активного режима, все ведомые устройства сети могут находиться в режиме пониженного энергопотребления. Распределённая сеть – это сеть, состоящая из нескольких пикосетей. Bluetooth устройство может находиться в нескольких пикосетях одновременно, что даёт возможность передавать информацию за пределы покрытия одной пикосети. Устройство в распределённой сети может быть ведомым в нескольких пикосетях, но ведущим только в одной.

Протокол Wi-Fi включает в себя стандарты IEEE 802.11 b/g для беспроводных локальных сетей (WLAN). Основой стандарта сети IEEE 802.11 называется ячейка базового набора услуг (BSS), которая может быть представлена мобильными или стационарными станциями. Если станция выходит из BSS, она больше не может напрямую общаться с другими членами BSS. Стандарт IEEE 802.11 предусматривает конфигурацию сети как независимая ячейка базового набора услуг (IBSS) и ячейка расширенного набора услуг (ESS).

Конфигурация сети IBSS позволяет станциям сети IEEE 802.11 общаться напрямую, без точки доступа, этот тип работы сети часто называют одноранговой сетью. Кроме того, существующие независимо друг от друга BSS могут являться компонентом распределённой сети. Для соединения BSS вместе требуется система распределения. Система распределения с точками доступа стандарта IEEE 802.11 позволяет создать сеть ESS произвольного размера и сложности. Такие сети часто называют инфраструктурами.

ZigBee/IEEE 802.15.4 – это стандарт низкоскоростных WPAN сетей (LR-WPAN), разработанный для поддержки устройств с малым потреблением электроэнергии. ZigBee обеспечивает создание самоорганизующейся мульти-хоп сети и включает надежные сетевые сетки с длительным временем жизни [3]. Два типа устройств могут находиться в LR-WPAN сети: полнофункциональные устройства (FFD) и устройства с уменьшенной функциональностью (RFD). FFD могут работать в трех режимах, выступающих в качестве координатора PAN, маршрутизатора или устройства. FFD может общаться с RFD или FFD, а RFD может общаться только FFD. RFD предназначен для простых приложений, таких как датчик света, выключатель и так далее. В этих устройствах нет необходимости посылать большие объемы данных и общаться с FFD постоянно. Следовательно, устройство RFD может быть создано с использованием минимальных вычислительных ресурсов и памяти. При первом включении FFD, устройство может создать собственную сеть и стать координатором PAN. RFD может подключиться к сети и образовывать узел на конце ветки. Любой из FFD может выступать в качестве маршрутизатора и обеспечивать связи между другими устройствами или другими координаторами.

Для беспроводных сетей датчиков и в системах промышленного контроля и управления в большинстве случаев объем данных, как правило, небольшой, и потребность в высокоскоростных сетях отсутствует. С точки зрения сложности и ресурсоемкости Bluetooth является наиболее сложным протоколом с 188 примитивами. С другой стороны, ZigBee является наиболее простым и содержит только 48 примитивов, которые определены в стандарте IEEE 802.15.4. По сравнению с Bluetooth и Wi-Fi, простота протокола ZigBee делает его весьма эффективным для сенсорных сетевых приложений в связи с их ограниченным объемом памяти и вычислительной мощности.

С точки зрения потребляемой мощности ZigBee наиболее подходит для приложений с батарейным питанием и почти в два раза эффективнее Bluetooth [4].

В промышленности большое количество устройств разного рода ставило задачи использования сетей и протоколов различного рода. В случае замены всех проводных сетей на предприятии – формировалось огромное количество устройств, что требовало достаточно сложной и масштабируемой топологии сети. Рассмотренные протоколы позволяют формировать достаточно большие сети. Однако именно протокол ZigBee даёт на порядки большее количество узлов в одной ячейке. Возможность формировать ячейки с большим количеством узлов (устройств) делает сеть менее сложной для построения. Так как количество узлов в ячейке определяется на РНУ и MAC уровнях это не влечёт за собой увеличения вычислительных ресурсов конечного устройства.

**Распространение радиоволн диапазона частот 2,4 ГГц.** Важной частью построения беспроводной сети является планирование количества повторителей (репитеров, маршрутизаторов) сигнала для формирования требуемого радиуса действия сети, что значительно влияет на окончательную цену сети. Важно учитывать и радиус действия устройства беспроводной сети. В случае построения сети мониторинга или управления подвижных объектов требуется создать зоны гарантированного покрытия сетью предполагаемых трасс движения объектов. При создании зон покрытия следует также учитывать топологию сети, скорость движения объекта и время, необходимое для совершения обмена данными с устройством. Конечно в большинстве случаев время обмена данными составляет микросекунды, однако если таких объектов десятки, то время опроса каждого суммируется.

В спецификациях предоставляемыми разработчиками и производителями беспроводного оборудования зачастую не указывается радиус действия, а указывается выходная мощность.

На радиус покрытия беспроводного устройства сети влияет наличие преград на пути распространения электромагнитных волн, выходная мощность, диаграмма направленности, среда распространения и тип используемой антенны (учёт характеристик антенны).

В диапазоне частот 2,4 ГГц достаточно мало проведено исследований затухания электромагнитных волн в различных средах и материалах. Это, прежде всего, обусловлено наличием значительного количества готовых решений, отсутствием необходимости лицензирования данного диапазона частот по всему миру (что даёт возможность наращивать объёмы производства беспроводных решений) и широкой поддержкой со стороны производителей. Таким образом, проводить исследования не представляет особого интереса со стороны производителей, а со стороны потребителей все исследования ограничиваются опытными испытаниями и отсутствием систематического подхода.

Ввиду сложившейся ситуации было произведено исследование затухания электромагнитной волны в диапазоне частот 2300-3000 МГц. Это полностью перекрывает безлицензионный диапазон 2,4 ГГц, а также даёт представление о целесообразности использования диапазона частот 2,4 ГГц для построения беспроводной системы радиосвязи в закрытых пространствах при наличии преград.

Для проведения исследования была собрана система панорамного измерителя для измерения частотной характеристики ослабления проходящей мощности.

Структурная схема панорамного измерителя ослабления в полосе частот представлена на рисунке 1. Панорамный измеритель состоит из генератора качающейся частоты ГКЧ-53, индикатора КСВ и ослабления Я2Р-67, коаксиально-волноводного перехода, направленного ответвителя (НО) две детектирующие головки (ДГ) и исследуемого образца.

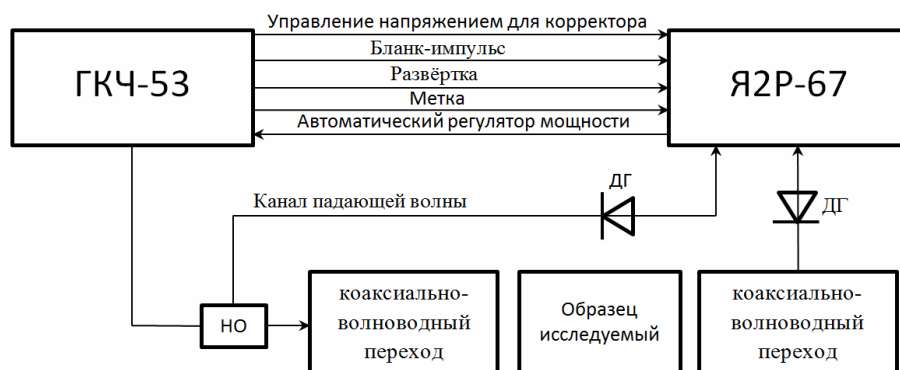


Рис. 1. Структурная схема панорамного измерителя

Все исследования образцов проводились при постоянной температуре и давлении. Перед началом каждого измерения образца строился начальный график. Начальный график строился на результатах измерения свободного распространения электромагнитной волны (при отсутствии исследуемого образца). При проведении исследования были соблюдены инструкции по эксплуатации приборов, а погрешности, вносимые соединительными муфтами, затуханием в кабеле, отражением электромагнитных волн, носили постоянный характер, о чём свидетельствует совпадения начальных графиков каждого измерения. Результаты измерений носили относительный характер и высчитывались по следующей формуле:

$$A_k = A_n - A_o, \quad (1)$$

где  $A_k$  – относительная амплитуда электромагнитной волны;

$A_n$  – амплитуда электромагнитной волны без образца;

$A_o$  – амплитуда электромагнитной волны с образцом.

Коаксиально-волноводные переходы были разнесены на расстояние 30 см. При проведении измерений особое внимание уделялось полосе частот от 2400 до 2485 МГц, и замеры амплитуды проводились каждые 5 МГц. Плоскость поляризации открытого конца волновода была вертикальной. Размещение образцов происходило вплотную к излучающему концу волновода, что исключало эффекты дифракции электромагнитных волн, а размер образцов был подобран так, что происходило полное перекрытие излучающего конца волновода.

На рисунке 2 представлены графики зависимости затухания электромагнитной волны вертикальной поляризации от ориентации волокон деревянной преграды и влажности. Измерение влажности дерева проводилось прибором ДТ-129, который позволяет измерять влажность от 6 % до 99,9 %. Значение влажности сухого образца составило 7,2 %, а влажного образца – 18,4 %. Толщина образца – 12 мм.

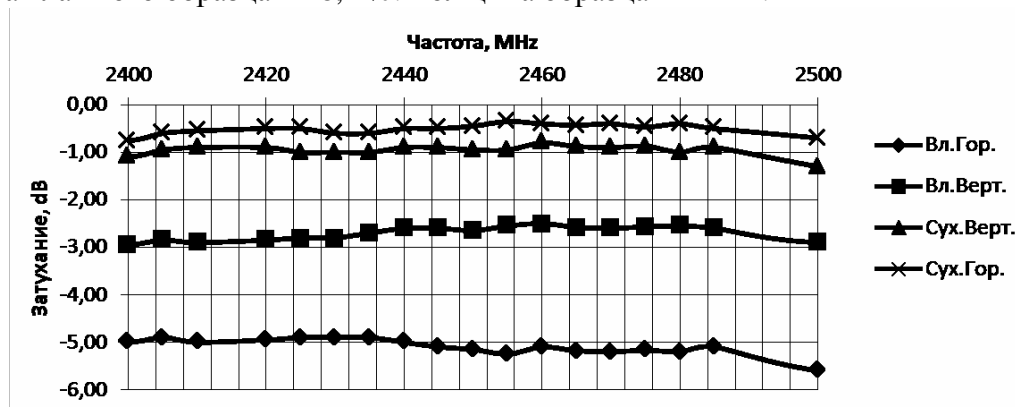


Рис. 2. Зависимость затухания от влажности и плоскости ориентации волокон деревянной преграды

В ходе эксперимента установилась зависимость затухания электромагнитной волны от ориентации волокон деревянного образца относительно плоскости поляризации электромагнитной волны. Значения «Вл.Гор.» – влажный образец с горизонтально ориентированными волокнами, следовательно «Вл.Верт.» – влажный образец с вертикально ориентированными волокнами, «Сух.Верт.» – сухой образец с вертикально ориентированными волокнами, «Сух.Гор.» – сухой образец с горизонтально ориентированными волокнами. Из графиков видно, что в сухом состоянии (7,2 % влажности) при совпадении плоскости поляризации и ориентации волокон затухание было меньше чем при несовпадении на 0,5 дБ в среднем. Однако во влажном (18,4 % влажности) состоянии ситуация изменилась на противоположную, при несовпадении плоскостей поляризации электромагнитной волны и ориентации волокон дерева затухание было меньше на 2-2,5 дБ, чем при совпадении плоскостей. В основной полосе частот (2,400-2,485 ГГц) изменение затухания были незначительны, в пределах 0,5 дБ, значит полоса частот достаточно стабильна для использования. Под стабильностью имеется ввиду одинаковое затухание в полосе частот, а значит при использовании технологии ZigBee (или схожей, в этом диапазоне) выбор канала не будет влиять на качество связи.

На рисунке 3 представлены графики зависимостей затухания от типа материала, которые наиболее распространённые в строительстве, а именно:

- бетон марки М300 (соответствует классу бетона В22,5 по прочности) 82×82×17 мм;
- кирпич М75 82×82×18 мм;
- гипс марки Г-10 75×82×18 мм;
- пенобетон марки D800 (соответствует классу бетона В5 по прочности) 78×83×21 мм.

Материалы были максимально высушены, однако о содержании влаги в них ничего известно не было. Так как условия проведения эксперимента были одинаковы, а именно влажность температура и время проведения эксперимента, то можно пренебречь абсолютной влажностью каждого образца и отнести это к свойствам самого материала.

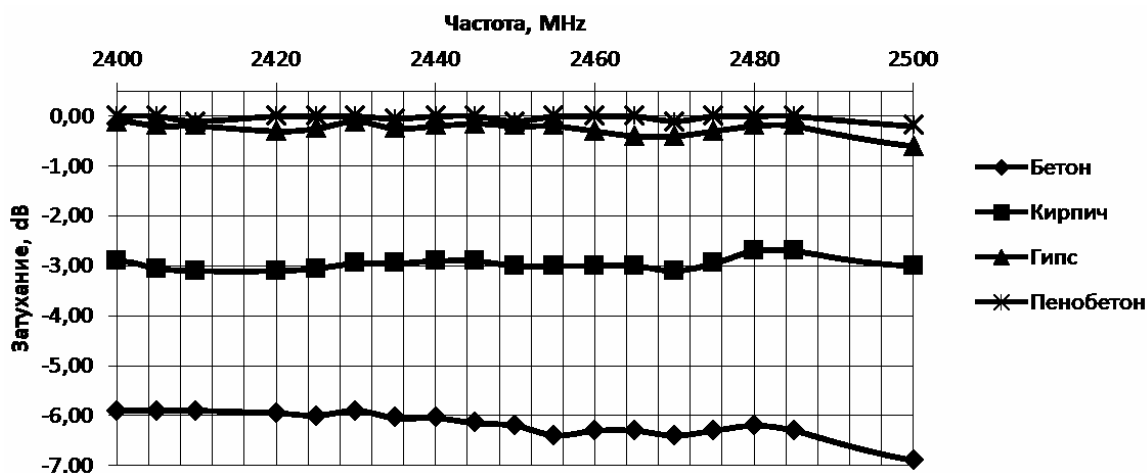


Рис. 3. Зависимость затухания от частоты в строительных материалах в неувлажнённом состоянии

В исследуемой полосе частот затухание достаточно равномерно. Максимальное затухания наблюдается у бетона, что можно объяснить максимальным количеством связанной воды в материале. Вода в этом диапазоне частот является одним из основных поглотителей. Пенобетон и гипс влияли на затухание незначительно. На рисунке 4 представлены графики зависимостей затухания от типа материала в увлажнённом состоянии. Увлажнение производилось погружением образца в воду на 15 минут. А измерение влажности было относительным, производилось взвешивание высушенного об-

разца, а затем взвешивание увлажнённого. Процентное увлажнение относительно высушенного образца приведено ниже:

- кирпич – 2,362%;
- пенобетон – 13,149%;
- гипс – 5,219%;
- бетон – 0,796%.

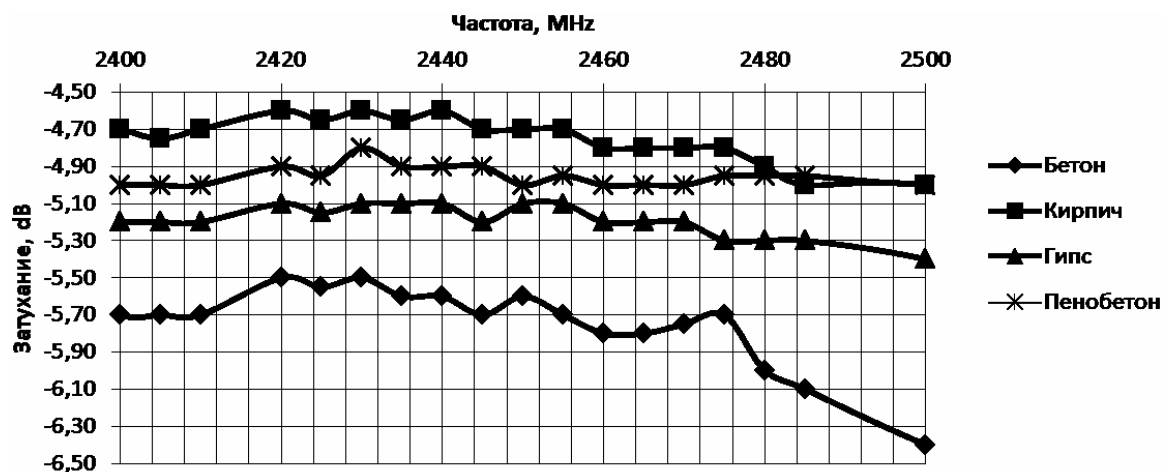


Рис. 4. Зависимость затухания от частоты в строительных материалах в увлажнённом состоянии

Как видно из вышеприведенных графиков, равномерность затухания исчезла, а в полосе частот 2,480-2,500 ГГц в бетоне затухание резко возрастает. В полосе частот 2,425 ГГц наблюдается значительное уменьшение затухания, что говорит о целесообразности использовать данную полосу при наличии преград подобного рода.

На рисунке 5 показана полоса частот 2300-3000 МГц. Это позволяет судить об актуальности использования частоты 2400-2485 МГц, а не другой близкой.

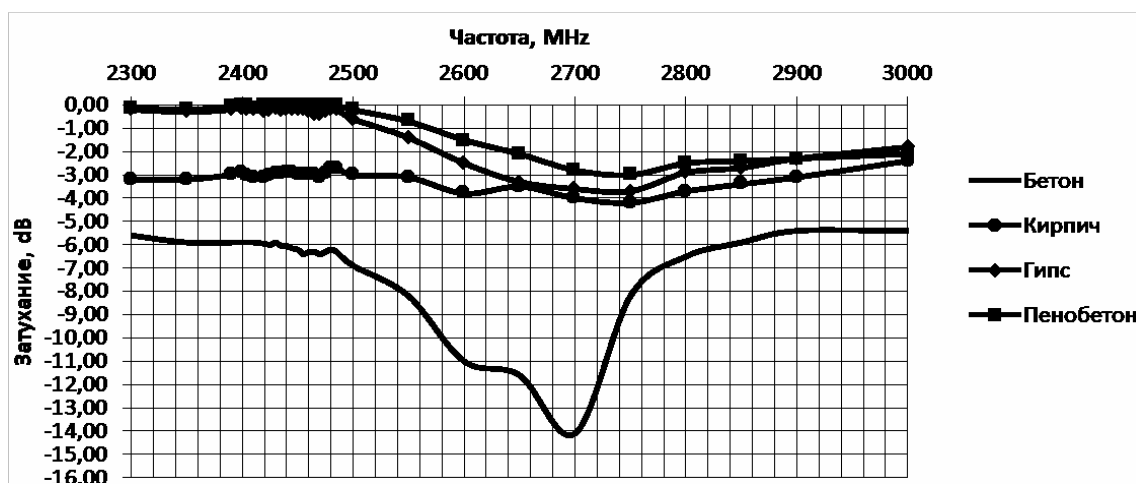


Рис. 5. Затухание в строительных материалах 2,3-3 ГГц

Равномерность затухания обеспечивается в полосе частот от 2300 -2490 МГц. При повышении частоты затухание резко возрастает. Такой провал можно объяснить присутствием воды в образцах. Бетон имеет наибольшее количество связанной воды, а значит и картина более явная. Выбор частоты 2,4 ГГц для промышленных сетей более чем оправдан. Хотя для бетона более приемлемая частота 2900-3000 МГц, этот диапазон частот требует лицензирования в большинстве стран.

**Выводы.** Использование беспроводных технологий для построение промышленных сетей значительно упрощает процесс создания сети, делает сеть легко масштабируемой и

дешёвой, однако надёжность беспроводной сети в значительной мере зависит от качества и устойчивости связи. При построении высоконадёжной беспроводной сети и обеспечении гарантированных зон покрытия сетью, необходимо учитывать как среду распространения (температуру, влажность наличие различных фракций в воздухе, флуктуаций), так и тип преград на пути распространения. Полученные результаты эксперимента не поясняют в полной мере причины затухания. Результаты можно пояснить двумя способами. Первое – это непосредственно затухание в материале, то есть материал поглощает электромагнитную волну, что есть самым простым и понятным эффектом. Второе – это рассматривать исследуемый образец как рассеивающую линзу, можно предположить, что материал, вносимый на пути распространения, рассеивает электромагнитную волну. Изменение затухания можно отнести к свойствам материала. Увлажнение материала приводит к изменению плотности и диэлектрической проницаемости материала. Зависимость плоскостей ориентации волокон дерева и поляризации электромагнитной волны можно отнести к свойствам материала вращать плоскость поляризации. В менее структурированных материалах эффект вращения плоскости поляризации менее заметен. Исследовать причины затухания не представлялось интересным, так как целью эксперимента было оценить влияние материалов и среды распространения на уровень сигнала. В реальных условиях эксплуатации беспроводных сетей данного диапазона частот, эффекты затухания, наблюдаемые в лабораторных условиях, предположительно будут схожи. При достаточном увлажнении материалов затухание увеличивается на единицы дБ, а значит могут свести на нет усиливающий эффект антенн. В основном антенны с усилением более 3 дБ не используются, а значит изменение или исключение преград на пути может быть приемлемее использование (покупки) мощных антенн (например, изменение места расположения приёмопередатчика).

Бетон показал наиболее высокое затухание электромагнитной волны, хотя толщина образца составила всего 17 мм затухание составляло более 5 дБ. На практике толщина бетонных перекрытий значительно превышает 17 мм, а значит можно говорить, что бетон является непроходимой преградой для длин волн диапазона частот 2,4 ГГц. Преграды такого материала практически полностью поглощают либо отражают электромагнитные волны исследуемого диапазона, применение бетонных перекрытий или стен изолирует зоны покрытия и требует дополнительных приёмопередатчиков. Аналогичная ситуация складывается и с кирпичом, при исследовании образца толщиной 18 мм затухание составило более 3дБ, а толщина кирпича значительно превышает толщину образца. В промышленности и в быту стены строят из кирпича (в основном), а перекрытия бетонные, зона покрытия одного передатчика ограничивается одним помещением. На практике зоны покрытия значительно превышают территорию одного помещения, что легко пояснить эффектом отражения электромагнитной волны и преодоления таких преград, как деревянные двери и окна. На производствах, к примеру в цехах, территория помещения достаточно велика, а значит использование приёмопередатчиков более эффективна. В шахтных выработках покрытие стен – бетонное либо схожее, а опоры деревянные, что не мешает распространению радиоволн диапазона 2,4 ГГц. Если принимать во внимание изгибы туннелей и отражение радиоволн, можно говорить о качественной зоне покрытия даже без прямой видимости. Наличие дисперсий горных пород в воздухе рассеивает радиоволны, мера влияния дисперсий на распространение радиоволн требует дополнительного исследования.

Для построения беспроводных сетей предпочтительно использовать деревянные, гипсовые либо пенобетонные стены.

#### **Список использованных источников**

1. Про радіочастотний ресурс України: Закон України; План використання радіочастотного ресурсу України: затв. постановою Кабінету Міністрів України від 09.06.2006 № 815.



2. 802.15.1-2002 - IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN - Specific Requirements - Part 15: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs).

3. 802.15.4-2011 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs).

4. Baker, N. "ZigBee and Bluetooth: Strengths and weaknesses for industrial applications," IEE Computing & Control Engineering, vol. 16, no. 2, pp 20-25, April/May 2005.

UDC 004.738.5.057.4

**Volodymyr Kazymyr**, Ph. D. Sc.

Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

**Mariya Tevkun**, Ph.D. student

Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

**John N. Davies**, principal lecturer

Creative and Applied Research for the Digital Society, Glyndŵr University, Wrexham, United Kingdom

**Paul Comerford**, research student

Creative and Applied Research for the Digital Society, Glyndŵr University, Wrexham, United Kingdom

## COMPARISON OF THE PERFORMANCE OF IPV4 & IPV6

*The performance issues, associated with converting an IPv4 network to an IPv6 network, were discovered. To eliminate the uncertainties related to the Internet performance a set of experiments was conducted in the laboratory network to compare the delays experienced by packets traversing IPv4 network, IPv4 network with NAT, IPv6 network and mixed networks with utilizing tunnels. Very significant variations in the delays were found when using anything other than an IPv4 network.*

**Key words:** internet-protocol, IPv4 address exhaustion, IPv6, IPv4 tunnels, IPv6 tunnels, NAT, network performance.

*Досліджено проблеми продуктивності, пов'язані з переходом від IPv4-мереж до IPv6-мереж. Для усунення невизначеностей, пов'язаних із впливом різних типів мереж на продуктивність мережі Інтернет, у лабораторних умовах була проведена серія експериментів, щоб порівняти затримки, що виникають при транспортуванні пакетів в IPv4-мережі, IPv4-мережі з використанням NAT, IPv6-мережі, а також змішаних мережах, які здійснюють передачу пакетів за допомогою технології статичного тунелювання. При використанні не IPv4-мереж були виявлені значні варіації в затримках.*

**Ключові слова:** інтернет-протокол, вичерпання IPv4 адрес, IPv6, IPv4 тунелі, IPv6 тунелі, NAT, продуктивність мережі.

*Исследованы проблемы производительности, связанные с переходом от IPv4-сетей на IPv6-сети. Для устранения неопределённости, связанных с влиянием различных типов сетей на производительность сети Интернет, в лабораторных условиях была проведена серия экспериментов, чтобы сравнить задержки, возникающие при транспортировке пакетов в IPv4-сети, IPv4-сети с использованием NAT, IPv6-сети, а также смешанных сетях, осуществляющих передачу пакетов при помощи технологии статического тунелирования. При использовании не IPv4-сетей были обнаружены значительные вариации в задержках.*

**Ключевые слова:** интернет-протокол, исчерпание IPv4 адресов, IPv6, IPv4 туннели, IPv6 туннели, NAT, производительность сети.

**Introduction.** The problem of IPv4 address exhaustion is a well known problem that first appeared in the 1980s due to a large unexpected increase in the number of Internet users. The problem has been exasperated by the rate of take up of the internet in developing countries, the introduction of smart mobile devices that are capable of accessing the Internet using IP addresses and virtualization technology. Despite the use of various technologies to mitigate the problem, such as CIDR and NAT, in April 2011 the first Regional Internet Registry (RIR) for the Asia/Pacific Region (APNIC) exhausted its pool of allocated addresses [1]. Additionally RIPE (Réseaux IP Européens) the European RIR ran out of addresses in September 2012. It is predicted that the American Registry for Internet Numbers (ARIN) region will run out of addresses by January 2014. Figure 1 shows the rate of allocation of IPv4 addresses. So dealing with this problem has become high priority in many countries worldwide. IPv6, a new version of the IP protocol, was developed to solve this problem. To highlight the importance of the change from IPv4 to IPv6 a launch test day was announced "Happy World IPv6 Launch Day (June 6, 2012)" to encourage users to test their IPv6 Connections. The main advantage of the IPv6 is the bigger address field, 128 bytes. It allows creation of larger number of the IP addresses [2].