

Шмігель Б. О. Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, Київ

ВИСОКОЕФЕКТИВНА БЕЗПРОВОДОВА МЕРЕЖА НА ОСНОВІ ГНУЧКОЇ АРХІТЕКТУРИ IEEE 802.11

Анотація: Безпроводові мережі займають ключову роль у разі необхідності оперативного розгортання, мобільності, гнучкості організації мережі і широті можливих додатків, у багатьох випадках будучи єдиним економічно виправданим рішенням.

Виходячи із вищесказаного, для розгортання безпроводових мереж актуальним питанням є правильне теоретичне проектування безпроводової мережі: необхідна кількість пристроїв, їх характеристики, розміщення, енергетичні характеристики каналів, траси розповсюдження та зони покриття, тощо. Коректний теоретичний аналіз забезпечить безпомилкову побудову мережі для успішного виконання поставлених завдань, і не призведе до необхідності залучення додаткових матеріальних витрат. Однією із ключових задач побудови безпроводового зв'язку є достовірні оцінки енергетичних характеристик безпроводового каналу зв'язку.

Сучасні світові виробники телекомунікаційного обладнання будують як магістральне обладнання, так і обладнання для покриття зон WLAN (безпроводових локальних мереж), на основі стандартів IEEE 802.11. Одним із найсучасніших стандартів групи IEEE 802.11 є стандарт IEEE 802.11ac, який характеризується рядом покращених технічних характеристик у порівнянні із його попередником IEEE 802.11n та більш застарілими версіями. Саме тому актуальною є задача оцінки роботи сучасного безпроводового обладнання зв'язку на основі стандартів IEEE 802.11ac та аналізу оцінки енергетичних характеристик каналу зв'язку для передбачення параметрів і характеристик роботи безпроводової системи передачі виду точка-точка, точка-багатоточка чи інших в рамках певної безпроводової мережі зв'язку. Результати вирішення вказаної задачі і представлені в даній роботі, а саме:

- теоретична оцінка енергетичних характеристик безпроводового каналу зв'язку;
- лабораторні дослідження обладнання безпроводового зв'язку стандарту 802.11ac на основі імітації лінії зв'язку за допомогою атенюаторів;
- верифікація результатів лабораторних досліджень в польових умовах на основі моделі оцінки якості зв'язку в безпроводовому каналі, створеному на основі стандарту 802.11ac;

Ключові слова: WiFi, IEEE 802.11, гнучка архітектура

Shmigel B.O. Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute, Kyiv

HIGH-PERFORMANCE WIRELESS NETWORK BASED ON IEEE 802.11 FLEXIBLE ARCHITECTURE

Abstract. Wireless networks have a key role in operational deployment, mobility, the flexibility of network organization and the variety of possible applications, in many cases being the only economically justified solution.

Based on the above, for the deployment of wireless networks, the correct theoretical design of the wireless network is an important issue: the required number of devices, their characteristics, placement, energy characteristics of channels, distribution routes and coverage areas, etc. Correct theoretical analysis will ensure error-free construction of the network for the successful implementation of the tasks and will not lead to the need to attract additional material costs. One of the key tasks of wireless communication construction is a reliable assessment of the energy characteristics of a wireless communication channel.

Modern global manufacturers of telecommunications equipment build both backbone equipment and equipment to cover WLAN (wireless local area networks) areas, based on IEEE 802.11 standards. One of the most modern standards of the IEEE 802.11 group is the IEEE 802.11ac standard, which is characterized by several improved technical characteristics compared to its predecessor IEEE 802.11n and older versions. That is why the task of evaluating the performance of modern wireless communication equipment based on IEEE 802.11ac standards and analyzing the evaluation of the energy characteristics of the communication channel to predict the parameters and performance characteristics of a point-to-point, point-to-multipoint or other

wireless transmission systems within a certain wireless communication network. The following results of solving this problem are presented in this paper:

- theoretical evaluation of the energy characteristics of the wireless communication channel.
- laboratory studies of wireless communication equipment of the 802.11ac standard based on simulating a communication line using attenuators.
- verification of the results of laboratory studies in field conditions based on the model for assessing the quality of communication in a wireless channel created based on the 802.11ac standard.

Keywords: WiFi, IEEE 802.11, flexible architecture.

Шмигель Б. О. Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского, Киев

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ БЕСПРОВОДНАЯ СЕТЬ НА ОСНОВЕ ГИБКОЙ АРХИТЕКТУРЫ IEEE 802.11

Аннотация: Беспроводные сети занимают ключевую роль при необходимости оперативного развертывания, мобильности, гибкости организации сети и широте возможных приложений, во многих случаях являясь единственным экономически оправданным решением.

Исходя из вышесказанного, для развертывания беспроводных сетей актуальным вопросом является правильное теоретическое проектирование беспроводной сети: необходимое количество устройств, их характеристики, размещение, энергетические характеристики каналов, трассы распространения и зоны покрытия. Корректный теоретический анализ обеспечит безошибочное построение сети для успешного выполнения поставленных задач и не приведет к необходимости привлечения дополнительных материальных затрат. Одной из ключевых задач построения беспроводной связи есть достоверная оценка энергетических характеристик беспроводного канала связи.

Современные мировые производители телекоммуникационного оборудования строят как магистральное оборудование, так и оборудование для покрытия зон WLAN (беспроводных локальных сетей) на основе стандартов IEEE 802.11. Одним из самых современных стандартов группы IEEE 802.11 является стандарт IEEE 802.11ac, который характеризуется рядом улучшенных технических характеристик по сравнению с предшественником IEEE 802.11n и более устаревшими версиями. Именно поэтому актуальна задача оценки работы современного беспроводного оборудования завязки на основе стандартов IEEE 802.11ac и анализа оценки энергетических характеристик канала связи для предсказания параметров и характеристик работы беспроводной системы передачи вида точка-точка, точка-многоточка или других в рамках определенной беспроводной сети связи. Результаты решения указанной задачи и представлены в данной работе, а именно:

- теоретическая оценка энергетических характеристик беспроводного канала связи;
- лабораторные исследования оборудования беспроводной связи стандарта 802.11ac на основе имитации линии связи с помощью аттенуаторов;
- верификация результатов лабораторных исследований в полевых условиях на основе модели оценки качества связи в беспроводном канале, созданном на основе стандарта 802.11ac;

Ключевые слова: WiFi, IEEE 802.11, гибкая архитектура

1. Вступ

Актуальність. В сучасному світі життя людини невід’ємно пов’язане з обміном інформацією. Швидкими темпами зростають і вимоги користувачів та організацій до якості, швидкості, доступності, безпеки обміну інформацією, та наявності різноманітних сервісів. Задачі із вказаними вимогами ефективно вирішуються за допомогою безпроводових систем передачі даних.

Безпроводові мережі займають ключову роль у разі необхідності оперативного розгортання, мобільності, гнучкості організації мережі і широті можливих додатків, у багатьох випадках будучи єдиним економічно виправданим рішенням.

Виходячи із вищесказаного, для розгортання безпроводових мереж актуальним питанням є правильне теоретичне проектування безпроводової мережі: необхідна кількість пристроїв, їх характеристики, розміщення, енергетичні характеристики каналів, траси

розповсюдження та зони покриття, тощо. Коректний теоретичний аналіз забезпечить безпомилкову побудову мережі для успішного виконання поставлених завдань, і не призведе до необхідності залучення додаткових матеріальних витрат. Однією із ключових задач побудови безпроводового зв'язку є достовірна оцінка енергетичних характеристик безпроводового каналу зв'язку.

Набір сучасних телекомунікаційних послуг може поділятися на групи: високошвидкісні транспортні інформаційні послуги та передача інформації «останньої милі» до кінцевих користувачів.

Цілями транспортної мережі є мультиплексування, комутація, маршрутизація потоку інформації через канали зв'язку з достатньою пропускною здатністю.

Послугою «останньої милі» для передачі інформації кінцевим користувачам може бути передача даних, відео в реальному часі та голос. Наявність цих двох ознак, а саме транспортний компонент і компонент доступу до «останньої милі», можна охарактеризувати технологію розвитку мережі як самодостатній для реалізації будь-якої необхідної мережі структура, яка потрібна користувачам.

Дуже зручним та іноді єдиним середовищем для забезпечення доступу до мережі передачі інформації є безпроводове середовище. Мережа передачі часто є безпроводовим середовищем. Особливо популярними є технології на основі стандарту 802.11 які часто називають Wi-Fi [2-4].

WiFi є технологією LAN і передбачає роботу пристроїв у вільному діапазоні 2,4 або 5 ГГц. Найбільший звичайні випуски сьогодні є широко використовуваними стандартами IEEE як 802.11 a/b/g/n/ac/ax [5-6].

Безпроводові локальні мережі передачі інформації (WLAN) розвиваються за останні п'ятнадцять років неймовірно швидко. За пропускною здатністю вони не поступаються виділеним мідним лініям. Завадостійкість, надійність і захищеність сучасних протоколів передачі зробили WLAN явищем повсюдним, а устаткування для них – масовим продуктом. Проте поняття «локальні мережі передачі інформації» досить умовне. Як правило, маються на увазі системи, локалізовані в радіусі сотні метрів. Однак технології локальних мереж з успіхом застосовують і на відстанях до декількох десятків кілометрів.

Традиційна ідея використання WiFi полягає в безпроводовому доступі до мережі LAN, і в той же час технологія WiFi також використовується сьогодні для транспортних ліній передачі (наприклад, радіорелейних) на відстані в десятки кілометрів.

Найсучаснішими стандартами на сьогоднішній день є IEEE 802.11n [5] і IEEE 802.11ac [6]. Відмінними характеристиками цих стандартів є широкосмугові частоти, схеми високої модуляції та висока швидкість передачі (табл. 1).

Таблиця 1

Основні характеристики стандартів IEEE 802.11n та IEEE 802.11ac

	802.11n	802.11ac
Робоча частота, ГГц	2,4 і 5	5
Максимальна швидкість, Гбіт/с	0,6	6,77
Модуляція, максимальна	QAM-64	QAM-256
Смуга частот, МГц	20 або 40	до 160
Кількість просторових потоків	до 4	до 8

2. Схема і топологія зв'язку

Застосування стандартів IEEE 802.11 не обмежується зв'язком на короткій відстані між Ad-hoc пристроями та покриттям послуг через точку доступу AP (Access Point). Стандарти IEEE 802.11 сьогодні також використовуються для побудови магістральних ліній зв'язку (Backbone, CB), що дозволяє побудувати гнучку мережеву архітектуру разом із AP.

Перевага такого підходу виражається в наступних особливостях:

– побудова безпроводових мереж доступу для користувачів в зоні обслуговування, сотні метрів;

–магістральна мережа (Backbone) – зв'язок для підключення віддалених частинах мережі, на десятки кілометрів і більше;

–з'єднання різних частин мережі (точок доступу, маршрутизаторів, магістралі) на основі єдиного і сумісного обладнання;

–можливість швидкого розгортання та налаштування мережі, як для довгострокового, так і для короткострокового використання.

Згадані елементи та характеристики безпроводових мереж дозволяють будувати системи з гнучкою архітектурою, які можуть бути корисні широкому колу користувачів та організацій, як державних, так і корпоративних.

Огляд ринку сучасного обладнання для побудови мереж на базі WiFi, лідерами є такі виробники, як Mikrotik і Ubiquiti [7-8]. Крім того, кожен виробник розробляє пристрої для сумісності зі стандартами IEEE 802.11, і в той же час виготовляє варіанти використання деяких модифікованих власних протоколів в обладнанні. Такі додаткові протоколи пропонують покращені алгоритми передачі (відповідно до певних критеріїв) і зазвичай несумісні з протоколами інших виробників, що добре з точки зору безпеки з певної точки зору.

Для прикладу на рис. 1 наведена схема лабораторної мережі на базі обладнання виробника MikroTik [7] з можливістю реконфігурації залежно від поставленої задачі.

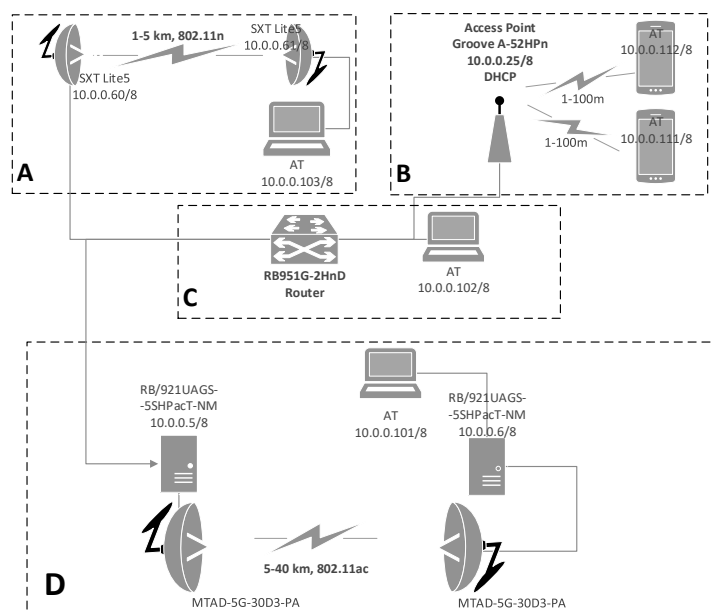


Рис. 1. Структурна схема випробувань обладнання Mikrotik в лабораторних умовах

На рис. 1 показана схему лабораторної мережі та її частин А, В, С, D, де:

А, D – комунікаційні магістралі для зв'язку між віддаленими частинами мережі з високими швидкостями передачі даних (Mikrotik і SXT Lite5 на короткі відстані до 5 км і RB/921UAGS-5SHPaCT-нм на далекі відстані до 40 км);

В – точки доступу для обслуговування клієнтів у зоні покриття (Mikrotik 52HPn для роботи до 100 м);

С – маршрутизатор для виконання функцій комутації потоків, мультиплексування і маршрутизації, а також підключення до інших маршрутизаторів або Інтернет при необхідності (Mikrotik RB951G-2HnD).

Схема мережі (рис.1) є легко масштабованою та простою в налаштуванні. Обладнання Mikrotik є функціональним і простим в налаштуванні. Можна виділити фізичну частину, що називається RouterBoard, і операційну систему, яка називається RouterOS. Пристрої підтримують протоколи стандарту IEEE 802.11 різних модифікацій, що дозволяє будувати мережі з використанням обладнання різних виробників.

3. Тестування магістралі зв'язку для мережі з гнучкою архітектурою

Метою випробувань є вимір характеристик зв'язку в лабораторних умовах при використанні приймально-передавального обладнання RB/921UAGS-5SHPaсT-N в схемі «точка-точка» з імітацією лінії зв'язку на основі атенюаторів з фіксованим ослабленням 40 дБ і додатковим змінним ослабленням рівня сигналу 20-80 дБ.

В табл. 2 представлено характеристики обладнання прийомопередавача RB921UAGS-5SHPaсT-NM.

Таблиця 2

Характеристики обладнання RB921UAGS-5SHPaсT-NM

Вихідна потужність та чутливість	TX/RX для MCS0 33dBm/-96dBm TX/RX для MCS9 27dBm/-71dBm TX/RX для 6Mbit 33dBm/-96dBm TX/RX для 54Mbit 31dBm/-81dBm
Діапазон частот:	4.920 - 6.100 GHz
Ширина каналу:	20/40/80 MHz
Кількість каналів	3
Швидкість передачі даних:	до 1.3 Gbps

Отримані дані можуть бути використані для прогнозування показників якості зв'язку (рівня вхідного сигналу приймача, швидкості передачі) з використанням цифрової карти місцевості і подальшим розгортанням обладнання для високошвидкісної передачі інформації в реальних умовах.

Максимальна досягнута швидкість передачі даних становить 140 Мбіт/с для TCP з імітацією лінії СВ на основі атенюаторів. Тестування здійснювало передачу трафіку TCP і UDP, передачу файлів (через TCP) і передачу трафіку VoIP з очікуваною якістю відео та мови. На рис. 2 наведені результати.

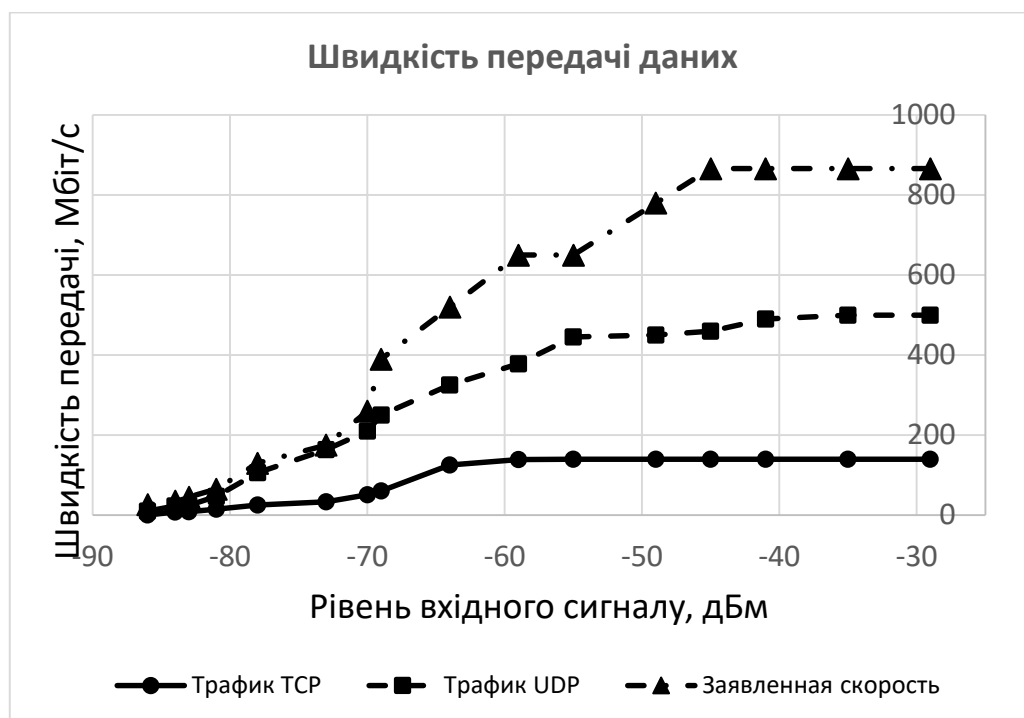


Рис. 2 Результати тестування магістральної лінії з використанням обладнання MikroTik RB/921UAGS-5SHPaсT-NM: TCP, UDP і схеми модуляції та кодування (MCS), використовуючи два просторових канали

Результати попереднього теоретичного розрахунку для реальної лінії СВ довжиною 11,56 км представлені в табл. 3. Розрахунок виконано в інструменті [9].

Згідно з теоретичними оцінками магістральної лінії, сигнал на вході приймача повинен бути на рівні -42.37 дБм, що відповідає TCP трафіку зі швидкістю 140 Мбіт/с, використовуючи два з трьох доступних каналів в обладнанні (обмеження по конструкції антени) згідно з тестами, проведеними в лабораторії.

Таблиця 3

Результати теоретичного розрахунку магістралі

Точка А		Точка В	
Широта	46.292118	Широта	46.375951
Довгота	30.661238	Довгота	30.750293
Рельєф Землі	15.3 m	Рельєф Землі	36.0 m
Висота антени	15.0 m	Висота антени	25.0 m
Радіо система		Втрати	
Потужність сигналу передавача TX	33.01 dBm	Втрати у вільному просторі	129.08 dB
Втрати на лінії TX	3.00 dB	Втрати від впливу перешкод	-2.85 dB
Підсилення антени TX	30.00 dBi	Втрати від впливу лісу	0.00 dB
Підсилення антени RX	30.00 dBi	Міські втрати	0.00 dB
Втрати на лінії RX	0.50 dBm	Статистичні втрати	5.65 dB
RX sensitivity	-96 dBm	Сумарні втрати	131.88 dB
Продуктивність			
Відстань			11.56 km
Точність			10.0 m
Частота			5900.000 GHz
Еквівалентна ізотропно випромінювана потужність			1002.374 W
Підсилення			202.53 dB
Необхідна надійність			70.000 %
Отриманий сигнал			-42.37 dBm
Отриманий сигнал			1703.37 μ V
Запас потужності			70.65 dB

Пристрої MikroTik RB921UAGS-5SHPaT-NM для використання в лініях СВ на відстані 11,56 км були протестовані в реальній лінії СВ для оцінки швидкості передачі даних. Антени MikroTik MTAD-5G-30D3-PA були використані для прийомопередавача MikroTik RB921UAGS-5SHPaT-NM. В табл. 4 показано характеристики антени MTAD-5G-30D3-PA.

Таблиця 4

Характеристики антени MTAD-5G-30D3-PA

Вертикальна ширина променя:	+/-2.5 град
Горизонтальна ширина променя:	+/-2.5 град
Коефіцієнт підсилення:	30 dBi
Перехресна поляризація:	>40 dB
Поляризація:	двухполяризаційна
Робочий діапазон частот:	4.700 - 5.875 GHz
Розміри антени:	70 x 45 см
Ширина полоси частот:	1175 MHz

Профіль досліджуваної траси для оцінки енергетичних характеристик каналу показано на рис. 3. Це повністю відкрита лінія без будь-яких завад на шляху для зон Френеля.

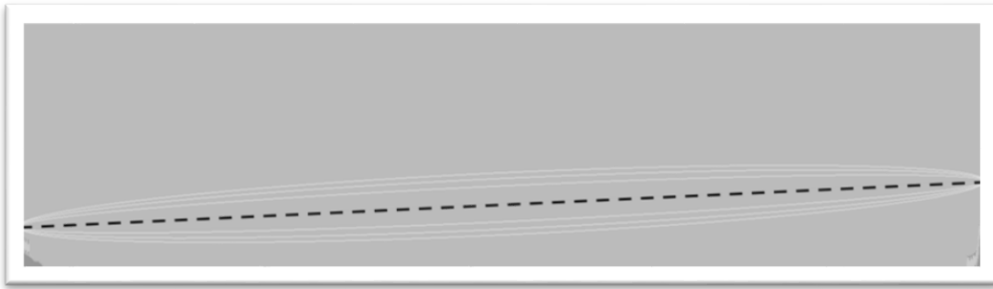


Рис. 3. Профіль магістралі довжиною 11.56 км, прийомопередавачі MikroTik RB921UAGS-5SHPacT-NM були протестовані з антенами MikroTik MTAD-5G-30D3-PA

Схема випробування на реальній магістралі на основі прийомопередавачів MikroTik RB921UAGS-5SHPacT-NM і антен MTAD-5G-30D3-PA показана на рис. 4. За даною схемою буде протестовано в натурних випробуваннях якість надання таких сервісів зв'язку, як швидкість передачі даних TCP, VoIP та відео стрімінгу.

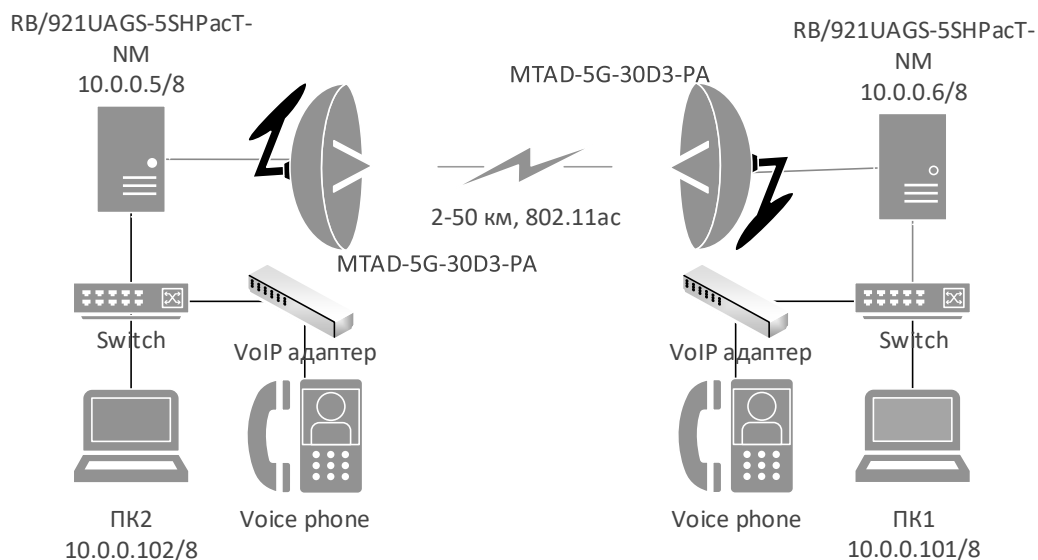


Рис. 4. Структурна схема підключення обладнання для оцінки продуктивності з використанням РПЛ обладнання MikroTik RB/921UAGS-5SHPacT-N та антен MTAD-5G-30D3-PA

Після встановлення обладнання на відповідних точках, його підключення до мережі живлення та юстирування антен, було досягнуто встановлення надійного зв'язку і швидкості передачі даних в магістральній лінії до 133 Мбіт/с в симплексному режимі передачі, і до 60 Мбіт/с в режимі повного дуплексу для TCP трафіку. Рівень сигналу на вході приймача досягав -43 дБм. Слід зазначити, сигнально-кодових конструкції, що використовувались в той час були 866.6Мбіт/с-80МГц/2S/SGI і 780Мбіт/с-80МГц/2S/SGI, які відповідають сигналу на вході приймача -43 дБм і цей результат підтверджує результати випробувань в лабораторії (рис. 2).

Таким чином, отримано результати польових випробувань високошвидкісної магістральної лінії для мережі з гнучкою конфігурацією, які відповідають результатам, наведеним у лабораторних випробуваннях, а також у теоретичній оцінці лінії СВ.

4. Висновки

У роботі розглянуто побудову високошвидкісної бездротової передачі даних з гнучкою

архітектурою на основі стандартів 802.11. Розглянуто основні елементи гнучкої архітектури мережі, такі як маршрутизатори, точки доступу та магістральні канали зв'язку для зв'язку між віддаленими місцями.

Застосування стандартів IEEE 802.11 не обмежене для зв'язку на короткі відстані між Ad-hoc та користувацькими пристроями через точку доступу (AP). Стандарти IEEE 802.11 також використовуються сьогодні для будівництва ліній магістрального зв'язку (CB), на основі яких можливо будувати гнучку мережеву архітектуру разом з точками доступу. Перевага такого підходу виражається в наступних функціях: будівництво точок безпроводового доступу AP для користувачів в зоні обслуговування, сотні метрів; магістральна мережа (backbone) – зв'язок для підключення віддалених частинах мережі, на десятки кілометрів і більше; з'єднання різних елементів мережі (точок доступу, маршрутизаторів, магістралі) на основі єдиного і сумісного обладнання; можливість швидкого розгортання і налаштування мережі, як для довгострокового, так і короткострокового використання. Вказані елементи і характеристики безпроводових мереж дозволяють будувати системи з гнучкою архітектурою, яка може бути корисною для широкого кола користувачів і організацій.

В лабораторних іспитах виміряно характеристики передачі даних з використанням приймачів Mikrotik RB/921UAGS-5SHPasT-N в режимі доступу "точка-точка" з моделюванням втрат в радіолінії на основі атенуаторів. Визначено залежність продуктивності від енергетичних характеристик каналу та виконано порівняння з результатами аналітичного моделювання. Розбіг в оцінці продуктивності – 5%. Максимальна швидкість TCP трафіку досягає 360 Мбіт/с. Вбудовані методи дослідження швидкості обладнання Mikrotik не показують реальної швидкості передачі, так як генерація пакетів та обробка контрольних сум утилізує CPU на 100%. Перевантаження CPU обмежує максимальну швидкість передачі по протоколу TCP до 140 Мбіт/с. При використанні UDP швидкість і досягає 400 Мбіт/с.

Виконані натурні випробування на відстані 11,56 км показали, що отримані енергетичні характеристики каналу відповідають проведеним теоретичним розрахункам, а отримана продуктивність співпадає з результатами, отриманими в лабораторних дослідженнях. Це підтверджує відповідність теоретичних розрахунків і практичних експериментів. Похибка склала 7%. При натурних випробуваннях тестування проводилось на магістралі з прямою видимістю на відстані 11,56 км. При проведенні вимірювань, досягнуто швидкості передачі даних в магістральній лінії до 133 Мбіт/с в симплексному режимі передачі, і до 60 Мбіт/с в режимі повного дуплексу для TCP трафіку. Рівень сигналу на вході приймача досягав -43 дБм. При передачі використовувались сигнально-кодові конструкції 866.6Мбіт/с-80MHz/2S/SGI і 780Мбіт/с-80MHz/2S/SGI, які відповідають сигналу на вході приймача -43 дБм.

Список використаної літератури

1. Seven Communications Technology Trends for 2021 [Internet resource] = ComSoc Technology News (CTN) / ComSoc. - The mode of access: <https://www.comsoc.org/publications/ctn/seven-communications-technology-trends-2021>
2. Matthew G. 802.11ac: A Survival Guide. – O'Reilly Media, 2012. -144p.
3. IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," in IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016) , vol., no., pp.1-4379, 26 Feb. 2021
4. Патент на корисну модель №UA 95365 U (Україна). «Спосіб адаптивного вибору виду багатопозиційної модуляції», Уривський Л.О., Осипчук С.О., Прокопенко К.А. публікація відомостей про видачу патенту: 25.12.2014, випуск № 24.
5. IEEE Standard for Information technology 802.11n: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2012.pdf>

6. IEEE Standard for Information technology 802.11ac: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11ac-2013.pdf>
7. The review of Mikrotik WiFi devices [Internet resource] = MikroTik Routers and Wireless – The access mode: <http://www.mikrotik.com/>.
8. The review of Ubiquiti WiFi devices [Internet resource] = Ubiquiti Wireless networking products - The access mode: <https://www.ubnt.com/>.
9. Онлайн-інструмент для оцінки траси розповсюдження радіохвиль: <http://www.ve2dbe.com/rmonline.html>.

References

1. Seven Communications Technology Trends for 2021 [Internet resource] = ComSoc Technology News (CTN) / ComSoc. - The mode of access: <https://www.comsoc.org/publications/ctn/seven-communications-technology-trends-2021>
2. Matthew G. 802.11ac: A Survival Guide. – O'Reilly Media, 2012. -144p.
3. IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," in IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016) , vol., no., pp.1-4379, 26 Feb. 2021
4. The patent for utility model №UA 95365 U (Ukraine). The method of adaptive selection the signal-code sequence. Uryvsky L.A., Osypchuk S.O., Prokopenko K.A. Publication the information about patent: 25.12.2014, issue № 24.
5. IEEE Standard for Information technology 802.11n: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2012.pdf>
6. IEEE Standard for Information technology 802.11ac: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11ac-2013.pdf>
7. The review of Mikrotik WiFi devices [Internet resource] = MikroTik Routers and Wireless – The access mode: <http://www.mikrotik.com/>.
8. The review of Ubiquiti WiFi devices [Internet resource] = Ubiquiti Wireless networking products - The access mode: <https://www.ubnt.com/>.
9. Web tool for radio link parameters calculation: <http://www.ve2dbe.com/rmonline.html>