

УДК 04.057.4

# ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛЬНО-КОДОВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ WI-FI ДЛЯ ПОБУДОВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ



[Т.М. НАРИТНИК](#), [С.О. ОСИПЧУК](#), [Л.О. УРИВСЬКИЙ](#)

Національний технічний університет України «КПІ»

**Abstract** – Principles of formation of signal-code designs, suggestions for new technical solutions and to select the type of signal structures in order to achieve the best throughput and performance in the communication channel wireless transmission systems, where index is the ratio of signal to noise at the receiver input. Based on the analysis of indicators and criteria recommended in the standards 802.11a / n to select the signal-code constructions proposed index information resource efficiency channel. On the basis of wireless interfaces MikroTik R52n-M testing of lines at a distance of 1.7 km and a defined signal-code structures that were automatically selected software-defined radio systems to transmit information. It was established that the level of the signal at the receiver input, types of signal-code construction and the resulting data rate program-defined radio system using equipment MikroTik R52n-M is fully consistent with the recommendations of standard 802.11a / n. The implementation of the concept of software-defined radio systems based on Wi-Fi technology demonstrated at gigabit transmission system created in the terahertz range 130-134 GHz, which has been tested in the laboratory of achieving speeds of up to 1.2 Gbit / s. It is shown that the potential transfer of such a system can be used in transport distribution networks of the next generation of mobile communications with the provision of appropriate transmission speeds, reliability and security..

**Анотація** – Розглянуто принципи формування сигнально-кодкових конструкцій, запропоновано способи і нові технічні рішення для вибору їх виду. На основі аналізу показників і критеріїв, що рекомендуються в стандартах 802.11a/n для вибору сигнально-кодкових конструкцій, запропоновано показник інформаційної ефективності використання ресурсів каналу зв'язку. На базі безпроводних інтерфейсів MikroTik R52n-M проведено тестування лінії зв'язку на відстані 1,7 км і визначено сигнально-кодкові конструкції, що були автоматично вибрані програмно-визначеними радіосистемами для передачі інформації. Реалізація концепції створення програмно-визначених радіосистем на основі технології Wi-Fi продемонстрована на створеній гігабітній системі передачі в терагерцовому діапазоні 130-134 ГГц, яку протестовано в лабораторних умовах з досягненням швидкості до 1.2 Гбіт/с.

**Аннотация** – Рассмотрены принципы формирования сигнально-кодковых конструкций, предложены способы и новые технические решения для выбора их вида. На основе анализа показателей и критериев, рекомендуемых в стандартах 802.11a/n для выбора сигнально-кодковых конструкций, предложен показатель информационной эффективности использования ресурсов канала связи. На базе беспроводных интерфейсов MikroTik R52n-M проведено тестирование линии связи на расстоянии 1,7 км и определены сигнально-кодковые конструкции, которые были автоматически выбраны программно-определенными радиосистемами для передачи информации. Реализация концепции создания программно-определяемых радиосистем на основе технологии Wi-Fi продемонстрирована на созданной гигабитной системе передачи терагерцового диапазона 130-134 ГГц, протестирована в лабораторных условиях с достижением скорости до 1.2 Гбит / с.

## Вступ

Серед сучасних тенденцій розвитку інфокомунікацій переважають такі напрямки як 5G, когнітивні мережі, біг-дейта, оптичні мережі, грін-комунікації, телекомунікаційні системи терагерцового діапазону, розподільчі транспортні мережі мобільного зв'язку тощо [1-4].

Побудова значної частки пристроїв безпроводового зв'язку в межах цих тенденцій здійснюється на основі концепції SDR – Software-defined radio [5]. Відомими на сьогоднішній день прикладами реалізації концепції SDR є пристрої для мереж GSM, UMTS, Wi-Fi, WiMAX тощо.

Важливо відзначити, що області застосування технології Wi-Fi надзвичайно активно розвиваються, причому пристрої мереж Wi-Fi здатні працювати як в режимі точки доступу для покриття певної зони, так і в режимі ретрансляції сигналів в mesh-мережі. Це дозволяє створювати повноцінні інфокомунікаційні мережі.

## I. Постановка задачі

Задачею будь-якої телекомунікаційної системи є досягнення в рамках виділених ресурсів каналу зв'язку високої швидкості та необхідної достовірності передачі інформації. Одним з відомих засобів реалізації цього завдання є звернення до багатопозиційних видів модуляції та завадостійкого кодування [6]. Комбінацію певного виду багатопозиційної модуляції та завадостійкого кодування із визначеними параметрами завадостійкості називають сигнально-ковою конструкцією (СКК) [7].

Якщо пристрій зв'язку обирає відповідну структуру СКК автоматично за відповідною програмою та алгоритмом, слід вважати такий пристрій відповідним концепції SDR. Опису доцільних для цього критеріїв та алгоритмів і реалізації концепції створення програмно-визначених радіосистем терагерцового діапазону на основі технології Wi-Fi присвячена дана стаття.

## II. Сигнальні та сигнально-ковові конструкції

Сучасні телекомунікаційні системи використовують багато видів сигнальних конструкцій, і при цьому вибір певної сигнальної конструкції має вибиратися заздалегідь для використання, або ж на основі алгоритму для динамічного вибору виду сигнальної конструкції на основі певних критеріїв.

**Актуальною** є задача вибору **оптимальних СКК** для досягнення максимальної швидкості передачі із задоволенням необхідної достовірності передачі у заданому каналі та виділених ресурсах каналу зв'язку. В той же час, актуальним є порівняння оптимальних СКК із рекомендованими в стандартах Wi-Fi та надання оцінки щодо доцільності вибору тієї чи іншої СКК.

Як показав огляд доступних Wi-Fi пристроїв на телекомунікаційному ринку, виробники не розголошують алгоритми і критерії для вибору виду сигнальної конструкції, що реалізовані в пристроях, і тому важко зазначити, наскільки раціональні в цих пристроях способи вибору сигнальної конструкції та наскільки вони ефективні. У зв'язку з цим, пропонуються наступні два способи вибору виду сигнальної конструкції.

**Спосіб 1.** Вибір методу модуляції на передавальній стороні каналу зв'язку (рис.1) здійснюється за фактом максимальної пропускну здатності при використанні певного виду модуляції та відомого значення відношення рівня сигналу до рівня шуму на вході приймальної сторони [8].

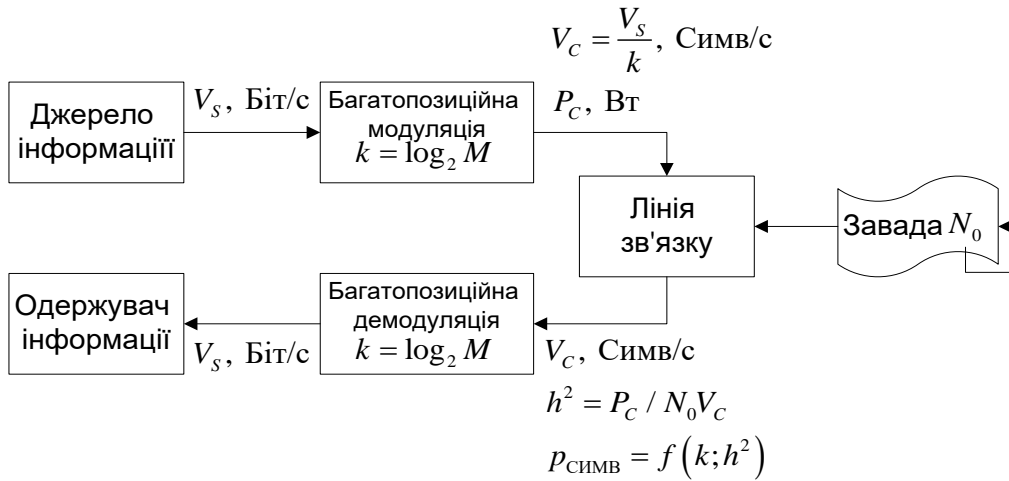


Рис. 1. Функціональна схема каналу зв'язку

Аналітично розраховані значення пропускної здатності каналу зв'язку для різних видів багатопозиційної модуляції показані на рис.2 [8].

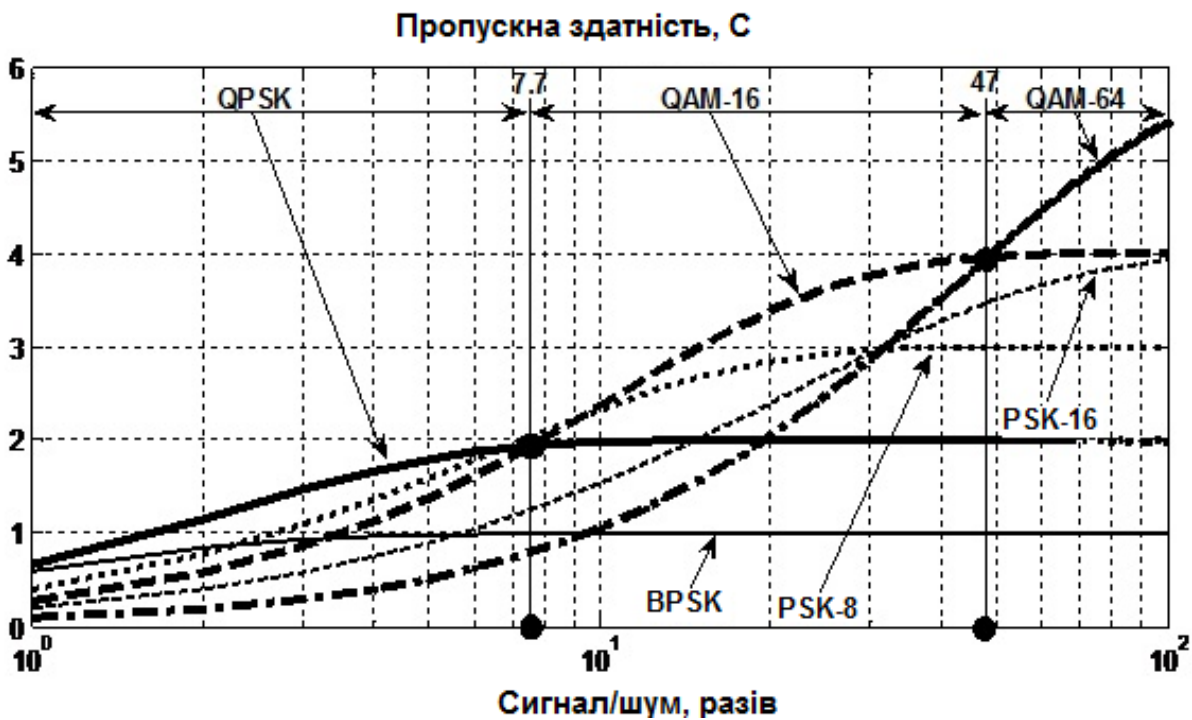


Рис. 2. Залежність пропускної здатності каналу зв'язку від відношення рівня сигналу до рівня шуму для різних видів багатопозиційної модуляції

Згідно з рис.2, виходячи з набору модуляцій BPSK, QPSK, PSK-8, PSK-16, QAM-16, QAM-64, доцільно використовувати наступні види модуляцій за критерієм максимальної пропускної здатності в залежності від відношення рівня енергії сигналу до спектральної потужності шуму в точці прийому (табл. 1):

Таблиця 1. Граничні значення відношення сигнал/шум для вибраних оптимальних видів багатопозиційної модуляції

	Відношення сигнал/шум, $h^2$ , разів	Оптимальний вид багатопозиційної модуляції за критерієм максимальної пропускну здатності
1	$0 < h^2 < 7,7$	QPSK
2	$7,7 < h^2 < 47$	QAM-16
3	$47 < h^2 < 100$	QAM-64

**Спосіб 2.** В основі цього способу вибору виду сигнальної конструкції поставлено задачу, яка передбачає досягнення максимальної продуктивності каналу зв'язку після оцінки значення відношення рівня енергії сигналу до рівня спектральної потужності шуму на вході приймача [9].

Продуктивність каналу зв'язку є інформаційною характеристикою каналу і характеризує питому кількість інформації, яку можна передати по каналу зв'язку за інтервал часу при заданих спектрально-енергетичних характеристиках каналу. Такий спосіб вибору виду модуляції може бути використаний в адаптивній інфокомунікаційній системі, наприклад, при використанні багатопозиційних модуляцій виду QPSK, PSK-8, PSK-16, PSK-32, PSK-64, QAM-16, QAM-64, QAM-128, QAM-256 (рис.3).

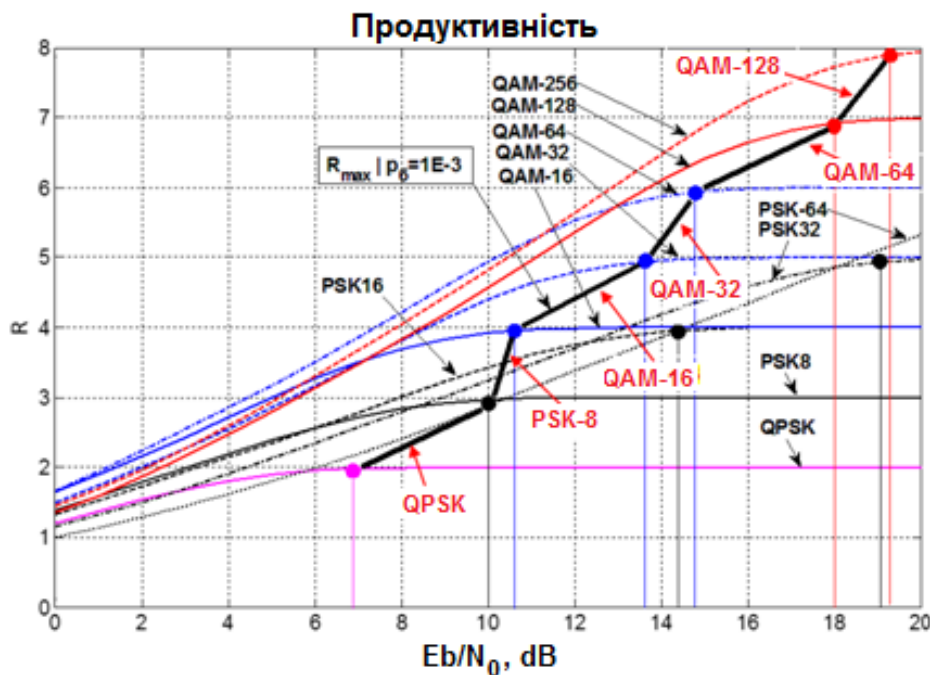


Рис.3. Залежність продуктивності каналу зв'язку від відношення рівня енергії сигналу до спектральної потужності шуму для різних видів багатопозиційної модуляції

Поєднання багатопозиційної маніпуляції з ефективним завадостійким кодуванням дозволяє створювати сигнально-кодові конструкції (СКК), які виступають в якості досконалого інструменту для досягнення основних цілей телекомунікаційних безпроводових систем, які використовують багатопозиційні сигнали (підтримки високої швидкості передачі і забезпечення необхідної завадостійкості) [7].

Завдостійке кодування на основі кодів з низькою щільністю перевірок на парність (LDPC), як засіб підвищення достовірності передачі інформації, є одним з найбільш ефективних і перспективних видів завдостійкого кодування завдяки високій швидкості кодування та декодування за рахунок великої довжини кодового слова при заданих коригуючих властивостях [10-13] (рис.4).

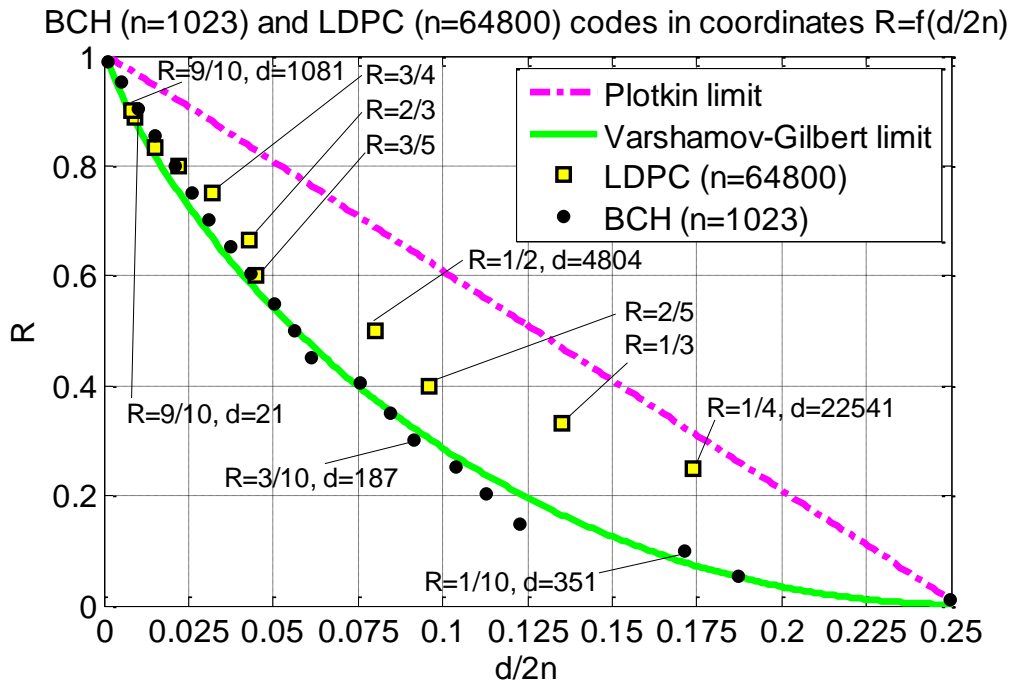


Рис. 4. Положення LDPC кодів і кодів БЧХ в межах потенційного існування завдостійких кодів:  $r_k = f(d/2n)$

Для оцінки ефективності вибору СКК пропонується використовувати шкалу ефективності використання ресурсів каналу зв'язку, де показниками є: енергетична  $\beta$ , частотна  $\gamma$  та інформаційна  $\eta$  (рис.5) ефективність [14]. Дослідження показують, що використання СКК дає значний вигрощ у порівнянні із випадком при використанні модуляції низького рівня без завдостійкого кодування. Також рекомендується використання способу розподілу частотного ресурсу OFDM [7], завдяки якому ефективніше вдається розподіляти доступ до ресурсів каналу зв'язку, а також працювати в умовах багатопробеневого розповсюдження.

Як показує огляд продукції провідних виробників телекомунікаційного обладнання Wi-Fi, наприклад, Mikrotik [15] чи Ubiquity [16], в документації на обладнання не описуються методи адаптивного перемикання видів модуляції та параметрів завдостійкого кодування, а також умови для здійснення такого перемикання видів СКК. Проте існують рекомендації в стандартах 802.11a/b/g/n/ac щодо рівнів сигналу, за яких рекомендується перемикати вид СКК на основі значень потужності сигналу на вході приймача (табл. 2) [17].

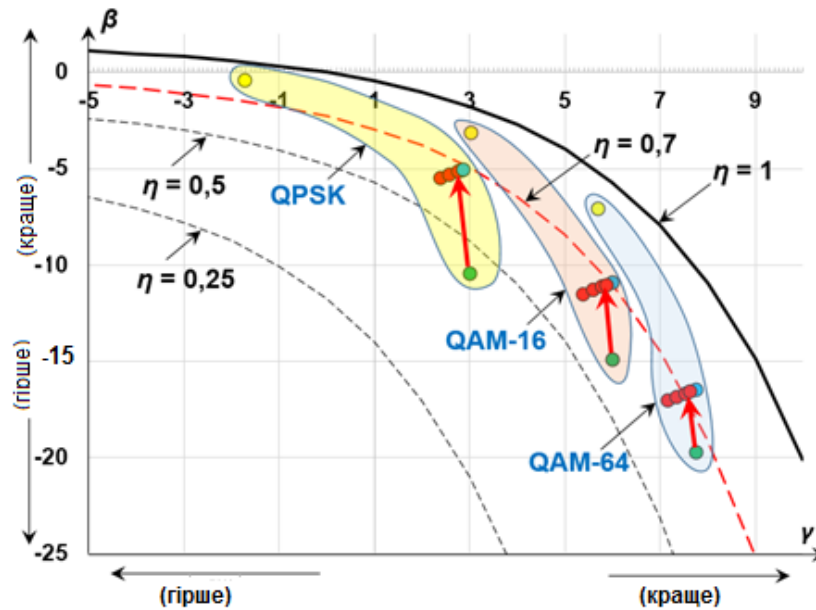


Рис.5. Шкала ефективності використання ресурсів каналу зв'язку

Таблиця 2. Швидкості передачі даних згідно стандарту 802.11n (також відомі як схеми модуляції і кодування, або індекси сигнально-кодових конструкцій MCS), і відповідні рівні чутливості приймача

Індекс сигнально-кодової конструкції MCS	Потоки даних	Модуляція / швидкість кодування	Швидкість передачі даних (Мбіт/с)				Чутливість приймача, дБм	
			Захисний інтервал 800 нс		Захисний інтервал 400 нс		20 МГц    40 МГц	
			20 МГц	40 МГц	20 МГц	40 МГц		
0	1	BPSK/1:2	6,5	13,5	7,2	15,0	-82	-79
1	1	QPSK/1:2	13,0	27,0	14,4	30,0	-79	-76
2	1	QPSK/3:4	19,5	40,5	21,7	45,0	-77	-74
3	1	16-QAM/1:2	26,0	54,0	28,9	60,0	-74	-71
4	1	16-QAM/3:4	39,0	81,0	43,3	90,0	-70	-67
5	1	64-QAM/2:3	52,0	108,0	57,8	120,0	-66	-63
6	1	64-QAM/3:4	58,5	121,5	65,0	135,0	-65	-62
7	1	64-QAM/5:6	65,0	135,0	72,2	150,0	-64	-61
8	2	BPSK/1:2	13,0	27,0	14,4	30,0	-82	-79
9	2	QPSK/1:2	26,0	54,0	28,9	60,0	-79	-76
10	2	QPSK/3:4	39,0	81,0	43,3	90,0	-77	-74
11	2	16-QAM/1:2	52,0	108,0	57,8	120,0	-74	-71
12	2	16-QAM/3:4	78,0	162,0	86,7	180,0	-70	-67
13	2	64-QAM / 2:3	104,0	216,0	115,6	240,0	-66	-63
14	2	64-QAM/3:4	117,0	243,0	130,0	270,0	-65	-62
15	2	64-QAM/5:6	130,0	270,0	144,4	300,0	-64	-61
16	3	BPSK/1:2	19,5	40,5	21,7	45,0	-82	-79
17	3	QPSK/1:2	39,0	81,0	43,3	90,0	-79	-76
18	3	QPSK/3:4	58,5	121,5	65,0	135,0	-77	-74
19	3	16-QAM/1:2	78,0	162,0	86,7	180,0	-74	-71
20	3	16-QAM/3:4	117,0	243,0	130,7	270,0	-70	-67
21	3	64-QAM / 2:3	156,0	324,0	173,3	360,0	-66	-63
22	3	64-QAM / 3:4	175,5	364,5	195,0	405,0	-65	-62
23	3	64-QAM / 5:6	195,0	405,0	216,7	450,0	-64	-61

В той же час, критерій чутливості на вході приймача не завжди є доцільним, оскільки він не враховує значення шуму в каналі і, відповідно, відношення рівня сигналу до рівня шуму. Тому при використанні лише показника рівня сигналу на вході приймача можлива ситуація, коли відношення сигналу до шуму буде малим при значному рівні шуму, що спричинить неможливість передачі при заданому виді СКК. Вибрати більш підходящий вид СКК вдається завдяки можливостям моніторингу якості каналу прийомопередавачем з **SDR**, що в результаті впливає на вибір прийняттого СКК.

Деякі стандарти і виробники рекомендують використовувати показник відношення рівня сигналу до рівня шуму, наприклад, Cisco і 802.11a [18], де вказано, що забезпечення певної швидкості можливе при заданому відношенні рівня сигнал/шум на вході приймача і не гірше, ніж вказано у табл.3:

Таблиця 3. Залежність виду СКК від значень відношення сигнал/шум на вході приймача

Швидкість передачі даних, Мбіт/с	Мінімальний рівень сигналу на вході приймача, дБм	Мінімальне відношення сигнал/шум, дБ
54	-71	25
36	-73	18
24	-77	12
12 або 11	-82	10
6 або 5,5	-89	8
2	-91	6
1	-94	4

Отже, задача вибору оптимальної СКК є надзвичайно важливою, оскільки вона визначає інформаційну швидкість передачі даних із виконанням вимог щодо достовірності передачі, а також ефективність використання виділених ресурсів каналу зв'язку. У свою чергу, якщо виробники обладнання і не описують методи та умови формування СКК, то роблять посилання на стандарти IEEE 802.11, де наведено параметри СКК [19-20].

### III. Приклад реалізації концепції SDR в системі Wi-Fi близької і середньої дії виду «точка-точка»

З аналізу ринку основних виробників обладнання Wi-Fi різного призначення (точка-точка, точка-багатоточка, на різні відстані та з широкими можливостями налаштувань) можна виділити такі як Mikrotik [15] та Ubiquity [16]. В цьому огляді зупинимось на обладнанні фірми Mikrotik, яке вдалося протестувати в лабораторних та просторових умовах.

Наприклад, в документації до пристрою Router Board 52n-M mini PCI Network Adapter виробника Mikrotik вказується, що підтримувана фізична швидкість передачі

даних досягається 300 Мбіт/с, а швидкість передачі для користувача 200 Мбіт/с. Прийомопередавач RouterBOARD R52n-M MiniPCI підтримує провідні стандарти 802.11 a/b/g/n в діапазонах 2ГГц і 5ГГц та набір модуляцій BPSK, QPSK, 16 QAM, 64QAM для піднесучих OFDM.

Очевидно, що вказані значення швидкостей передачі досягаються на модуляції найвищого рівня із згаданих – QAM-64. В той же час вказано, які параметри завадостійкого кодування застосовуються це: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6. Показники та критерій вибору завадостійкого коду не вказуються.



Рис. 6. Фото прийомопередавача RouterBOARD R52n-M

Одночасно наводиться таблиця швидкостей та енергетичних рівнів сигналу для приймача (табл. 4), які забезпечують вказану швидкість передачі. В цей же самий час не розглядається фактор впливу шумів на корисний сигнал та саме відношення рівня сигналу до рівня шуму, яке фактично і має визначати вибір виду багатопозиційної модуляції та вид завадостійкого кодування для підтримки необхідної достовірності передачі.



Таблиця 4. Швидкості передачі та чутливість приймача

Швидкість передачі даних			IEEE специфікація (1Rx дБм)	Типова/Максимальна (2Rx дБм)
Чутливість приймача	802.11a	6M	-82	-95/-91
		9M	-81	-95/-91
		12M	-79	-94/-90
		18M	-77	-92/-88
		24M	-74	-88/-84
		36M	-70	-85/-81
		48M	-66	-81/-77
		54M	-65	-79/-78
	802.11b	1M	-82	-95/-91
		5.5M	-80	-95/-91
		11M	-76	-91/-87
	802.11g	6M	-82	-95/-91
		9M	-81	-95/-91
		12M	-79	-94/-90
		18M	-77	-93/-89
		24M	-74	-90/-86
		36M	-70	-86/-82
		48M	-66	-82/-78
		54M	-65	-80/-76

Завдяки концепції SDR R52n-M може бути конфігурований для роботи в наступних режимах: точки доступу і в режимі точка-точка. Режим точки доступу надає абонентам доступ до ресурсів мережі шляхом встановлення з'єднання з точкою доступу. Для функціонування в режимі з'єднання однорівневих пристроїв використовується режим точка-точка, що дозволяє будувати радіорелейні лінії для з'єднання об'єктів мережі і трансляції інформації на значно більші відстані, аніж в режимі точки доступу.

Основою модуля R52n-M є ПЛІС AR9220 виробника Atheros, що виконує у відповідності із концепцією SDR усі відповідні функції формування і обробки сигналу: OFDM, СКК, підтримуючи швидкості до 130 Mbps в 20 MHz діапазоні, та до 300 Mbps в діапазоні 40 MHz, а також швидкості, визначені стандартами IEEE 802.11a/b/g.

### AR9220 System Block Diagram

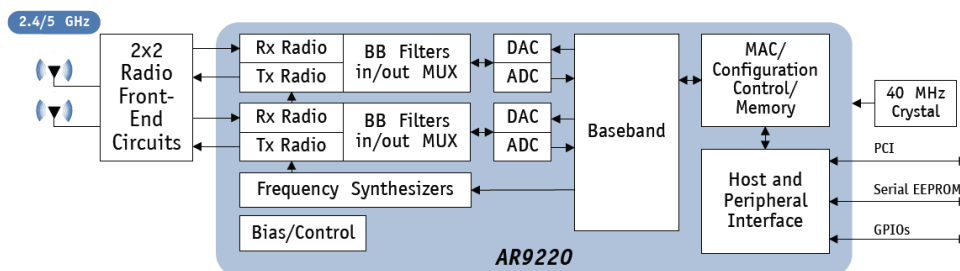


Рис.7. Блокова діаграма ПЛІС AR9220

Програмна складова ПЛІС AR9220 налаштована для роботи зі згортковим кодуванням і швидкостями 1/2, 2/3, чи 3/4. В той же час стандарт 802.11-2012 передбачає швидкості кодування 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, а також завадостійке кодування виду BCC (binary

convolutional code) – бінарний згортковий код, та LDPC (low density parity check) – кодування з низькою щільністю перевірок на парність. Види модуляції – BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM. FEC-кодер кодує дані для виправлення помилок. FEC-кодер може включати в себе двійковий згортковий кодер або кодер LDPC.

Тестування лінії зв'язку проводилось на основі обладнання (MikroTik RouterBOARD SXT lite5 (5nDr2)) – продуктивної точки доступу стандарту 802.11a/n діапазону 5 ГГц. Вбудована антена 16 dBi дозволяє створювати якісний зв'язок з каналною швидкістю до 300 МБіт/с на невеликі відстані. Схема тестування показана на рис.8.

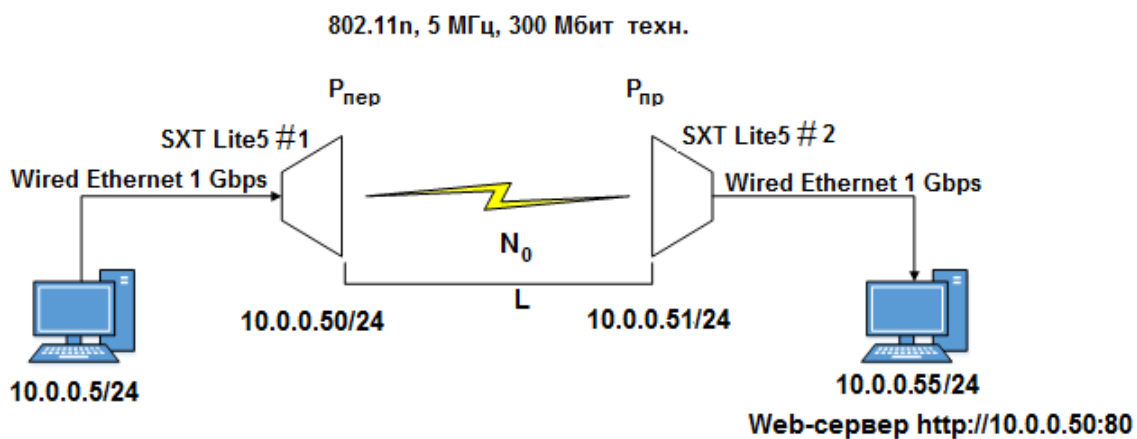


Рис.8. Схема тестування лінії зв'язку

В результаті тестування було досягнуто швидкість 10 Мбіт/с на відстані 1,7 км. При порівнянні отриманих значень швидкості із рекомендаціями стандарту 802.11a, встановлено, що отримана швидкість 10 Мбіт/с при рівні сигналу -85 дБм і відношенні рівня сигналу до рівня шуму на вході приймача 25 дБ цілком відповідає рекомендованим значенням у стандарті.

#### IV. Приклад реалізації концепції SDR у телекомунікаційній системі терагерцового діапазону на основі технології Wi-Fi

З метою реалізації концепції SDR у телекомунікаційній системі терагерцового діапазону на основі технології Wi-Fi створений гігабітний модем G1, який може бути використаний для з'єднання територіально рознесених сегментів мереж Ethernet 10/100/1000-BaseTx [21-22]. Функціональна схема гігабітного модему G1 представлена на рис. 10.

Основні складові гігабітного модему (рис. 10) – каналні маршрутизатори 1 і 2, а також груповий маршрутизатор. Вхідний потік автоматично розподіляється на всі канали і далі обробляється для формування радіочастотного спектра в смузі пропускання радіорелейного каналу.

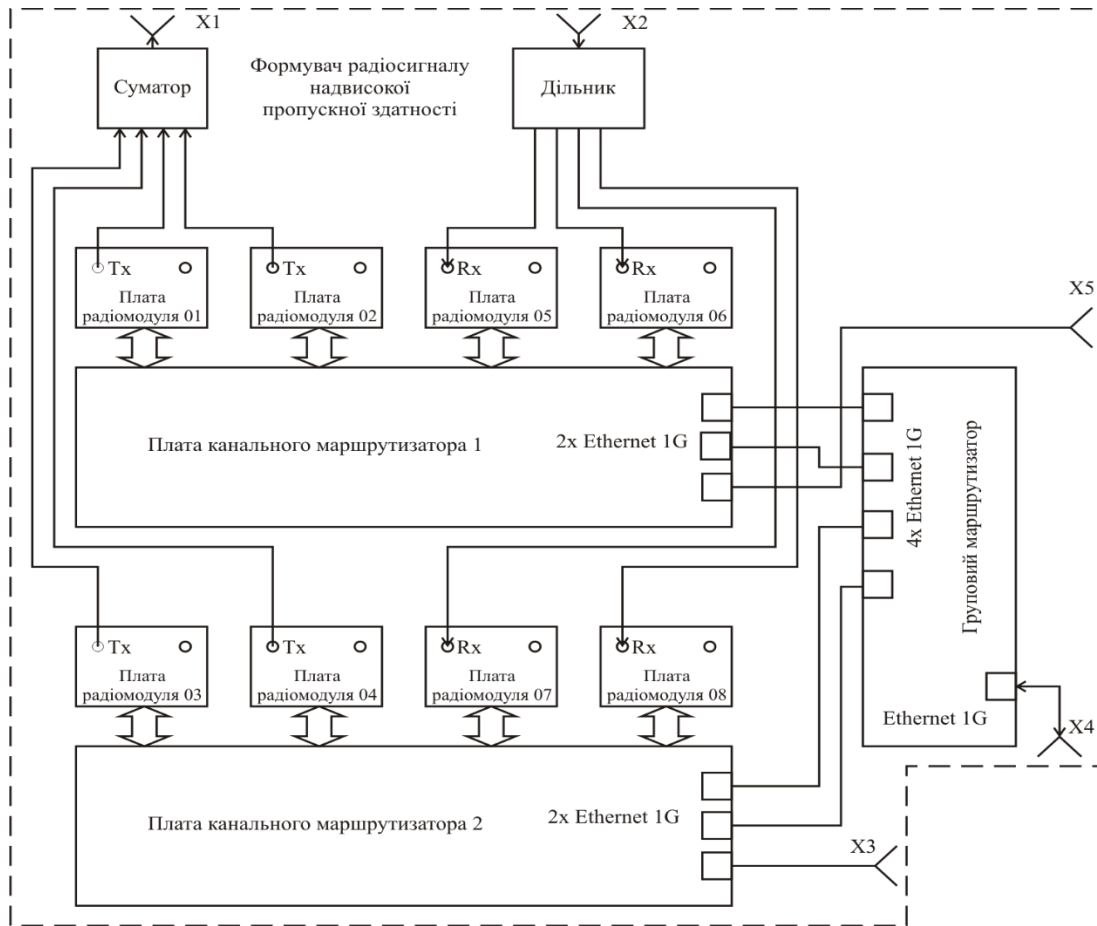


Рис. 10. Функціональна схема гігабітного модему

Гігабітний модем G1 (рис. 11), виконаний у металевому корпусі, дозволяє встановлювати його в стійку RackMount або використовувати настільне розташування.

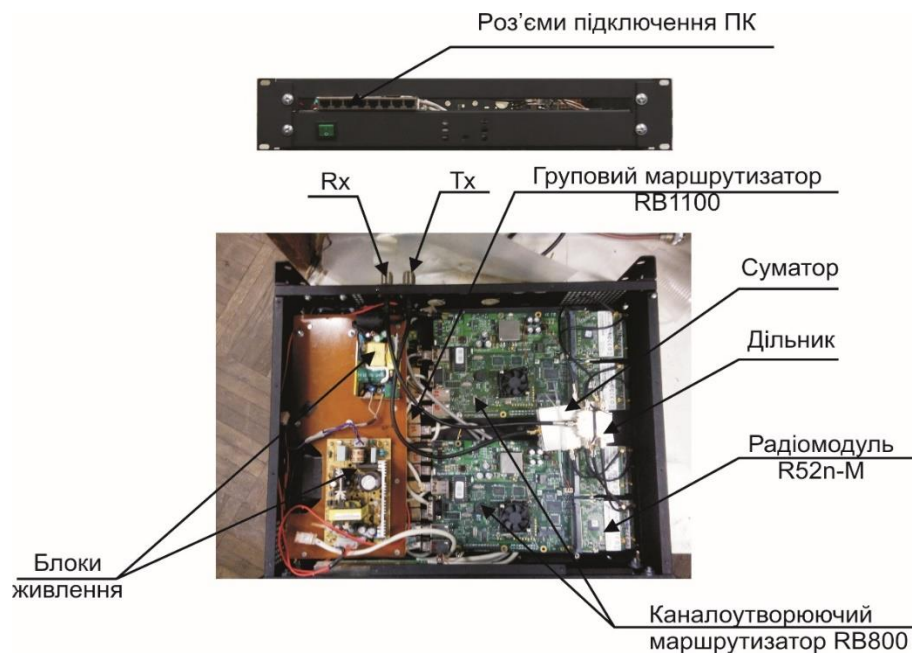


Рис 11. Фото лабораторного зразка гігабітного модему G1

Основні технічні характеристики модему наведені в табл. 6.

Таблиця 6. Загальні технічні характеристики гігабітного модему

Найменування	Значення
Напруга живлення, В	220
Інтерфейс управління режимами модуляції-демодуляції	Ethernet 10/100 Base-Tx, разъем RJ-45
Інтерфейс управління маршрутизатором	Ethernet 10/100/1000 Base-T, разъем RJ-45
Інтерфейс даних	Ethernet 10/100/1000 Base-T, разъем RJ-45
Інтерфейс тракту ПЧ	Коаксіальний, тракт 50 Ом, Раз'єми N-type
Центральна частота тракту ПЧ, МГц	2400
Ширина смуги частот, займана модульованим сигналом в режимі максимальної пропускної спроможності, МГц, не більше	40
Вид модуляції	QAM-64
Потужність сигналу ПЧ на виході модулятора, дБм	0 ... -3
Чутливість по входу ПЧ демодулятора, дБм	-70
Максимально допустимий рівень сигналу ПЧ на вході демодулятора, дБм, не більше	-45
Маса модему, кг, не більше	4

Результати тестування швидкісних характеристик гігабітного модему G1 наведені в табл. 7.

Таблиця 7. Результати тестування швидкісних характеристик гігабітного модему G1

Відповідний маршрутизатор	Кількість каналів dual nstreme	Режим дуплекса	Канальна швидкість в одному напрямі (Мбіт/с)	Загальна канальна швидкість в двох напрямках (Мбіт/с)	Практична швидкість прийому/передачі (Мбіт/с)	Загальна практична швидкість (Мбіт/с)
rb450g	1	RX	150		116	
rb450g	1	TX	150		116	
rb450g	1	FD	150	300	85	170
rb450g	2	FD	300	600	155	310
rb750	2	FD	300	600	155	310
rb750	2	HD	300		195	
rb450g	2	RX	300		215	
rb450g	2	TX	300		225	
rb450g	4	FD	600	1200	335	670
rb750	4	FD	600	1200	335	670
rb450g	4	HD	600		415	
rb750	4	HD	600		370	

Управління кожним з двох каналних маршрутизаторів здійснюється за допомогою утиліти Winbox – роз'єми X3, X5 "CONTROL MODEM" (рис. 10). Також можливе тестування швидкості передачі інформації за допомогою утиліти Winbox (рис. 12).

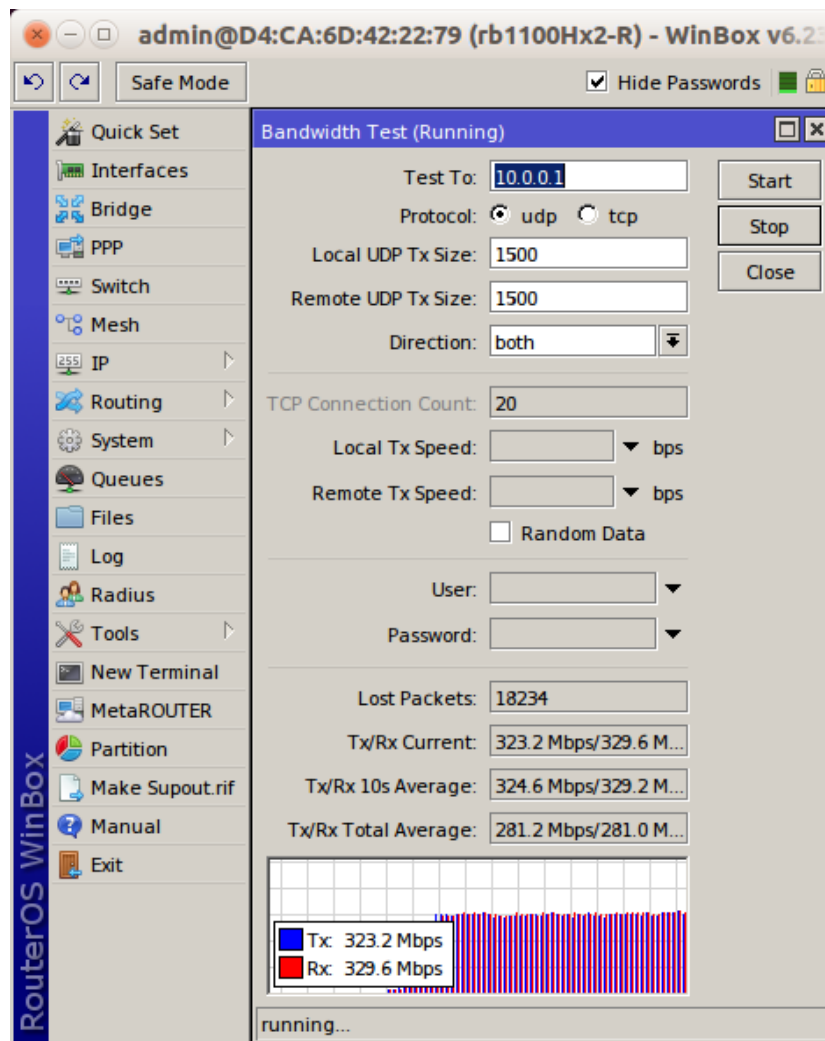


Рис. 12. Результат тестування швидкості 4-х каналного дуплексного каналу зв'язку

Сигнал проміжної частоти каналних маршрутизаторів надходить на вихід через роз'єм X1 (рис. 10). Вихід сигналу проміжної частоти каналних маршрутизаторів – роз'єм X1 (тип «N») з'єднується безпосередньо із входом проміжної частоти передавального блоку терагерцового діапазону. Аналогічно налаштований тракт входу сигналу проміжної частоти від приймального блоку терагерцового діапазону (роз'єм X2). Для з'єднання з мережею Ethernet, а також керуванням груповим маршрутизатором використовувався як прямий, так і перехресний UTP кабель-роз'єм X4. Для забезпечення каналної швидкості 1,2 Гбіт/с в радіорелейній лінії терагерцового діапазону [23] використано 8 прийомо-передавачів Wi-Fi стандарту 802.11n в діапазоні 2,1-2,7 ГГц в смузі по 40 МГц кожен, що мають каналну швидкість до 150 Мбіт/с (рис. 13, 14).

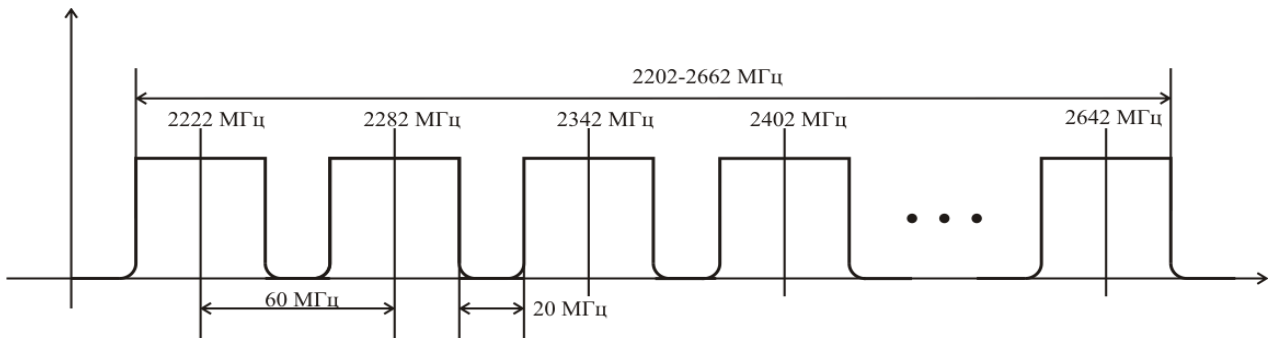


Рис. 13. Частотний план гігабітного модему

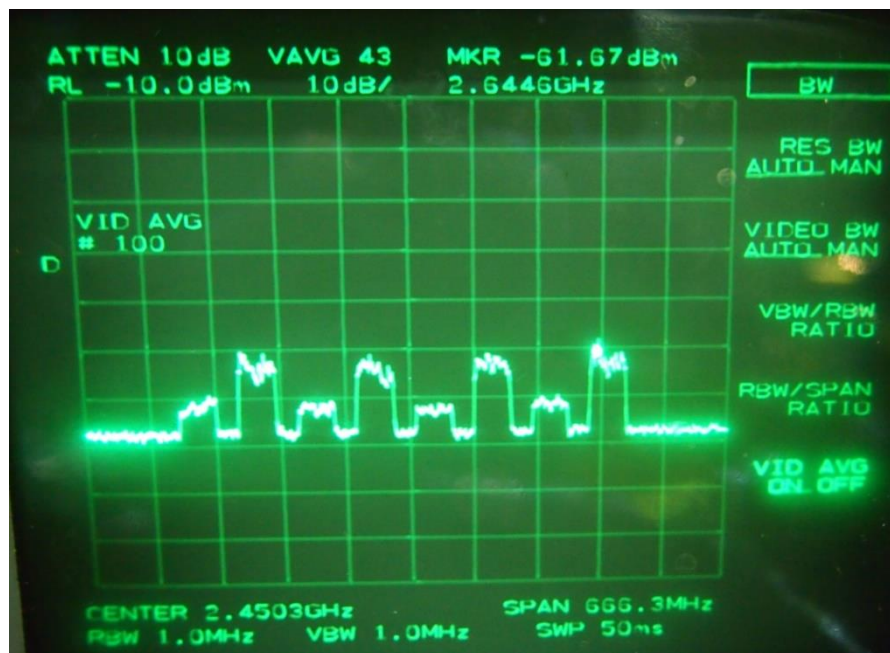


Рис. 14. Амплітудно-частотна характеристика 4-х каналного дуплексного каналу зв'язку

В модемі застосовується режим «dual nstream» на обладнанні Mikrotik, що використовує для створення одного дуплексного радіоканалу два приймачі R52n-M: один на прийом, інший на передачу. Для досягнення сумарної каналної швидкості 1,2 Гбіт/с пропонується чотири дуплексних канали по 150 Мбіт/с у кожному напрямку. При формуванні dual nstream каналів, що необхідно для організації дуплексних каналів та підвищення ефективності кожного каналу, використовуються маршрутизатори Mikrotik RB800 з чотирма mini-PCI слотами із встановленими прийомопередавачами Mikrotik R52n-M. Доступ до кожного радіоканалу забезпечується окремим інтерфейсом Ethernet маршрутизатора RB800.

Для об'єднання всіх каналів використовується маршрутизатор Mikrotik RB1100Hx2, який надає єдиний інтерфейс для зовнішнього підключення. Дана конфігурація модему забезпечує високу продуктивність і заявлені характеристики, маючи при цьому відносно низьку вартість побудови гігабітного модему. Також є можливим збільшення каналної швидкості гігабітного модему до 1,2 Гбіт/с у кожному напрямку

у разі подвоєння кількості комплектів маршрутизаторів RB800 і прийомопередавачів Mikrotik R52n-M [24].

Для видачі назовні агрегованого каналу з швидкістю 600 МБіт/с необхідно замінити груповий маршрутизатор RB750 на маршрутизатор з пропускнуою здатністю в 1 ГБіт/с і більше, наприклад RB 450G або RB1100Hx2, що передбачено конструкцією модему .

На основі гігабітного модему G1 із встановленими прийомопередавачами Mikrotik R52n-M та розробленого передавального та приймального трактів [25] з використанням технології Wi-Fi запропоновано гігабітну телекомунікаційну систему на основі технології Wi-Fi в діапазоні 130-134 ГГц, яку протестовано в лабораторних умовах з досягненням каналної швидкості до 1,2 ГБіт/с.

## Висновки

1. Розглянуто принципи формування сигнально-кодкових конструкцій (СКК) для сучасних інфокомунікаційних систем. Запропоновано способи і нові технічні рішення для вибору виду сигнальної конструкції з метою досягнення найкращої пропускнуої здатності та продуктивності в каналі зв'язку безпроводових систем передачі, де показником є відношення рівня сигналу до рівня шуму на вході приймача.

2. Показано вигоди у використанні ресурсів каналу зв'язку при використанні СКК на основі сигнальних конструкцій високого порядку та ефективних блокових завадостійких кодів LDPC. Розглянуто СКК та показники і критерії, що рекомендуються в стандартах 802.11a/n для вибору СКК, а саме – рівень сигналу на вході приймача. Запропоновано показник ефективності використання ресурсів для вибору СКК, а саме – інформаційної ефективності, що показує ефективність використання таких ресурсів каналу зв'язку як енергетичний, частотний та часовий.

3. Проведено тестування радіолінії зв'язку протяжністю 1,7 км на основі обладнання MikroTik і визначено СКК, що були автоматично вибрані SDR для передачі інформації між прийомо-передавачами. Визначено, що за рівнем сигналу на вході приймача, видами СКК та отриманої швидкості передачі даних ПВР в обладнанні MikroTik повністю відповідає рекомендаціям стандартів 802.11a/n.

4. Прикладом технічного рішення, яке розкриває значний потенціал протоколу 802.11n, є запропонована телекомунікаційна система терагерцового діапазону. Завдяки переходу в терагерцовий діапазон від 100 ГГц і вище, стало можливим використовувати широку смугу частот для передачі інформації порядку сотень МГц та ГГц, а в результаті – досягати надвисоких швидкостей передачі. На основі обладнання MikroTik запропоновано гігабітну телекомунікаційну систему на основі технології Wi-Fi в діапазоні 130-134 ГГц та протестовано в лабораторних умовах з досягненням каналної швидкості до 1,2 ГБіт/с. Показано, що запропонована телекомунікаційна система, яка реалізує концепцію створення програмно-визначених радіосистем на основі технології Wi-Fi, може високопродуктивно використовуватися в транспортних розпо-

дільчих мережах мобільного зв'язку наступного покоління із забезпеченням відповідних швидкостей передачі, надійності та захищеності.

### Список літератури:

1. Кравчук С.О., Наритник Т.М. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону. Монографія. – Житомир : ФОП «Євенок О.О.», 2015. – 208 с.
2. Ільченко М.Ю. Основи теорії телекомунікацій; навч. посібник; за заг. ред. М. Ю. Ільченка. – К. : ІСЗЗІ НТУУ «КПІ», 2010. – 788 с.
3. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Сучасні телекомунікаційні системи. – К. : Наук. думка, 2008. – 328 с.
4. Тенденції в телекомунікаціях 2015 [Електронний ресурс] = Special issue: ten trends tell where communication technologies are headed // ComSoc. – Режим доступу: <http://www.comsoc.org/ctn/ieee-comsoc-ctn-special-issue-ten-trends-tell-where-communication-technologies-are-headed-2015>.
5. Hsin-Hung Cho, Chin-Feng Lai, Timothy K. Shin, Han-Chieh Chao. Integration of SDR and SDN for 5G. – IEEE Access: the journal of rapid open access publishing. Spectral section on 5G Wireless Technologies: Perspectives of the Next Generation Mobile Communications and Networking. – 2014. – Vol. 2. – P. 1196-1204.
6. Галлагер Р. Коды с малой плотностью проверок на четность. – М. : «Мир», 1966. – 144 с.
7. Уривський Л. А., Осипчук С.А. Синтез сигнально-кодовых конструкций для OFDM сигналов в канале с постоянными параметрами // Научно-виробничий збірник «Наукові записки УНДІЗ». – 2014. – № 4 (32). – С. 41-48.
8. Патент на корисну модель №UA 94019 U (Україна). Спосіб адаптивного вибору виду багатопозиційної модуляції / Уривський Л.О., Осипчук С.О., Прокопенко К.А. Публікація відомостей про видачу патенту: 27.10.2014, Бюл. № 20.
9. 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, Бюл. № 24.
10. MacKay D. Good error-correcting codes based on very sparse matrices // IEEE Trans. Inf. Theory. – 1999. – Vol. 45, No. 2. – P. 339-431.
11. Ohtsuki T. LDPC codes in communications and broadcasting // IEIC Trans. Commun. – 2007. – Vol. 90-B, No. 3. – P. 440-453.
12. Uryvsky L., Osypchuk S. Comparative analysis of LDPC and BCH codes error-correcting capabilities // Information and Telecommunication Sciences. – 2014. – Vol. 5, No 1. – P. 5-9.
13. Uryvsky L., Osypchuk S. Analysis of corrective properties of ultra-long LDPC codes // Telecommunication Sciences. – 2013. – Vol. 4, No 1. – P. 21-26.
14. Уривський Л.О., Мошинська А.В., Прокопенко К.А. Модифікована методика оцінки ефективності систем передавання інформації на основі показників Зюко А.Г. – К. : Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2010. – № 6(74). – С. 24-29.
15. Огляд обладнання Mikrotik [Електронний ресурс] = MikroTik Routers and Wireless – Режим доступу: <http://www.mikrotik.com/>.
16. Огляд обладнання Ubiquiti Networks [Електронний ресурс] = Ubiquiti Wireless networking products – Режим доступу: <https://www.ubnt.com/>.
17. Залежність виду СКК від значень енергетичних рівнів в точці приймання сигналів [Електронний ресурс] = Coverage or Capacity – making the best use of 802.11n / Juniper Networks.



– Режим доступу: [http://www.webtorials.com/main/resource/papers/juniper/paper16/11n\\_Coverage\\_vs\\_Capacity.pdf](http://www.webtorials.com/main/resource/papers/juniper/paper16/11n_Coverage_vs_Capacity.pdf).

18.Рекомендовані значення відношення сигналу до шуму в різних середовищах [Електронний ресурс] = Recommended or minimum Single-to-Noise ratio for different environments / Cisco Systems. – Режим доступу: <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/wireless-mobility/wireless-lan-wlan/68666-wireless-site-survey-faq.html>

19.IEEE 802.11 Task Group a, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band, 1999.

20.IEEE 802.11n-2009 – Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput". IEEE-SA. 29 October 2009.

21.Патент на корисну модель №84923 (Україна). Приймально-передавальний формувач інформаційного потоку для каналу зв'язку із підвищеною спектральною ефективністю та пропускною здатністю / Ільченко М.Ю., Наритник Т.М., Казіміренко В.Я., Войтенко О.Г., Радзіховський В.В., Свириденко В.В. – опубл. 11.11.2013 р. Бюл. №.21.

22.Ільченко М.Ю., Наритник Т.Н., Войтенко А.Г., Казимиренко В.Я., Волков В.В. Приймально-передавальний формувач інформаційного потоку для каналу зв'язку з підвищеною спектральною ефективністю і пропускною здатністю // Матеріали Сьомої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій» (ПТ-13) – К. : НТУУ «КПІ», 2013. – С. 16.

23.Наритник Т.Н. Исследования формирователя цифрового потока для телекоммуникационных систем терагерцового диапазона. // Сборник научных трудов первой Международной научно-практической конференции «Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии». – Харьков, 9-11 октября 2013. – С. 23-26.

24.Наритник Т.Н., Ільченко М.Е., Войтенко А.Г., Дидковський А.В., Алієв М.Я., Волков В.В. Исследования формирователя информационного потока для канала связи с повышенной пропускной способностью // Матеріали Восьмої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій». – К.:НТУУ «КПІ», 2014. – С. 310-312.

25.Ilchenko M.Ye., Narytnyk T.M., Radzikhovsky B.M., Kuzmin S.E., Lutchak O.V. Development of the Transmitting and Receiving Channels for Terahertz Band Relay Systems // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – Vol. 74, No 11. – P. 981-998.