

**РЕАЛІЗАЦІЯ КОНЦЕПЦІЇ СТВОРЕННЯ
ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧЕНИХ РАДІОСИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО
ДІАПАЗОНУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ WI-FI**

Наритник Т.М., Лутчак О.В., Осипчук С.О., Уривський Л.О.

*Національний технічний університет України «КПІ», Київ, Україна
Київ, пров. Індустріальний, 2, 03056*

director@mitris.com

**РЕАЛИЗАЦИЯ КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ
ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЁННЫХ РАДИОСИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО
ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ WI-FI**

Нарытник Т.Н., Лутчак А.В., Осипчук С.А., Урывский Л.А.

*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев, Украина
Киев, пер. Индустриальный, 2, 03056*

director@mitris.com

**THE IMPLEMENTATION CONCEPT OF
SOFTWARE-DEFINED RADIO SYSTEMS IN TERAHERTZ BAND
BASED ON WIFI TECHNOLOGY**

Narytnik T., Lutchak O., Osypchuk S., Uryvsky L.

*National Technical University of Ukraine "KPI", Kiev, Ukraine
Kiev, Industrialny lane, 2, 03056*

director@mitris.com

Анотація. В роботі розглянуто принципи формування сигнально-кової конструкції, запропоновано способи і нові технічні рішення для вибору виду сигнальної конструкції з метою досягнення найкращої пропускної здатності та ефективності каналу зв'язку безпроводної системи передачі, де показником є відношення рівня сигналу до рівня шуму на вході приймача. На основі аналізу показників і критеріїв, що їх рекомендовано в стандартах 802.11a/n для вибору сигнально-кодових конструкцій, запропоновано показник інформаційної ефективності застосування ресурсів каналу зв'язку.

На базі безпроводних інтерфейсів MikroTik R52n-M проведено тестування лінії зв'язку на відстані 1,7 км і визначено сигнально-кодові конструкції, які були автоматично вибрані програмно-визначуваними радіосистемами для передавання інформації. Встановлено, що за рівнем сигналу на вході приймача, видами сигнально-кової конструкції та отриманої швидкості передавання даних програмно-визначена радіосистема з застосуванням обладнання MikroTik R52n-M повністю відповідає рекомендаціям стандартів 802.11a/n.

Реалізація концепції створення програмно-визначених радіосистем на основі технології Wi-Fi продемонстрована на створеній гігабітній системі передавання в терагерцовому діапазоні 130–134 ГГц, яку протестовано в лабораторних умовах з досягненням швидкості до 1.2 Гбіт/с. Показано, що потенційно таку систему передавання можна застосовувати в транспортних розподільних мережах мобільного зв'язку наступного покоління із забезпеченням відповідних швидкостей передавання, надійності та захищеності.

Ключові слова: сигнально-кодові конструкції, пропускна здатність, канал зв'язку, терагерцовий діапазон, технологія Wi-Fi, програмно-визначувана радіосистема, інформаційна ефективність, безпроводові системи передавання, стандарти 802.11a/n.

Аннотация. В работе рассмотрены принципы формирования сигнально-кової конструкции, предложены способы и новые технические решения для выбора вида сигнальной конструкции с целью достижения наилучшей пропускной способности и эффективности канала связи беспроводной системы передачи, где показателем является отношение уровня сигнала к уровню шума на входе

приёмника. На основе анализа показателей и критериев, рекомендуемых в стандартах 802.11a/n для выбора сигнально-кодовых 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-кодовые конструкции, которые были автоматически выбраны программно-определяемыми радиосистемами для передачи информации. Установлено, что по уровню сигнала на входе приёмника, видам сигнально-кодовой конструкции и полученной скорости передачи данных программно-определённая радиосистема с использованием оборудования MikroTik R52n-M полностью соответствует рекомендациям стандартов 802.11a / n.

Реализация концепции создания программно-определяемых радиосистем на основе технологии Wi-Fi продемонстрирована на созданной гигабитной системе передачи в терагерцовом диапазоне 130–134 ГГц, протестирована в лабораторных условиях с достижением скорости до 1,2 Гбит/с. Показано, что потенциально такая система передачи может использоваться в транспортных распределительных сетях мобильной связи следующего поколения с обеспечением соответствующих скоростей передачи, надёжности и защищённости.

Ключевые слова: сигнально-кодовые конструкции, пропускная способность, канал связи, терагерцовый диапазон, технология Wi-Fi, программно-определённая радиосистема, информационная эффективность, беспроводные системы передачи, стандарты 802.11a/n.

Abstract. Principles of signal-code sequence (SCS) are examined. New methods and technical solutions are proposed to select the type of signal structures in order to achieve the best throughput and performance in wireless communication channel. The information efficiency criterion for channel resources usage is proposed based on the analysis of indicators and criteria that are recommended in the standard 802.11a/n to select specific SCS.

Testing radio link on length 1.7 km based on a wireless interface MikroTik R52n-M is performed; the SCSs automatically selected by software defined radio (SDR) systems for data transmission are identified, and compared with SCS recommendations in standards 802.11 a/n. The telecommunication system based on Wi-Fi technology in a range of 130–134 GHz is developed, and tested in the laboratory with achieving data rates up to 1.2 Gbps.

Key words: Wi-Fi, signal-code sequence (SCS), communication channel bandwidth, terahertz range, Wi-Fi technology, software defined radio (SDR) system, informational efficiency, wireless transmission system, infocommunications, standards 802.11a/n.

ВСТУП

Серед сучасних тенденцій розвитку інфокомунікацій переважають такі напрями, як 5G, когнітивні мережі, біг-дейта, оптичні мережі, грін-комунікації, телекомунікаційні системи терагерцового діапазону, розподільні 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, Wi-MAX 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.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задачею будь-якої телекомунікаційної системи є досягнення, в рамках виділених ресурсів каналу зв'язку, високої швидкості та необхідної достовірності передавання інформації. Одним з відомих засобів розв'язання 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 вибирає 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.

СИГНАЛЬНІ ТА СИГНАЛЬНО-КОДОВІ КОНСТРУКЦІЇ

Сучасні телекомунікаційні системи застосовують багато видів сигнальних конструкцій, і при цьому вибір певної сигнальної конструкції повинен вибиратися заздалегідь для застосування 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 передавання із задоволенням необхідної достовірності передавання у заданому каналі та виділених ресурсах каналу зв'язку. В той самий час, актуальним є порівняння оптимальних СКК із рекомендованими у стандартах Wi-Fi та надання оцінки щодо доречності вибору тієї або 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 пропускної здатності при застосуванні певного виду модуляції та відомого значення відношення рівня сигналу до рівня шуму на вході приймальної сторони [8].

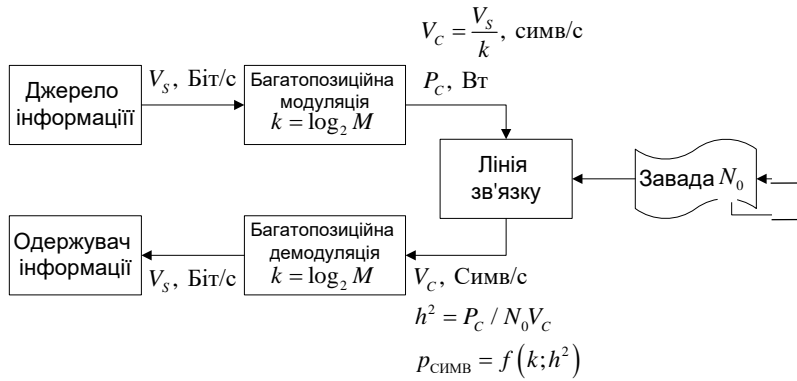


Рисунок 1 – Функційна схема каналу зв'язку

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

Згідно з рис. 2, виходячи з набору методів модуляції BPSK, QPSK, PSK-8, PSK-16, QAM-16, QAM-64, доцільно застосовувати види модуляції за критерієм максимальної пропускної здатності в залежності від відношення рівня енергії сигналу до спектральної потужності шуму в точці приймання, зазначені в табл. 1.

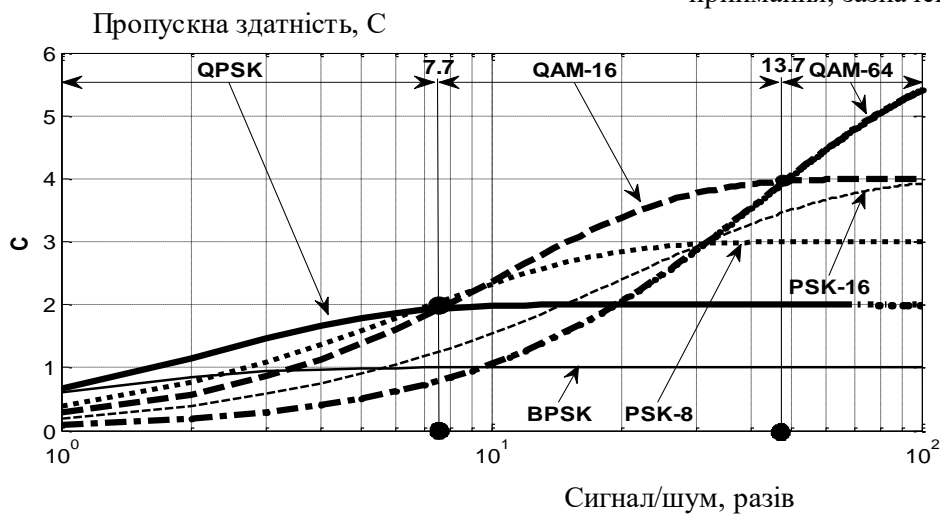


Рисунок 2 – Залежність пропускної здатності каналу зв'язку від відношення рівня сигналу до рівня шуму для різних видів багатопозиційної модуляції

Таблиця 1 – Граничні значення відношення сигнал/шум для вибраних оптимальних типів багатопозиційної модуляції

	Відношення сигнал/шум, h^2 , разів	Оптимальний вид багатопозиційної модуляції за критерієм максимальної пропускної 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 пропускної здатності каналу зв'язку після оцінки значення відношення рівня енергії сигналу до рівня спектральної потужності шуму на вході приймача [9].

Пропускна здатність 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 типу модуляції може бути застосований в адаптивній інфокомунікаційній системі, наприклад, при застосуванні методів багатопозиційної модуляції типу QPSK, PSK-8, PSK-16, PSK-32, PSK-64, QAM-16, QAM-64, QAM-128, QAM-256 (рис. 3).

Поєднання багатопозиційної маніпуляції з ефективним завадостійким кодуванням дозволяє створювати сигнально-кодові конструкції (СКК), які є досконалим інструментом для досягнення основних цілей телекомунікаційних безпроводових систем, в яких застосовують багатопозиційні сигнали: підтримки високої швидкості передачі і забезпечення необхідної завадостійкості [7].

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

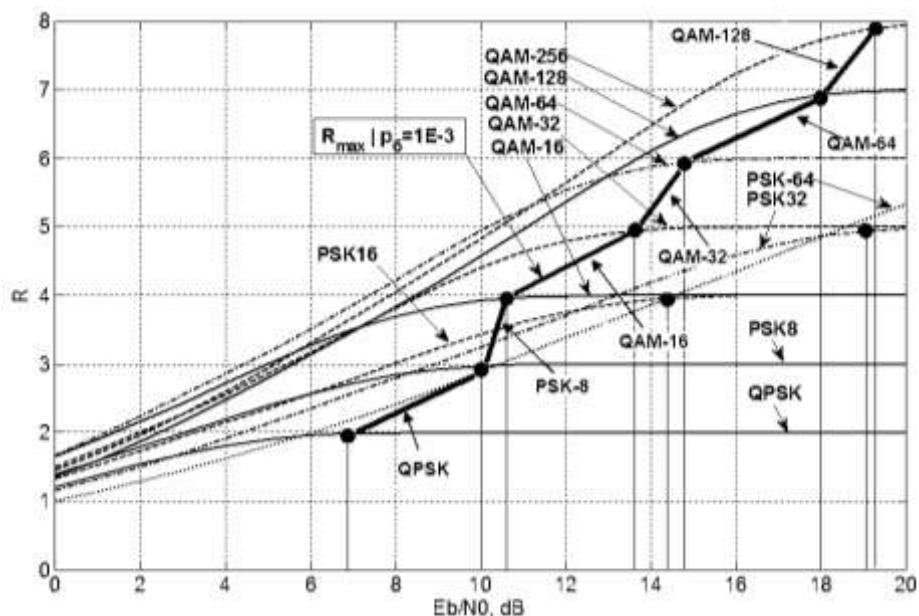


Рисунок 3 – Залежність пропускної здатності каналу зв'язку від відношення рівня енергії сигналу до спектральної потужності шуму для різних видів багатопозиційної модуляції

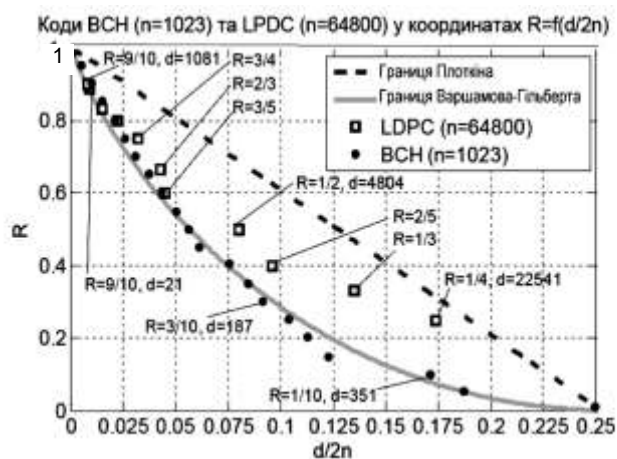


Рисунок 4 – Положення LDPC кодів і кодів БЧХ у межах потенційного існування завадостійких кодів: $r_k = f(d/2n)$

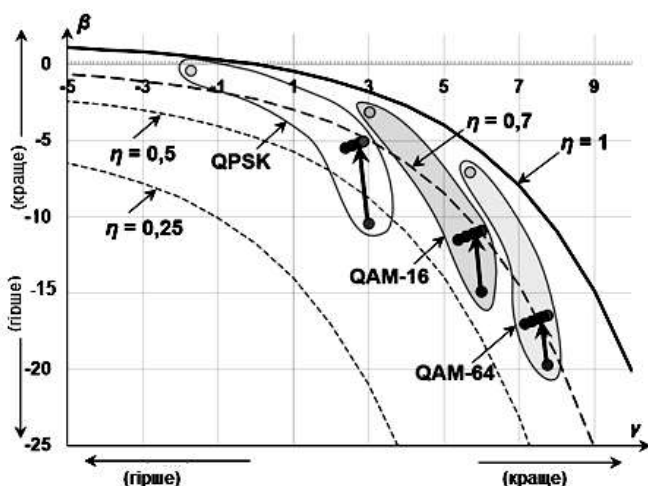


Рисунок 5 – Шкала ефективності застосування ресурсів каналу зв'язку

Для оцінки ефективності вибору СКК пропонується застосовувати шкалу ефективності застосування ресурсів каналу зв'язку, де показниками ефективності є: енергетична β , частотна γ та інформаційна η (рис. 5) [14]. Дослідження показують, що застосування СКК дає значний вигравш порівняно із випадком при застосуванні модуляції низького рівня без завадостійкого кодування. Також рекомендується застосування способу розподілу частотного ресурсу OFDM [7], завдяки якому ефективніше вдається розподіляти доступ до ресурсів каналу зв'язку, а також працювати в умовах багатопроміневого розповсюдження.

Як показує огляд продукції провідних виробників телекомунікаційного обладнання Wi-Fi, наприклад, MikroTik [15] або Ubiquity [16], в документації на обладнання не описуються методи адаптивного перемикання видів модуляції та параметрів завадостійкого кодування, а також умов 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].

Таблиця 2 – Швидкості передавання даних згідно зі стандартом 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	Тип модуляції / швидкість коду	Швидкість передавання 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

Кінець таблиці 2

Індекс сигнально-кодової конструкції MCS	Потоки даних	Тип модуляції / швидкість коду	Швидкість передавання 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		
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

У той самий 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 застосуванні лише показника рівня сигналу на вході приймача, можлива ситуація, коли відношення сигналу до шуму буде малим при значному рівні шуму, що спричинить неможливість передавання при заданому виді СКК. Вибрати більш підходящий вид СКК вдасться завдяки можливостям моніторингу якості каналу приймачем-передавачем з SDR, що в результаті впливає на вибір прийнятного СКК.

Деякі стандарти і виробники рекомендують застосовувати показник відношення рівня сигналу до рівня шуму, наприклад, Cisco і 802.11a [18], де вказано, що забезпечення певної швидкості можливе при заданому відношенні 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 передавання даних із виконанням вимог щодо достовірності передавання, а також ефективність застосування виділених ресурсів каналу зв'язку. У свою чергу, якщо виробники обладнання і не описують методи та умови формування СКК, то роблять посилення на стандарти IEEE 802.11, де наведено параметри СКК [19-20].

ПРИКЛАД РЕАЛІЗАЦІЇ КОНЦЕПЦІЇ SDR У СИСТЕМІ WI-FI БЛИЗЬКОЇ І СЕРЕДНЬОЇ ДІЇ ВИДУ «ТОЧКА-ТОЧКА»

З аналізу ринку основних виробників обладнання Wi-Fi різного призначення «точка-точка», «точка-багаточка», на різні відстані та з широкими можливостями налаштувань можна виділити такі як MikroTik [15] та Ubiquity [16]. У цьому огляді зупинимось на обладнанні фірми MikroTik, яке вдалося протестувати в лабораторних та польових умовах.

Наприклад, в документації до пристрою Router Board 52n-M mini PCI Network Adapter виробника MikroTik вказано, що підтримувана фізична швидкість передавання даних досягає 300 Мбіт/с, а швидкість передавання для користувача 200 Мбіт/с. Приймач-передавач RouterBOARD R52n-M MiniPCI підтримує провідні стандарти 802.11a/b/g/n в діапазонах 2ГГц і 5ГГц та набір модуляцій BPSK, QPSK, 16 QAM, 64QAM для підносійних коливань OFDM.

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



Рисунок 6 – Фото приймача-передавача RouterBOARD R52n-M

Одночасно надано таблицю швидкостей та енергетичних рівнів сигналу для приймача (табл. 4), які забезпечують вказану швидкість передавання. У цей самий час не визначено фактор впливу шумів на корисний сигнал та саме відношення рівня сигналу до рівня шуму, яке фактично і повинне визначати вибір виду багатопозиційної модуляції та вид завадостійкого кодування для підтримання необхідної вірогідності передавання.

Завдяки концепції ПВР, R52n-M може бути конфігурований для роботи в наступних режимах: точки доступу і в режимі «точка-точка».

Таблиця 4 – Швидкості передавання та чутливість приймача

Швидкість передавання даних		Специфікація IEEE (1Rx дБм)	Типова / Максимальна (2Rx дБм)
Чутливість приймача	802.11a	6M	-82
		9M	-81
		12M	-79
		18M	-77
		24M	-74
		36M	-70
		48M	-66
		54M	-65
	802.11b	1M	-82
		5.5M	-80
		11M	-76
	802.11g	6M	-82
		9M	-81
		12M	-79
		18M	-77
		24M	-74
		36M	-70
		48M	-66
		54M	-65

Режим точки доступу надає абонентам доступ до ресурсів мережі шляхом встановлення з'єднання з точкою доступу. Для функціонування в режимі з'єднання однорівневих пристроїв застосовується режим «точка-точка», що дозволяє будувати радіорелейні лінії для з'єднання об'єктів мережі і передавання 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 й обробки сигналу: OFDM, СКК, підтримуючи швидкості до 130 Мбіт/с у 20 МГц діапазоні, та до 300 Мбіт/с у діапазоні 40 МГц, а також швидкості, визначені стандартами IEEE 802.11a/b/g.

Структурна схема системи AR9220



Рисунок 7 – Структурна схема ПЛІС AR9220

зкою щільністю перевірок на парність. Види модуляції – BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM. FEC кодери кодують дані для виправлення помилок. Кодер FEC може включати у себе двійковий згортковий кодер або кодер LDPC.

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

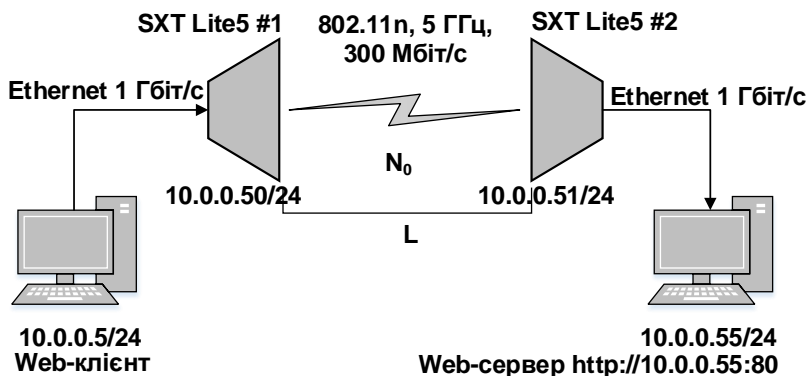


Рисунок 8 – Схема тестування лінії зв'язку

У 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.

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 застосовуваний для з'єднання територіально рознесених сегментів мереж Ethernet 10/100/1000-BaseTx [21, 22]. Функціональна схема гігабітного модему G1 представлена на рис. 9.

Основні складові гігабітного модему (рис. 9) – каналні маршрутизатори 1 і 2, а також груповий маршрутизатор. Вхідний потік автоматично розподіляють на всі канали і далі обробляють для формування радіочастотного спектра в смузі пропускання радіорелейного каналу.

Гігабітовий модем G1 (рис. 10), виконаний у металевому корпусі, дозволяє встановлювати його у стійку RackMount або застосовувати настільне розміщення.

Основні технічні характеристики модему наведені в табл. 5.

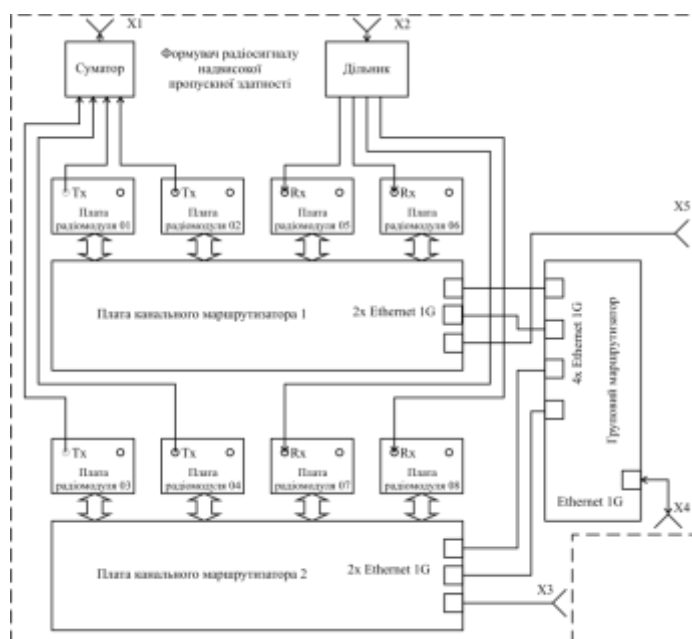


Рисунок 9 – Функціональна схема гігабітного модему

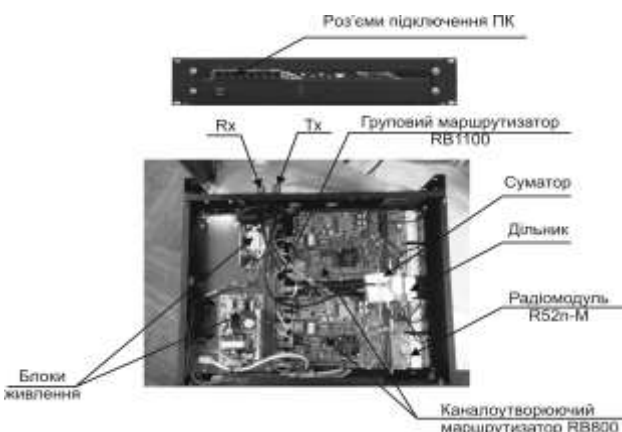


Рисунок 10 – Фото лабораторного зразка гігабітного модему G1

Таблиця 5 – Загальні технічні характеристики гігабітного модему

Найменування	Значення
Напруга живлення, В	220
Інтерфейс керування режимами модуляції-демодуляції	Ethernet 10/100 Base-Tx, рознім RJ-45
Інтерфейс керування маршрутизатором	Ethernet 10/100/1000 Base-T, рознім RJ-45
Інтерфейс даних	Ethernet 10/100/1000 Base-T, рознім RJ-45
Інтерфейс тракту ПЧ	Коаксіальний, тракт 50Ом, Розніми N-type
Центральна частота тракту ПЧ, МГц	2400
Ширина смуги частот, займана модульованим сигналом у режимі максимальної пропускної здатності, 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 наведено в табл. 6.

Управління кожним з двох каналних маршрутизаторів здійснюється за допомогою утиліти Winbox – розніми X3, X5 “CONTROL MODEM” (рис. 9). Також можливе тестування швидкості передачі інформації за допомогою утиліти Winbox (рис. 11).

Таблиця 6 – 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 приймання/передавання (Мбіт/с)	Загальна реальна 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	

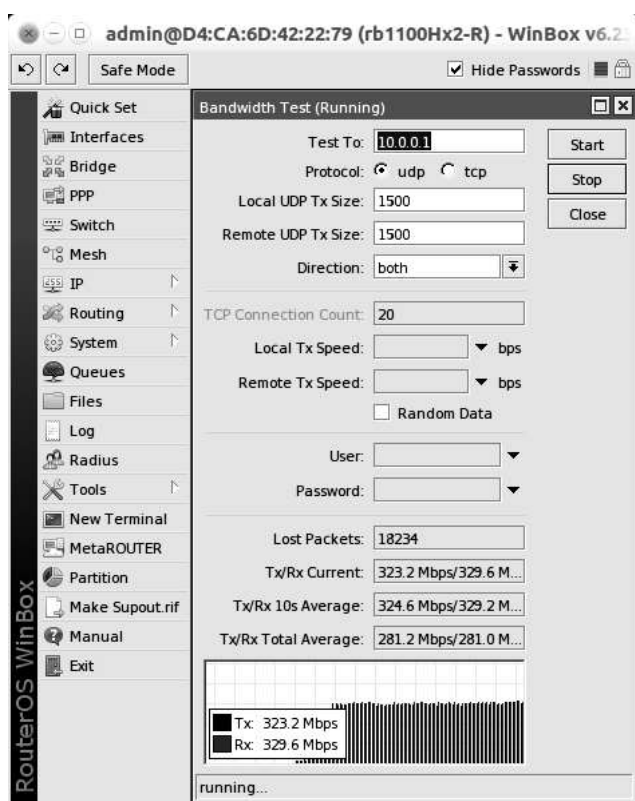


Рисунок 11 – Результат тестування швидкості 4-х канального дуплексного каналу зв'язку

Сигнал проміжної частоти каналних маршрутизаторів надходить на вихід через рознім X1 (рис. 9). Вихід сигналу проміжної частоти каналних маршрутизаторів – рознім 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 (рознім X2). Для з'єднання з мережею Ethernet, а також керуванням груповим маршрутизатором застосовувався як прямий, так і перехресний UTP кабель-рознім X4. Для забезпечення канальної швидкості 1,2 Гбіт/с в радіорелейній лінії терагерцового діапазону [23] застосовано 8 приймачів-передавачів Wi-Fi стандарту 802.11n в діапазоні 2,1–2,7 ГГц в смузї по 40 МГц кожен, що мають канальну швидкість до 150 Мбіт/с (рис. 12, 13).

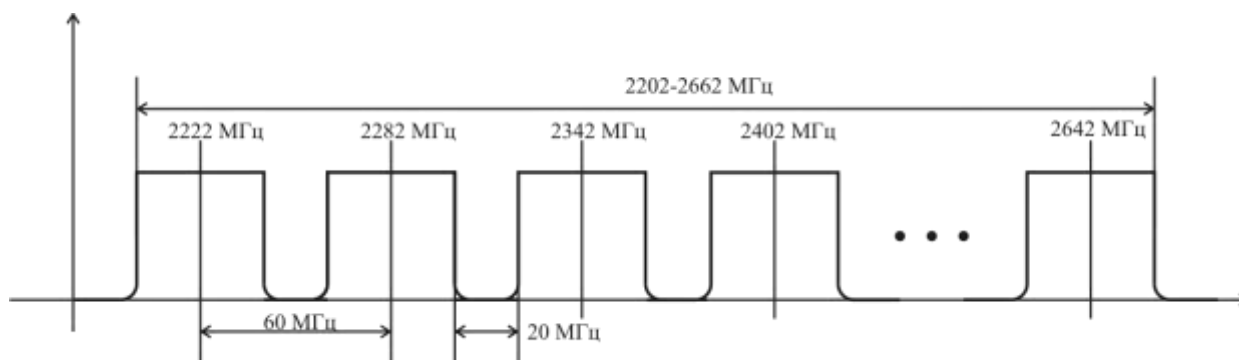


Рисунок 12 – Частотний план гігабітового модему

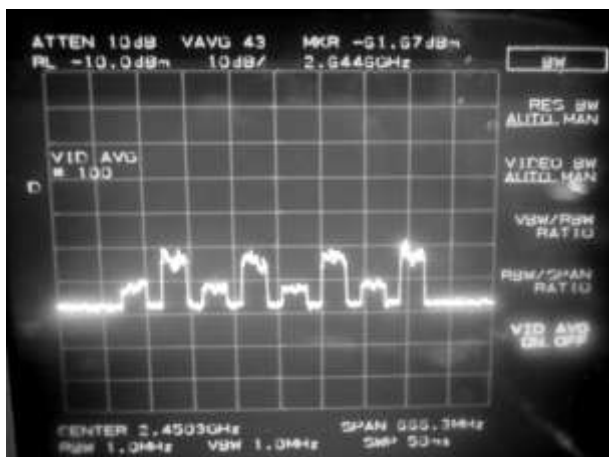


Рисунок 13 – Амплітудно-частотна характеристика

4-канального дуплексного каналу зв'язку

У модемі застосовується режим «dual nstreme» на обладнанні MikroTik, що застосовує для створення одного дуплексного радіоканалу два приймачі R52n-M, один на приймання, інший на передавання. Для досягнення сумарної каналної швидкості 1,2 Гбіт/с пропонується чотири дуплексних канали по 150 Мбіт/с у кожному напрямку. При формуванні dual nstreme каналів, що необхідно для організації дуплексних каналів та підвищення ефективності кожного каналу, застосовуються маршрутизатори MikroTik RB800 з чотирма mini-PCI слотами із встановленими приймачами-передавачами MikroTik R52n-M. Доступ до кожного радіоканалу забезпечується окремим інтерфейсом Ethernet маршрутизатора RB800.

Для об'єднання всіх каналів застосовується маршрутизатор MikroTik RB1100Hx2, який надає єдиний інтерфейс для зовнішнього підключення. Дана конфігурація модему забезпечує високу пропускну здатність 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 приймачів-передавачів MikroTik R52n-M [24].

Для видачі на зовні агрегованого каналу зі швидкістю 600 Мбіт/с необхідно замінити груповий маршрутизатор RB750 на маршрутизатор з пропускну здатністю в 1 Гбіт/с і більше, наприклад RB 450G або RB1100Hx2, що передбачено конструкцією модему.

На основі гігабітного модему G1 зі встановленими приймачами-передавачами MikroTik R52n-M та розробленого передавального та приймального трактів [25] з застосуванням технології Wi-Fi запропоновано гігабітному 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

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

На основі сигнальних конструкцій високого порядку й ефективних блокових завадостійких кодів LDPC показано виграш у застосуванні ресурсів каналу зв'язку при застосуванні

СКК на їх основі. 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 застосування ресурсів для вибору СКК, а саме – інформаційної ефективності, що показує ефективність застосування таких ресурсів каналу зв'язку, як енергетичний, частотний та часовий.

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

Запропонована телекомунікаційна система терагерцового діапазону є прикладом технічного рішення, яке розкриває значний потенціал протоколу 802.11n. Завдяки переходу в терагерцовий діапазон від 100 ГГц і вище, стало можливим застосовувати широку смугу частот для передавання інформації порядку сотень МГц та ГГц, а в результаті – досягати надвисоких швидкостей передавання. На основі обладнання MikroTik запропоновано гігабітову 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 застосовуватися в транспортних розподільних мережах мобільного зв'язку наступного покоління із забезпеченням відповідної надійності, захищеності і швидкостей передавання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону: Монографія / С.О. Кравчук, Т.М. Наритник. – Житомир : ФОП «Євенок О.О.», 2015. – 208 с.
2. Ільченко М.Ю. Основи теорії телекомунікацій [навч. посібник] / М.Ю. Ільченко; за заг. ред. М.Ю. Ільченка. – К. : ІСЗІ НТУУ «КПІ», 2010. – 788 с.
3. Ільченко М.Ю. Сучасні телекомунікаційні системи [Текст] / М. Ю. Ільченко, С. О. Кравчук. – 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. Volume 2, 2014. – pp. 1196–1204.
6. Галлагер Р. Коды с малой плотностью проверок на чётность [Текст] / Галлагер Р. – М. : Мир, 1966. – 144 с.
7. Урывский Л.А. Синтез сигнально-кодовых конструкций для OFDM сигналов в канале с постоянными параметрами / Л.А. Урывский, С.А. Осипчук // . – Науково-виробничий збірник «Наукові записки УНДІЗ», №4 (32), 2014. – с. 41–48.
8. Патент на корисну модель № UA 94019 U (Україна). Спосіб адаптивного вибору виду багатопозиційної модуляції / Урывський 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 / Урывський 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, vol. 45, No. 2, March 1999. – pp. 339–431.
11. Ohtsuki T., “LDPC codes in communications and broadcasting,” IEIC Trans. Commun., vol. 90-B, no. 3, March 2007. – pp. 440–453.
12. L. Uryvsky, S. Osypchuk, Comparative analysis of LDPC and BCH codes error-correcting capabilities. – Information and Telecommunication Sciences, Volume 5, Number 1, 2014, pp. 5–9.

13. Uryvsky L., Osypchuk S. Analysis of corrective properties of ultra-long LDPC codes. – Telecommunication Sciences, Volume 4, Number 1, 2013, pp. 21–26.
14. Уривський, Л.О. Модифікована методика оцінки ефективності систем передавання інформації на основі показників Зюко А.Г [Текст] / Уривський Л.О., Мошинська А.В., Прокопенко К.А. // 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.
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., Казимиренко 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., Алиев 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. M.Ye. Ilchenko, T.M. Narytnyk, B.M. Radzikhovsky, S.E. Kuzmin,, O.V. Lutchak. Development of the Transmitting and Receiving Channels for Terahertz Band Relay Systems// Telecommunications and Radio Engineering. - Vol. 74, 2015, Number 11. – P.21–998

REFERENCES

1. Kravchuk S.O. Telekomunikatsiylni sistemi teragertsovogo diapazonu: Monograflya / S.O. Kravchuk, T.M. Naritnik. – Zhitomir : FOP «Evenyuk O.O.», 2015. – 208 s.
2. Ilchenko M.Yu. Osnovi teoriyi telekomunikatsiy [navch. posibnik] / M.Yu. Ilchenko; za zag. red. M.Yu. Ilchenka. – K. : ISZZI NTUU «KPI», 2010. – 788 s.
3. Ilchenko M.Yu. Suchasni telekomunikatsiylni sistemi [Tekst] / M. Yu. Ilchenko, S. O. Kravchuk. – K. : Nauk. dumka, 2008. – 328 s.
4. Tendentsiyi v telekomunikatsiyah 2015 [Elektronniy resurs] = Special issue: ten trends tell where communication technologies are headed / ComSoc. – Rezhim dostupu: <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. Volume 2, 2014. – pp. 1196–1204.
6. Gallager R. Kodyi s maloy plotnostyu proverok na chyotnost [Tekst] / Gallager R. – M. : Mir, 1966. – 144 s.

7. Uryivskiy L.A. Sintez signalno-kodovyih konstruksiy dlya OFDM signalov v kanale s postoyannyimi parametrami / L.A. Uryivskiy, S.A. Osipchuk // – Naukovo-virobnichiy zblnrnik «Naukovl zapiski UNDIIZ», #4 (32), 2014. – s. 41–48.
8. Patent na korisnu model # UA 94019 U (UkraYina). Sposlb adaptivnogo vioru vidu bagatopozitslynoyi modulyatsiyi / Urivskiy L.O., Osipchuk S.O., Prokopenko K.A. Publilkatslya vidomostey pro vidachu patentu: 27.10.2014. Byul. # 20.
9. Patent na korisnu model # UA 95365 U (UkraYina). Sposlb adaptivnogo vioru vidu bagatopozitslynoyi modulyatsiyi / Urivskiy L.O., Osipchuk S.O., Prokopenko K.A. Publilkatslya vidomostey pro vidachu patentu: 25.12.2014. Byul. # 24.
10. MacKay D., “Good error-correcting codes based on very sparse matrices”, IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 45, No. 2, March 1999. – pp. 339–431.
11. Ohtsuki T., “LDPC codes in communications and broadcasting,” IEIC Trans. Commun., vol. 90-B, no. 3, March 2007. – pp. 440–453.
12. L. Uryvsky, S. Osypchuk, Comparative analysis of LDPC and BCH codes error-correcting capabilities. – Information and Telecommunication Sciences, Volume 5, Number 1, 2014, pp. 5–9.
13. Uryvsky L., Osypchuk S. Analysis of corrective properties of ultra-long LDPC codes. – Telecommunication Sciences, Volume 4, Number 1, 2013, pp. 21–26.
14. Urivskiy, L.O. Modiflkovana metodika otslnki effektivnostl sistem peredavannya Infor-matsiyi na osnovl pokazniklv Zyuko A.G [Tekst] / Urivskiy L.O., Moshinska A.V., Prokopenko K.A. // K.: Naukovl vlstl NTUU “KPI”. – 2010. – # 6(74). – S. 24–29.
15. Oglyad obladnannya MikroTik [Elektronniy resurs]. – MikroTik Routers and Wireless – Rezhim dostupu: <http://www.mikrotik.com/> Oglyad obladnannya Ubiquiti Networks [Elektronniy resurs]. – Ubiquiti Wireless networking products – Rezhim dostupu: <https://www.ubnt.com/>.
17. Zalezhnst vidu SKK vld znachen energetichnih rlvnlv v tochtsl priymannya signallv [Elekt-ronniy resurs] = Coverage or Capacity – making the best use of 802.11n / Juniper Networks. – Rezhim do-stupu: http://www.webtutorials.com/main/resource/papers/juniper/paper16/11n_Coverage_vs_Capacity.pdf.
18. Rekomendovanl znachennya vldnoshennya signalu do shumu v rlvnih seredovischah [Elektronniy resurs] = Recommended or minimum Single-to-Noise ratio for different environments / Cisco Systems. – Rezhim dostupu: <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. Patent na korisnu model #84923 (UkraYina). Priymalno-peredavalniy formuvach In-formatslynogo potoku dlya kanalu zv'yazku lz pldvischenoyu spektralnoyu effektivlstyu ta propusknoyu zdatnlstyu / Ilchenko M.Yu., Naritnik T.M., Kazlmlrenko V.Ya., Voytenko O.G., Radzlhovskiy V.V., Sviri-denko V.V. – Opubl. 11.11.2013 r. – Byul. # 21.
22. Ilchenko M.Yu., Naritnik T.N., Voytenko A.G., Kazimirenko V.Ya., Volkov V.V. Priymalno-peredavalniy formuvach Informatslynogo potoku dlya kanalu zv'yazku z pldvischenoyu spektralnoyu effektivlstyu l propusknoyu zdatnlstyu // Materlali SomoYi MizhnarodnoYi naukovo-tehnlchnoYi konferentsiyi [«Problemi telekomunikatsly»] (PT-13). – K.: NTUU «KPI», 2013, s.16.
23. Naryitnik T.N. Issledovaniya formirovatelya tsifrovogo potoka dlya telekommunikatsion-nyih sistem teragertsovogo diapazona. // Sbornik nauchnyih trudov pervoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [«Problemyi infokommunikatsiy. Nauka i tehnologii»] . – (Harkov, 9–11 oktyabrya 2013). – s.23–26.
24. Naryitnik T.N., Ilchenko M.E., Voytenko A.G., Didkovskiy A.V., Aliev M.Ya., Volkov V.V. Issledovaniya formirovatelya informatsionnogo potoka dlya kanala svyazi s povyishennoy propusknoy sposobnostyu //Materlali VosmoYi MizhnarodnoYi naukovo-tehnlchnoYi konferentsiyi [«Problemi telekomu-nikatsly»]. – K. :NTUU «KPI», 2014. – C. 310–312.
25. M.Ye. Ilchenko, T.M. Naryitnyk, B.M. Radzikhovskiy, S.E. Kuzmin,, O.V. Lutchak. Development of the Transmitting and Receiving Channels for Terahertz Band Relay Systems// Telecommunications and Radio Engineering. - Vol. 74, 2015, Number 11. – P.21–998.