

УДК 537.87: 621.371: 621.376

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ХВИЛЬ ВСЕРЕДИНИ ПРИМІЩЕНЬ



[А.О. МЕРЗЛІКІН](#)

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Abstract** – There is a rapid development of technologies worldwide that have access to the Internet, independently exchange data, and upload collected information to cloud storage. Every year, the amount of data transmitted from things and people on the Internet is approximately two zettabytes. The volume of data on the Internet is constantly growing. According to the Internet Live Stats service, more than 50,000 search queries are made on Google every second, 120,000 videos are viewed on YouTube, and almost 2.5 million e-mails are sent. Therefore, it is expedient to implement the fifth generation of communication, which will work in the millimeter range. Promising technologies for building 5G and its implementation include small base stations, which are analogs of conventional mobile network base stations. Within settlements, small base stations should be located short distances from each other (approximately 250 meters). From such parameters, it can be concluded that it will be necessary to use thousands of such stations to cover even a small city, forming a single network that will transmit data to 5G users. Among the advantages, it can be noted that due to the small size of the antennas, they can be placed on any elements of structures and buildings (for example, on the walls of buildings, pillars, etc.) without additional obstacles. The paper presents and investigates the bandwidth of the millimeter wave range indoor communication channel. The structure of the modem and the format of the control command, the dependence of the transmission speed  $C$  on the length of the radio line of the IEEE 802.11ad 60 GHz communication system in point-to-point mode (Indoor LOS) and (Indoor NLOS) are presented. In work, there are theoretical assessments of the achievable data transfer rates based on the bandwidth of the Shannon communication channel and practically possible data transfer rates for various segments of the information transfer network for the IEEE 802.11ad standard equipment using different modulation and coding schemes (MCS).

**Анотація** – Зараз у світі іде дуже стрімкий розвиток технологій, які мають доступ до інтернету, обмінюються самостійно даними та завантажують зібрану інформацію в хмарні сховища. Щороку кількість переданих даних від речей та людей в мережі інтернет складає приблизно 2 зетабайти. Об'єм інформації в мережі інтернет безперервно зростає. Згідно із сервісами Internet Live Stats, кожну секунду в Google робиться більш 50 000 пошукових запитів, проглядається 120 000 відео на Youtube, відправляється майже 2,5 млн електронних листів. Тому є доцільним впровадження п'ятого покоління зв'язку, яке буде працювати у міліметровому діапазоні. До перспективних технологій побудови 5G та її реалізації є малі базові станції, які є аналогами звичайних базових станцій мобільної мережі. У межах населених пунктів малі базові станції повинні розташовуватися на невеликих відстанях одна від іншої (приблизно 250 метрів). З таких параметрів можна зробити висновки, що для покриття одного навіть невеликого міста потрібно буде використати тисячі таких станцій, які будуть формувати єдину мережу для передавання даних користувачам 5G. З переваг можна відмітити, що завдяки малим розмірам антен їх можна буде без додаткових завод розміщувати на будь-яких елементах конструкцій та споруд (наприклад, на стінах будинків, стовпах тощо). У роботі представлено та досліджено пропускну здатність каналу зв'язку міліметрового діапазону хвиль всередині приміщень. Представлена структура модему та формат команди управління, залежність швидкості передачі  $C$  від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц в режимі точка-точка (Indoor LOS) та (Indoor NLOS). У роботі проведена теоретична оцінка досяжних швидкостей передачі інформації, заснованих на пропускну здатності каналу зв'язку по Шеннону, її оцінка практично досяжних швидкостей передачі даних для різних сегментів мережі передачі інформації для апаратури стандарту IEEE 802.11ad, що використовує різні схеми модуляції та кодування (MCS).

## Вступ

Широке впровадження технологій високоякісного відтворення відеоінформації з високою роздільною здатністю (HDTV, UHD) призвело до появи технологій WiGig і технологій стандарту безпроводової передачі інформації IEEE 802.11ad у 2012 р. і було продиктовано необхідністю значного підвищення швидкості передачі мультимедійної інформації. Використання діапазону 60 ГГц дозволяло значно розширити смугу

пропускання каналу зв'язку до 2 ГГц. Високі швидкості передачі інформації за технологією WiGig досягалися всередині приміщень на невеликих відстанях (не більше 10-15 м), що було достатньо, наприклад, для технологій віртуальної або доповненої реальності (VR/AR) [1-3].

Останнім часом кілька міжнародних груп доклали зусиль зі стандартизації безпроводових персональних мереж (WPAN), включаючи технології IEEE 802.11ad, IEEE 802.15.3c, WirelessHD, WiGig та ECMA-387. Ці системи визначають швидкість передачі адаптивного фізичного (PHY) рівня до 7 Гбіт/с у діапазоні 57,24-65,88 ГГц.

Багато компаній – Qualcomm, Intel, Broadcom, Tensorcom та ін. розробили економічні комплекти електронних компонентів для побудови радіомодулів, які можуть використовуватись у мобільних системах зв'язку всередині приміщень (*indoor*). Структура та параметри таких модулів відрізняються один від одного, а при впровадженні необхідно мати параметри реальної роботи пристроїв у різних умовах оточення [4-6].

Метою роботи є уточнення методики розрахунків та оцінка параметрів продуктивності каналів зв'язку в міліметровому діапазоні хвиль при розгортанні мережі всередині приміщень у режимі LOS та NLOS.

## I. Основна частина

Частотний діапазон 60 ГГц для різних регіонів і країн світу визнаний неліцензійним (ISM), а його частотний розподіл представлено на рис.1 і в табл. 1 [7].

Таблиця 1. Частотний діапазон 60 ГГц для різних регіонів і країн світу

Параметр	Країни та регіони світу				
	Північна Америка	Японія	Південна Корея	Австралія	Євросоюз
Діапазон частот, ГГц	57-64	59-66	57-64	59,4-62,9	57-64
Смуга пропускання каналу, ГГц	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16
Потужність передавача, дБм	-	10	10	10	27
Еквівалентна ізотропна потужність в антені (EIRP), дБм	40 середня, 43 пікова	57	57	51,8	40 середня 43 пікова

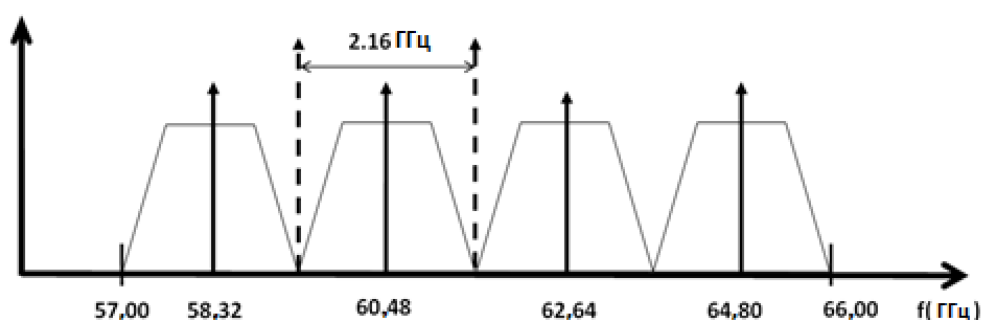


Рис. 1. Частотний план розбиття діапазону 60 ГГц на канали

Європейський регулятор рекомендує такий порядок використання діапазону 60 ГГц [7]:

- 59–66 ГГц – для мобільних сервісів;
- 59–62 ГГц – для локальних радіомереж;
- 62–64 ГГц – для мобільних широкосмугових систем і систем транспортної інформатики;
- 58–59 ГГц – для радіосистем астрономічних обсерваторій.

Одним із параметрів, наведених у табл. 1, є еквівалентна ізотропна потужність в антені EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power), яка є інтегральною енергетичною характеристикою передавача, що враховує спрямовані властивості антени:

$$EIRP = P_{TX} + G_{TX}, \quad (1)$$

де  $P_{TX}$  – потужність передавача, дБм;  $G_{TX}$  – коефіцієнт посилення передавальної антени дБі.

У діапазоні 60 ГГц для реалізації радіоприймачів застосовується три основні архітектури: супергетеродинна (super-heterodyne); прямого перетворення (direct-conversion); гібридна схема (low-IF architecture).

Архітектура з низькою проміжною частотою (ПЧ), low-IF, називається «цифрова ПЧ» (digital IF), оскільки перетворені зі зниженням частоти сигнали ПЧ піддаються цифровій обробці після аналого-цифрового перетворення (АЦП).

Сигнали з низькою ПЧ не перетворюються безпосередньо в смугу сигналів, а переміщуються в смугу низької ПЧ, де частота дискретизації аналого-цифрового перетворювача може підтримувати перетворення цифрових сигналів за допомогою АЦП і квадратурної демодуляції I/Q. Далі обробка виконується у цифровій області.

У роботі експериментальні дослідження проведено на комплекті точок доступу фірми Mikrotik Wireless Wire RBwAPG-60ad, зовнішній вигляд яких представлений на рис. 2.

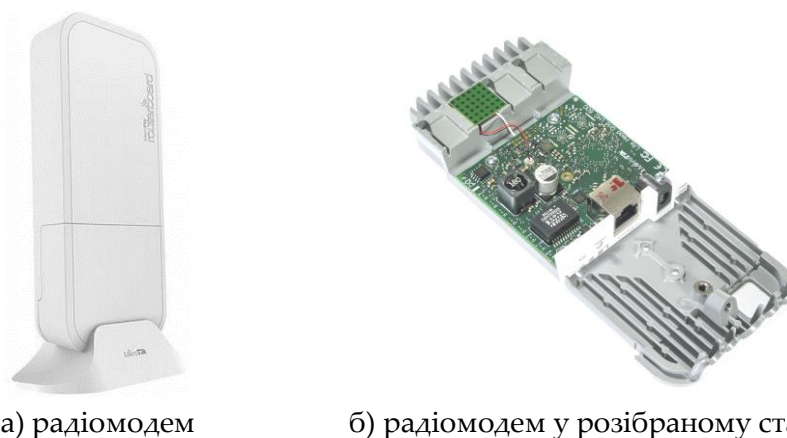


Рис. 2. Загальний вигляд радіомодемів AP фірми Mikrotik RBwAPG-60ad

Модеми мають 4-ядерні процесори з архітектурою ARM IPQ-4019 (частота 716 МГц). Є і необхідний для підключення Ethernet-порт на 1 Гбіт/с з підтримкою пасивного живлення за допомогою PoE. Управління та контроль відбуваються під керуванням операційної системи RouterOS Level 3.

Модеми Mikrotik RBwAPG-60ad базуються на інтегрованій платформі фірми Qualcomm Technologies: базового цифрового модуля BM (Baseband Module) Qualcomm QCA6335, радіочастотного модуля (RF front-end) QCA6310 PM (Phased array Module), який інтегрований з антенною фазовою решіткою (phased arrays 6×6).

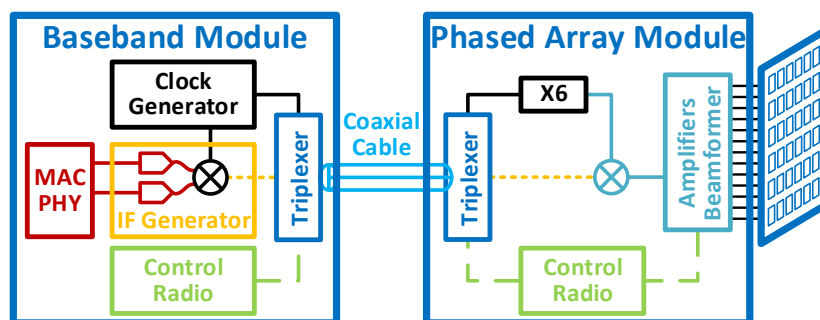


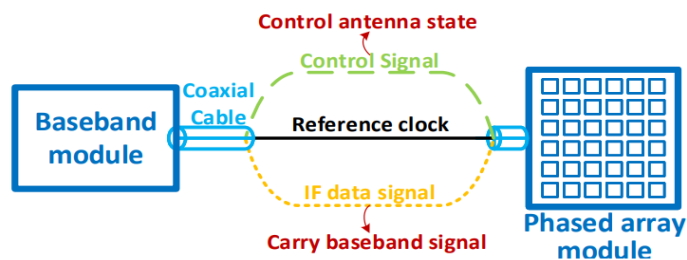
Рис. 3. Узагальнена архітектура радіомодемів фірми Mikrotik RBwAPG-60ad

На рис. 3 використовуються такі позначення: baseband module (базовий модуль), phased array module (модуль фазованої решітки), PHY (інтегральна схема), clock generator (тактовий генератор), control radio (радіо керування), amplifiers beamformer (підсилювач).

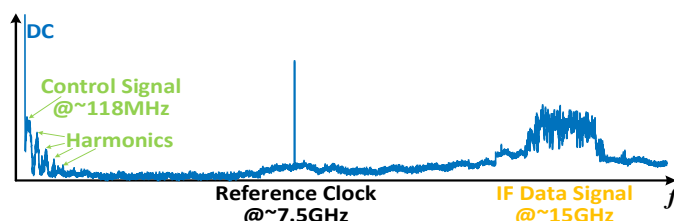
Особливістю архітектури радіомодемів (рис. 3) є те, що вона реалізує гібридну (аналого-цифрову) схему обробки сигналів, а зв'язок між окремими моделями реалізується за допомогою короткого коаксіального кабелю, по якому передаються чотири типи сигналів: радіочастотні сигнали проміжної частоти (IF data signal), частота опорного сигналу (Reference Clock), контрольний сигнал (Control Signal) та напруга джерела живлення постійного току (DC).

На рис. 4 представлені структура та спектри сигналів, що проходять між BM та PM: сигнал джерела живлення DC; опорний сигнал проміжної частоти IF близько 7,5 ГГц; контрольний сигнал близько 118 МГц та сигнал проміжної частоти сигналу даних близько 15 ГГц.

Більшість наборів мікросхем mmWave [4-6] зазвичай використовують архітектуру промінної ковзної ПЧ для перетворення з підвищенням частоти сигналу mmWave і розділенням каналів. BM Qualcomm 802.11ad забезпечує еталонну тактову частоту близько 7,5 ГГц (перемикання між 7,29; 7,56; 7,83 і 8,10 ГГц) для PM, дозволяючи йому перемикатися між чотирма частотними каналами IEEE 802.11ad (частоти 58,32; 60,48; 62,64 та 64,80 ГГц). Опорний тактовий сигнал проходить через коаксіальний кабель, а потім множник ×6 використовується для генерації частоти гетеродину (LO) для PM.



а) структура



б) спектр

Рис. 4. Структура та спектри сигналів кабельного каналу міжмодульного зв'язку радіомодемів

На рис. 4 використані такі позначення: Control antenna state (контроль стану антени), Control Signal (сигнал керування), Carry baseband signal (базовий сигнал).

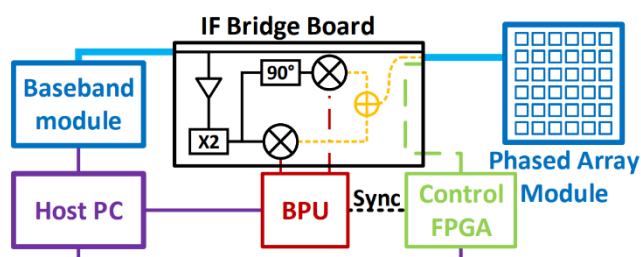
Для прикладу:

IF сигнал має частоту  $7,56 \times 6 = 45,36$  ГГц;

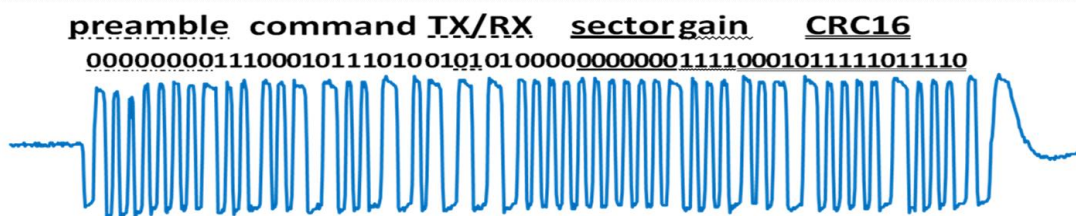
частота генерації гетеродину локального осцилятора складає  $7,56 \times 2 = 15,12$  ГГц;

вихідний RF сигнал має частоту  $45,36 + 15,12 = 60,48$  ГГц.

На рис. 5 показано узагальнену структуру модему та формат команди управління, на рис 6 – вид антени та діаграму спрямованості.



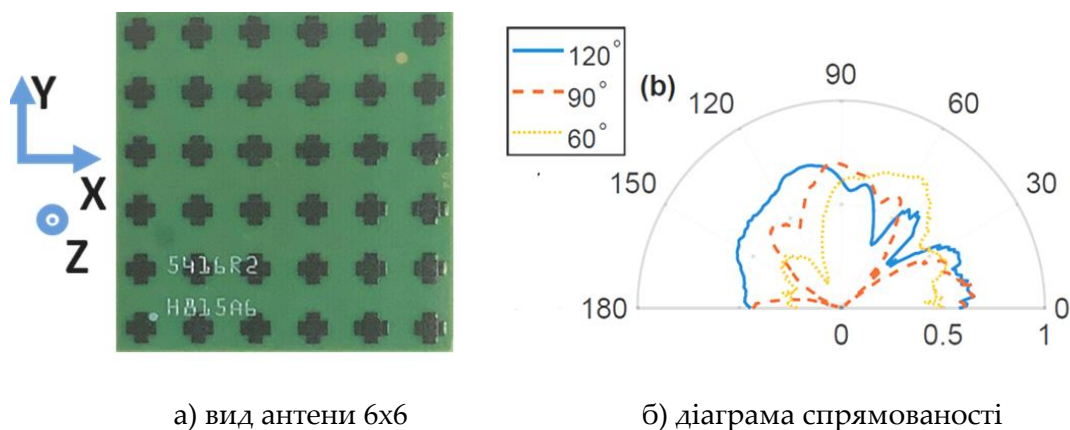
а) структура модему



б) формат команди

Рис. 5. Узагальнена структура модему та формат команди управління (Control FPGA)





а) вид антени 6x6

б) діаграма спрямованості

Рис. 6. Вид антени та діаграма спрямованості

Для визначення теоретичної пропускної здатності міліметрового каналу зв'язку, необхідно провести оцінку бюджету радіолінії довжиною, що враховує потужність передавача, ослаблення сигналу 60 ГГц на трасі та посилення приймальної антени. Граничну пропускну здатність каналу зв'язку залежно від відстані між передавачем і приймачем, смуги пропускання та співвідношення сигнал/шум можна оцінити виходячи з формули К. Шеннона [20]:

$$C(d) = BW_{60\text{GHz}} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_W^{\text{RX}}(d)}{N_W} \right), \quad (2)$$

де  $BW_{60\text{GHz}}$  – ширина смуги пропускання (Гц) для діапазону 60 ГГц ( $BW_{60\text{GHz}} = 2,16 \cdot 10^9$  Гц);  $P_W^{\text{RX}}(d)$  – потужність сигналу на вході приймача (Вт) на відстані  $d$  від передавача ( $P_W^{\text{RX}}(d) = 10^{(P_{dB}^{\text{RX}}(d)/10)}$ );  $N_W$  – потужність шуму  $N_W = 10^{(N_{dB}/10)}$  (Вт).

Потужність шуму  $N$  залежить від різних факторів: діапазону частот, смуги пропускання каналу радіозв'язку та шумів реалізації конкретної системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad [20]:

$$N_{dB} = k_B T_c + 10 \log_{10}(BW_{60\text{GHz}}) + L_I + n_F, \quad (3)$$

де  $k_B T_c$  – спектральна щільність потужності шуму ( $k_B T_c = -174 \text{ dB/Гц}$ );  $BW_{60\text{GHz}}$  – ширина смуги пропускання (Гц) для діапазону 60 ГГц;  $L_I$  – згасання під час реалізації апаратури стандарту IEEE 802.11ad ( $L_I = 10$  дБ);  $n_F$  – коефіцієнт шуму апаратури стандарту IEEE 802.11ad ( $n_F = 5$  дБ).

Рівень сигналу  $P_{dB}^{\text{RX}}$ , що приймається в приймачі, можна представити у вигляді:

$$P_{dB}^{\text{RX}}(d) = P_{\text{TX}} + G_{\text{TX}} - PL(d) + G_{\text{RX}}. \quad (4)$$

В умовах різного оточення всередині приміщень (Indoor) можна використовувати для розрахунку послаблення сигналу 60 ГГц на трасі всередині приміщень дві основні моделі: модель прямої видимості (LOS)

$$PL(d)_{LOS} = A_{LOS} + 10n \log_{10}(d/d_0) \Big|_{d_0=1} + X_{\Omega}, d \geq d_0 \quad (5)$$

та модель непрямой видимості (NLOS) [15]

$$PL(d)_{NLOS} = A_{NLOS} + 10n \log_{10}(d/d_0) \Big|_{d_0=1} + X_{\Omega}, d \geq d_0, \quad (6)$$

де  $A_{LOS}$  – загасання у відкритому просторі (пряма видимість);  $A_{NLOS}$  – загасання у відкритому просторі (непряма видимість);  $n$  – коефіцієнт, що приймає значення від 2 до 6 залежно від умов розповсюдження сигналу [15];  $d$  – відстань між передавальною та приймальною антенами, м;  $d_0 = 1$  м – еталонна відстань;  $X_{\Omega}$  – випадкова величина, що описує великомасштабні завмирання, які залежать від середніх втрат на трасі (shadowing effects).

В табл. 2 представлені величини коефіцієнта  $n$  для різних умов поширення [15].

Для оцінки реальної пропускної здатності каналу зв'язку на основі існуючих систем необхідно звернутися до стандарту IEEE 802.11ad [21], де вказано рекомендовані схеми модуляції та кодування (Modulation and Coding Scheme, MCS) для режиму роботи точок доступу AP Mikrotik RBwAPG-60ad з використанням однієї несної SC (Single carrier), наведено величини чутливості приймача  $P_{RX}^{MCS}$  та максимально досяжна при цьому швидкість передачі інформації DR (Data rate).

Таблиця 2. Величини коефіцієнта  $n$  для різних умов поширення

Умови поширення усередині будівель	$PL(d_0)$ , дБ	$n$	$X_{\Omega}$ , дБ
модель прямої видимості (5)	34-84	0,5-2,5	0,14-5,4
модель непрямой видимості (6)	35-86	1,64-5,4	1,55-8,6

Результати моделювання каналу зв'язку у середовищі MATLAB представлені на рис. 7 і 8. Вони демонструють залежності швидкості передачі інформації  $C$  від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad на частоті 60,48 ГГц у режимі «точка-точка» для LOS і в режимі «точка-точка» для NLOS.

Якщо як граничну мінімальну швидкість передачі інформації каналом зв'язку взяти 1 Гбіт/с в межах стандарту IEEE 802.11ad, то можна визначити максимальний радіус зони обслуговування для AP у приміщенні. Радіус дії для режиму LOS – 60 м; а для режиму NLOS – 30 м.

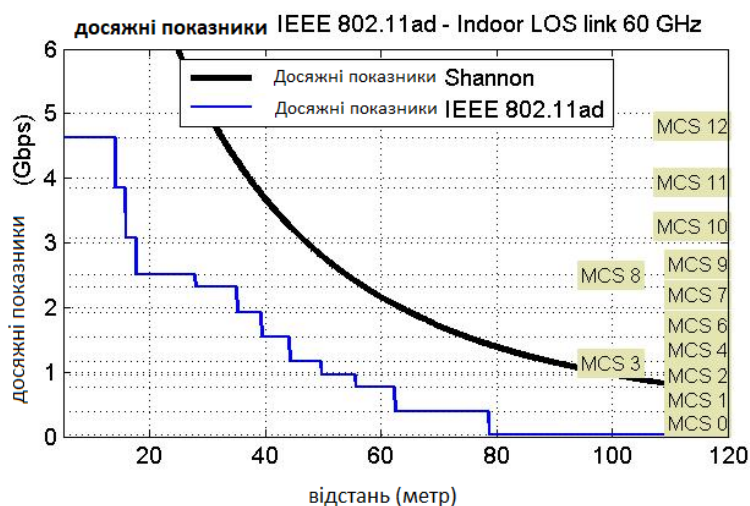


Рис. 7. Залежність швидкості передачі C від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad у режимі «точка-точка» для LOS

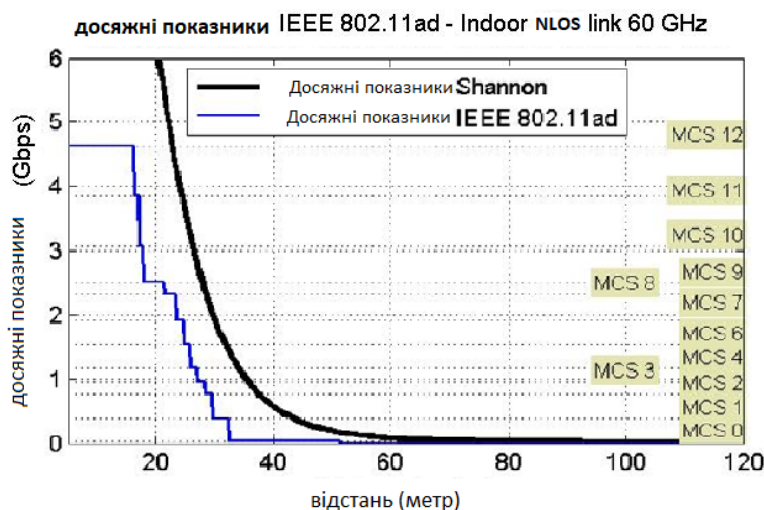


Рис. 8. Залежність швидкості передачі C від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad у режимі «точка-точка» для NLOS

Експериментальні дослідження радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad проводились у навчальному класі із такими загальними розмірами: довжина – 25 м; ширина – 6 м; висота – 5 м. Загальний вигляд класу та план приміщення представлено на рис. 9 та 10. Генератор трафіка – одна з найбільш важливих утиліт для визначення характеристики якості каналу, вбудована в RouterOS. Цей інструмент дозволяє проводити тестування продуктивності без витрат на дороге обладнання. Трафік генерувався одним пристроєм в мережі (рис. 11). Програмно генерований трафік відправляв RAW-пакети по конкретних портах, завдяки цьому можна було отримати значення затримки (latency) та її варіації (jitter), швидкості tx/rx, підраховувати втрачені пакети. Завдяки генератору трафіку було згенеровано пакети довжиною 1500 Байт, які передавалися від передавача на приймач зі швидкістю 1 Гбіт/с.





Рис. 9. Загальний вид навчального класу під час проведення випробувань радіомодемів

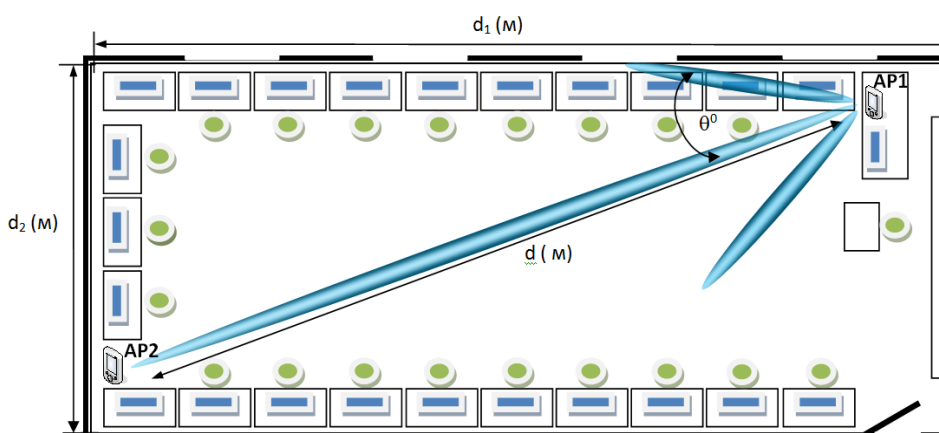
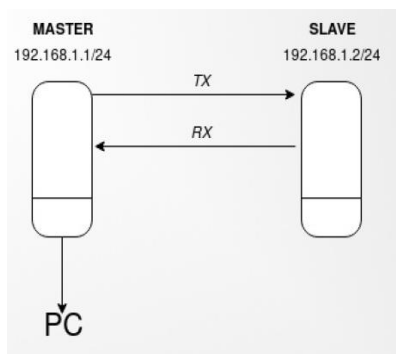
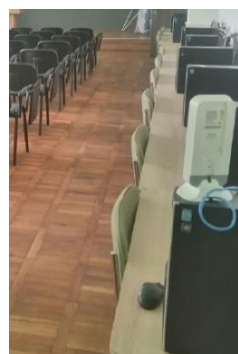


Рис. 10. Загальний план навчального класу під час проведення випробувань радіомодемів



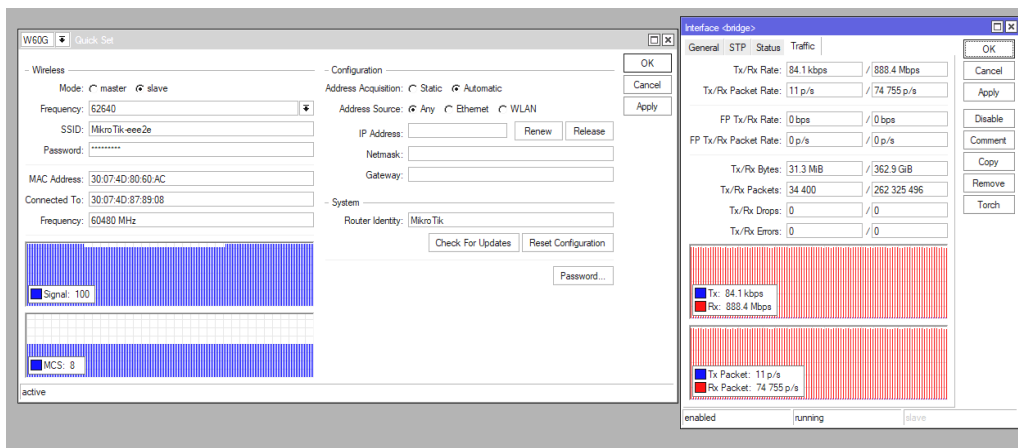
а) схема роботи



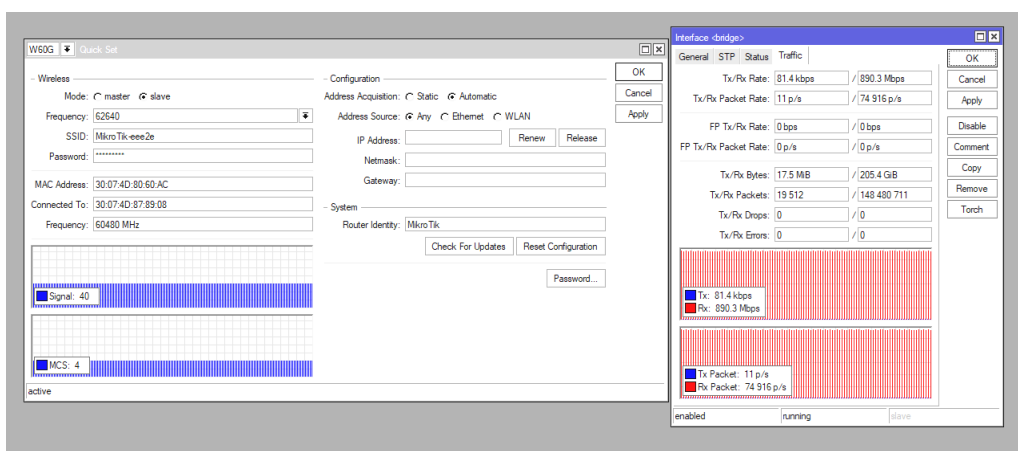
б) фото експерименту

Рис. 11. Схема тестування лінії зв'язку у навчальній лабораторії

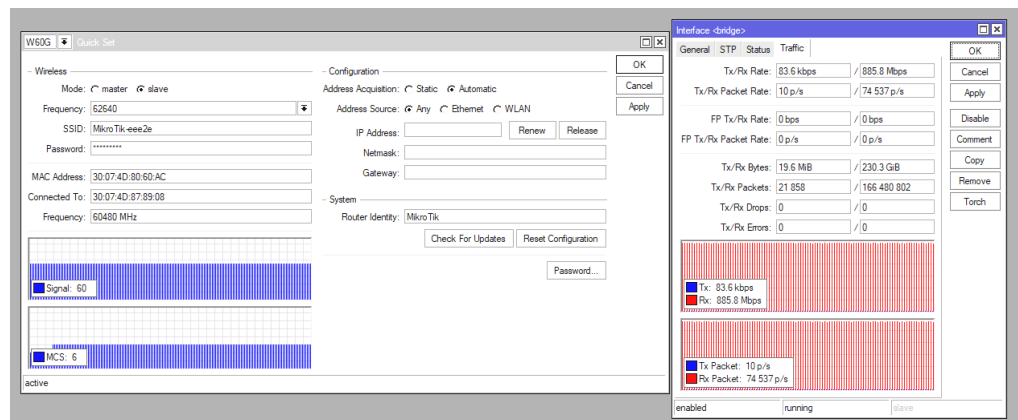
На наведених нижче графіках, отриманих у програмному пакеті Win Vox, можна побачити, що швидкість передачі становила близько 1 Гбіт/с. Водночас при рівні сигналу 80%, а не 100%, швидкість не втрачалась (рис. 12). При різних кутах повороту антени AP рівень сигналу (Signal) у відсотках змінюється у межах: 100 % (рис. 12 а); 40% (рис. 12 б); 60% (рис. 12 в). Швидкість передачі інформації  $S$  на прийомі (Rx) становить близько 885 Мбіт/с.



а)  $\Theta = 0^{\circ}$



б)  $\Theta = 60^{\circ}$



в)  $\Theta = 90^{\circ}$

Рис. 12. Основні параметри каналу зв'язку при різних кутах  $\Theta$  повороту антени AP

## Висновки

1. У даний час кількість мобільних користувачів значно зростає, і вони хочуть більш надійного обслуговування та високої швидкості передачі даних. Мережі 5G у міліметровому діапазоні хвиль можуть забезпечити більш високу швидкість передачі даних.

2. Передача сигналів міліметрового діапазону хвиль вище 10 ГГц вразлива до опадів. Дощ, сніг, частки льоду і град можуть послаблювати та розсіювати мікрохвильові сигнали і, отже, призводити до зниження доступності з погляду якості системи.

3. У роботі проведено теоретичну оцінку досяжних швидкостей передачі інформації, заснованих на пропускній здатності каналу зв'язку по Шеннону, і оцінка практично досяжних швидкостей передачі даних для різних сегментів мережі передачі інформації для апаратури стандарту IEEE 802.11ad, що використовує різні схеми модуляції та кодування.

### Список літератури

1. Standard IEEE 802.11ad, (2012), "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 Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band", available at: <https://standards.ieee.org/ieee/802.11ad/4527/> (last accessed 15.12.2022)

2. Nitsche, T., Cordeiro, C., Flores, A. B., Knightly, E. W., Perahia, E. and Widmer, J. C. (2014), "IEEE 802.11ad: directional 60 GHz communication for multi-Gigabit-per-second Wi-Fi [Invited Paper]," IEEE Communications Magazine, No. 52(12), P. 132-141. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6979964>

3. Быстров, Р.П., Петров, А.В., Соколов, А.В. (2000), "Миллиметровые волны в системах связи", Журнал радиоэлектроники, No. 5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may00/5/text.html?14>

4. Boers, M., Afshar, B., Vassiliou, I., Sarkar, S., Nicolson, S.T., Adabi, E., Perumana, B.G., Chalvatzis, T., Kavvadias, S., Sen, P. and Chan, W.L. (2014), "A 16TX/16RX 60 GHz 802.11 ad chipset with single coaxial interface and polarization diversity", IEEE journal of solid-state circuits, No. 49(12), P.3031-3045. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSSC.2014.2356462>

5. Cohen, E., Ruberto, M., Cohen, M., Degani, O., Ravid, S. and Ritter, D. (2013), "A CMOS bidirectional 32-element phased-array transceiver at 60 GHz with LTCC antenna", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, No. 61(3), P. 1359-1375. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2013.2243749>

6. Emami, S., Wiser, R.F., Ali, E., Forbes, M.G., Gordon, M.Q., Guan, X., Lo, S., McElwee, P.T., Parker, J., Tani, J.R. and Gilbert, J.M. (2011), "A 60GHz CMOS phased-array transceiver pair for multi-Gb/s wireless communications", Proceedings of the 2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference, P. 164-166. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2011.5746265>

7. ETSI TR 102 555. V1.1.1 (2007-02), "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM): Technical characteristics of multiple gigabit wireless systems in the 60 GHz range System Reference Document", 21 p., available at: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/102500\\_102599/102555/01.01.01\\_60/tr\\_102555v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102500_102599/102555/01.01.01_60/tr_102555v010101p.pdf) (last accessed 15.12.2022)

8. Yong, S.K., Xia, P. and Valdes-Garcia, A. (2011), 60GHz Technology for Gbps WLAN and WPAN: from Theory to Practice, John Wiley & Sons, 278 p.