

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ,
ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО
“ _____ ” _____ 2022 р.

**ДИПЛОМНА
(КВАЛІФІКАЦІЙНА)
РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВР

Тема: «Мережа надширокопasmого доступу на базі технології UWB»

Виконавець: _____ Ліана ВАСИЛЕНКО
(підпис)

Керівник: _____ Денис БАХТІЯРОВ
(підпис)

Нормоконтролер: _____ Денис БАХТІЯРОВ
(підпис)

Київ 2022

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра телекомунікаційних та радіоелектронних систем

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО

“ _____ ” _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Василенко Ліани Олександрівни

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема дипломної (кваліфікаційної) роботи: «Мережа надширокосмугового доступу на базі технології UWB»

затверджена наказом ректора від «25» квітня 2022 р. №433/ст

2. Термін виконання роботи: з 23.05.2022 р. по 17.06.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи: існуюча телекомунікаційна мережа центру розваг та відпочинку

4. Зміст пояснювальної записки: концепція UWB, IEEE 802.15.3, персональні безпроводні мережі, проєкт безпроводної персональної мережі з використанням UWB

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: слайди презентації в програмному пакеті Microsoft PowerPoint

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розробити деталізований зміст розділів дипломної (кваліфікаційної) роботи	23.05.2022- 25.05.2022	Виконано
2	Вступ	25.05.2022	Виконано
3	Написання першого розділу	26.05.2022- 29.05.2022	Виконано
4	Написання другого розділу	30.05.2022- 02.06.2022	Виконано
5	Написання третього розділу	03.06.2022- 08.06.2022	Виконано
6	Усунення недоліків та захист дипломної роботи	09.06.2022- 17.06.2022	Виконано

7. Дата видачі завдання: “20” травня 2022 р.

Керівник дипломної роботи

(підпис керівника)

Денис БАХТІЯРОВ

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання

(підпис випускника)

Ліана ВАСИЛЕНКО

(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота «Мережа надширокопосмугового доступу на базі технології UWB» містить 64 сторінки, 21 рисунок, 7 таблиць, 25 використаних джерел.

ULTRA WIDE BAND, BINARY PHASE SHIFT KEYING, CONTENTION ACCESS PERIOD, CHANNEL-TIME ACCESS, DIRECT SEQUENCY ULTRAWIDE BAND.

Метою дипломної роботи є демонстрація основного призначення технології UWB та показ залежність як проявляються переваги та недоліки UWB в модельованих системах.

Об'єктом дослідження – передача коротких радіоімпульсів при пересиланні цифрової інформації в широкому частотному спектрі.

Предметом дослідження – технологія UWB.

Впровадження розробленого проєкту мережі центру відпочинку та розваг застосовується в будь-якому об'єкті таких масштабів. Технологія UWB є найефективнішою при розробці бездротових мереж персонального доступу.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ПЕРСОНАЛЬНІ БЕЗПРОВІДНІ МЕРЕЖІ	12
1.1. IEEE 802.15.3 – високі вимоги до швидкості	12
1.2. IEEE 802.15.3a – надвеликі швидкості	15
РОЗДІЛ 2. КОНЦЕПЦІЯ UWB	20
2.1. Потенційні можливості UWB	20
2.2. Співіснування UWB з іншими бездротовими технологіями	30
2.3. Моделі використання	33
2.4. UWB та перешкоди іншим системам	34
2.5. Використання та розвиток UWB компанією Apple	35
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТ БЕЗПРОВІДНОЇ ПЕРСОНАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ UWB	41
3.1. Опис об'єкта дослідження	41
3.2. Підбір необхідного обладнання	42
3.3. Моделювання каналу зв'язку UWB-мережі за допомогою програмного середовища MATLAB	47
3.4. Розрахунок дальності зв'язку	51
ВИСНОВКИ	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АФТ - антенно-фідерний тракт;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ВЧ – високочастотний;

КСД - коефіцієнт спрямованої дії;

КСХН - коефіцієнт стоячої хвилі за напругою;

ПК – персональний комп'ютер;

ПЗ – програмне забезпечення;

РЛС – радіорелейна станція;

РРСП ПВ - радіорелейна система передачі прямої видимості;

РЧ – радіочастотний;

СБЦС – система бездротового цифрового зв'язку;

НВЧ – надвисокочастотний;

СПД – мережу передачі;

ФІМ - фазоімпульсна модуляція;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

ЦШ – цифровий шум;

ЕМІ – електромагнітне випромінювання;

ЕМП – електромагнітне поле;

ATCRBS – Air Traffic Control Radio Beacon System (система радіомаяків для управління повітряним рухом);

BER – Bit Error Rate (імовірність помилки на біт);

4ВОК – 4 Binary Orthogonal Reying (модуляція на основі чотирьох ортогональних двійкових кодів);

BPSK – Binary Phase Shift Keying (двійкова фазова маніпуляція);

CAP – Contention Access Period (інтервал конкурентного доступу);

CSMA/CD – Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (метод множинного доступу з розпізнаванням несучої та виявлення колізій);

CTA – Channel-time Access (каналний інтервал);

DARPA – Defense Advanced Research Projects Agency (Агентство передових оборонних дослідницьких проєктів);

DME – Distance Measuring Equipment (обладнання для вимірювання відстаней);

DQPSK – Differential Quaternary Phase-Shift Keying (диференціальна квадратурна фазова маніпуляція);

DRM – Digital Rights Management (Цифрове Управління Правами);

DS-UWB – Direct Sequence Ultrawide Band (розширення спектра сигналу методом прямої послідовності);

DVI – Digital Visual Interface (цифровий відеоінтерфейс);

FCC – Federal Communication Commission (федеральна комісія зв'язку);

FH – Frequency Hopping (частотний стрибок);

LR-WPAN – Low-Rate Wireless Personal Area Network (низькошвидкісна бездротова персональна мережа);

MBOA – Multiband OFDM Alliance (мультисмуговий OFDM альянс);

MB-OFDM – Multiband Orthogonal Frequency Division Multiplexing (мультисмуговий ортогональний частотний поділ каналів з мультиплексуванням);

NTIA – National Telecommunications and Information Administration (Адміністрація Національної Телекомунікації та Зв'язку);

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing (мультиплексування з ортогональним частотним поділом сигналів);

PNC – Piconet Coordinator (керівний пристрій пікомережі);

PPM - Pulse Position Modulation (фазо-імпульсна модуляція);

QAM - Quadrature Amplitude Modulation (квадратурна амплітудна модуляція);

QoS – Quality of Service (якість обслуговування);

QPSK – Quadrature Phase Shift Keying (квадратурна фазова маніпуляція);

UWB – Ultra-Wideband (надширокосмуговий, надширокосмуговий зв'язок);

WPAN – Wireless Personal Area Network (бездротова персональна мережа).

ВСТУП

Актуальність теми. Більшість традиційних радіотехнічних систем працює у відносно вузькій смузі частот і як несучі коливання для передачі інформації використовує гармонійні (синусоїдальні) сигнали. Причина проста: синусоїда є власним коливанням LC контуру - найбільш елементарною і тому найпоширенішою електричною коливальною системою. А резонансні властивості цієї системи дозволяють легко виконувати частотну селекцію великої кількості інформаційних каналів, що працюють у загальному середовищі (простір, провідна чи оптична лінія зв'язку). Тому частотна селекція є сьогодні основним способом поділу цих каналів, а більшість радіотехнічних систем є вузькосмуговими і працюють у смузі частот набагато меншою, ніж їхня несуча частота. Вся теорія та практика сучасної радіотехніки заснована на цій особливості [1-15].

Добре відомо, що саме ширина смуги частот визначає інформативність радіотехнічних систем, так як кількість інформації, що передається в одиницю часу, прямо пропорційно до цієї смуги. Щоб підвищити інформаційні можливості системи, необхідно розширювати її смугу частот. Альтернативою до цього можливо лише збільшення часу передачі інформації.

У зв'язку з постійним збільшенням інформаційних потоків та інформатизацією суспільства ця проблема стає все більш актуальною як для радіозв'язку, так і для радіолокації. Актуальність проблеми і визначила швидкий розвиток технологій, які використовують надширокосмугові сигнали.

Сьогодні важко поскаржитися на відсутність продуктів та рішень у галузі бездротових комунікацій. Враховуючи існування стільникових телефонів, мереж 3-5G, Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth, передачі даних по лініях електропередач, наявність стандартів 802.11, навряд чи можна уявити, що буде запропоновано щось нове. Але протягом кількох останніх років слід широкого поширення набули бездротові технології - технології надширокосмугової передачі даних (Ultra Wideband, UWB) або імпульс-

ного цифрового бездротового зв'язку. В основному вона застосовуватиметься для доставки телевізійних програм, фільмів, ігор та багатомегабайтних файлів даних у «бездротових» будинках та офісах. UWB має більш високу швидкодію, ніж сучасні бездротові локальні мережі, і забезпечує формування ширококутових каналів передачі даних, що працюють на невеликих відстанях, не чутливих до зовнішніх перешкод.

Бездротова технологія UWB заснована на передачі коротких радіоімпульсів при пересиланні різної цифрової інформації в широкому частотному спектрі. Цей спектр знаходиться в діапазоні декількох ГГц. Тим самим кожен пристрій здатний генерувати, пересилати та отримувати мільйони імпульсів, які є логічним нулем або одиницею, тобто двійковою інформацією, а отже – кожен пристрій пересилає мільйони бітів інформації [1-25].

Перевагою даної системи - висока швидкість передачі з дуже малими енергетичними витратами, оскільки передача імпульсу вимагає посилення вихідного і вхідного сигналів. Єдиний недолік на сьогоднішній день – невелика відстань, на яку можна передавати дані за допомогою технології UWB.

Мета і завдання дослідження.

Метою дипломної роботи є демонстрація основного призначення технології UWB та показ залежності як проявляються переваги та недоліки UWB в модельованих системах. Для цього необхідно вирішити такі основні завдання:

- Вибрати тип модуляції та змодельовати канал зв'язку;
- Розрахувати дальність зв'язку;
- Провести оптимізацію мережі за дальністю за наявності обмежувальних факторів;
- Побудувати мережу, яка відповідає критеріям оптимізації.

Об'єктом дослідження – передача коротких радіоімпульсів при пересиланні цифрової інформації в широкому частотному спектрі.

Предметом дослідження – технологія UWB.

Практичне значення отриманих результатів.

Впровадження розробленого проєкту мережі центру відпочинку та розваг застосовується в будь-якому об'єкті таких масштабів. Технологія UWB є найефективнішою при розробці бездротових мереж персонального доступу.

Апробація отриманих результатів. Основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях:

- Науково-практична конференція «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем», м. Київ, 2022 р.

РОЗДІЛ 1

ПЕРСОНАЛЬНІ БЕЗПРОВІДНІ МЕРЕЖІ

1.1. IEEE 802.15.3 – високі вимоги до швидкості

Бездротові персональні мережі передачі – це технології, які в радіусі від десятків сантиметрів до 10 м без проводів забезпечують взаємодію інформаційних пристроїв. Усім знайомий та найпростіший приклад таких пристроїв – пульт дистанційного керування побутовою технікою, що діє в ІЧ-діапазоні. Незважаючи на примітивність виконуваних функцій, підтримувані цими пристроями протоколи обміну (їх кілька, найпоширеніший – RC-5) цілком відповідають найпростішим вимогам мережевих протоколів [1].

Активно розвиваються з 90-х років минулого століття, досконаліші технології – це бездротові радіомережі. Донедавна в області персональних бездротових мереж було два основних конкуренти – специфікації Bluetooth та HomeRF 2.0. Сьогодні з упевненістю можна сказати, що масового поширення набув саме Bluetooth, стандарт Bluetooth визнаний усім світовим співтовариством. У 2000 році між альянсом розробників Bluetooth та провідною в області бездротових мереж стандартизуючою організацією – Інститутом інженерів електроніки та електротехніки (IEEE) – було досягнуто згоди, відповідно до якої специфікація Bluetooth увійшла до стандарту IEEE 802.15.1 (опубліковано 14 червня 2009) Wireless Medium Access Control (MAC) та Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs)" (Специфікації контролю доступу до бездротового каналу та фізичного рівня бездротових персональних мереж) [1].

Найбільш поширене його застосування – заміна з'єднувального дроту між двома пристроями (наприклад, між гарнітурою та стільниковим телефоном, пристроями «розумного будинку»). Тому в одних програмах йому бракує швидкості обміну (наприклад, передача відеосигналу), в інших потрібні простіші та дешевші пристрої.

Щоб вирішити ці протиріччя та остаточно стандартизувати принципи організації персональних мереж передачі даних (СПД), робоча група IEEE 802.15, не задовольнившись стандартом IEEE 802.15.1, створила ще дві дослідні групи (Tg3 та Tg4). В результаті наприкінці вересня 2003 року було опубліковано два нових стандарти: IEEE 802.15.3 "Wireless Medium Access Control (MAC) та Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)" та IEEE 802.15.4 "Wire Medium Access Control (MAC) та Physical Layer (PHY) Specifics for LowRate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) - стандарти для високошвидкісної та низькошвидкісної персональних бездротових СПД, відповідно [1].

Стандарт IEEE 802.15.3 визначає роботу малої бездротової СПД – piconet. У стандарті IEEE 802.15.3 piconet – це звана ad hoc – система, у якій кілька незалежних пристроїв можуть безпосередньо взаємодіяти друг з одним. Як правило, розміри piconet не перевищують 10 м. Основні вимоги до неї – висока швидкість передачі даних, проста інфраструктура, легкість встановлення з'єднання та входження в мережу, засоби захисту даних та надання для певних типів даних гарантованих параметрів передачі (гарантія якості обслуговування, QoS) [1-3].

Piconet може об'єднувати кілька пристроїв, один із яких виконує функції керування (piconet coordinator – PNC). Стандарт також передбачає можливість формування так званих дочірніх пікоммереж та описує взаємодію між незалежними сусідніми piconet.

У piconet можливий обмін як асинхронними, так і ізохронними (потоківими) даними. До останніх відносяться, наприклад, звук та відео. У piconet інформаційний обмін заснований на послідовності суперкадрів [2].

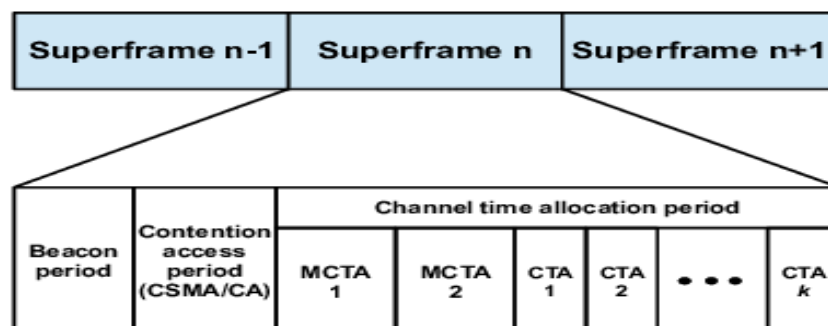


Рис. 1.1. Структура кадрів фізичного рівня IEEE 802.15.3

Кожний кадр (рисунок 1.1) включає керуючий сегмент (beacon), інтервал конкурентного доступу (САР) та набір часових інтервалів (каналів), призначених певним пристроям. РНС визначає межі всіх інтервалів та розподіляє канали між пристроями. Під час САР доступ до каналу відбувається на основі механізму контролю, що несе із запобіганням колізій – Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CA, як і в стандарті IEEE 802.11 [1]). У цей час передаються команди або асинхронні дані.

Канальні інтервали (СТА) РНС призначає кожному пристрою або групі пристроїв на запит з їхнього боку. У керуючому сегменті для кожного з них задається момент початку та тривалість. Для будь-якого пристрою призначення СТА означає, що жодний інший пристрій не може працювати на передачу. СТА можуть динамічно розподілятися у суперкадрі (для асинхронних та ізохронних даних) або бути фіксованими (тільки для ізохронних даних).

Специфікація фізичного каналу в документі IEEE 802.15.3 наведена лише в діапазоні 2400–2483,5 МГц. Вона передбачає п'ять допустимих швидкостей передачі [2] (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

Модуляція та швидкості в IEEE 802.15.3 у 2,4-ГГц діапазоні

Тип модуляції	Швидкість передачі даних, Мбіт/с
QPSK	11
DQPSK	22
16-QAM	33
32-QAM	44
64-QAM 8	55

Швидкість 22 Мбіт/с є базовою, її повинні підтримувати всі пристрої IEEE 802.15.3. Під час роботи на цій швидкості дані не кодуються. В інших випадках дані перед формуванням модуляційних символів кодуються за допомогою згорткового кодера з 3-розрядним зсувним регістром (так звана модуляція за допомогою гратчастого коду з 8 станами). При цьому в кодері до вихідного набору з 1/3/4/5 біт (при

QPSK/16QAM/32-QAM/64-QAM) додається кодовий біт з виходу трирозрядного зсувеного регістру [2-3].

Стандарт IEEE 802.15.3 вимагає, щоб пристрої могли працювати будь-якому з п'яти можливих частотних каналів (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2

Розподіл каналів у мережах IEEE 802.15.3

Номер каналу	Центральна частота МГц	Режим високої щільності	Режим сумісності з IEEE 802.11b
1	2,412	●	●
2	2,428	●	-
3	2,487	-	●
4	2,445	●	-
5	2,462	●	●

Причому передбачається два каналні плани – режим високої щільності (чотири канали в допустимому діапазоні), та режим сумісності з мережею стандарту IEEE 802.11b/g/n (три дозволені канали). Це означає, що кожен пристрій перед початком роботи сканує діапазон, знаходить вільні канали, визначає наявність мережі 802.11b/g/n [2].

1.2. IEEE 802.15.3a – надвеликі швидкості

Специфікацію IEEE 802.15.3 не встигли затвердити (а сталося це 12 червня 2003 року), як весь телекомунікаційний світ почав чекати на появу нового стандарту – IEEE 802.15.3a. Йдеться розробці принципів побудови рiсonet зі швидкістю обміну 110–480 Мбіт/с і від – до 1320 Мбіт/с. Тільки збільшуючи спектральну ширину каналу, переходячи в область так званого надширокосмугового зв'язку (СШП, UWB) можна досягти таких високих швидкостей. Після 14 лютого 2002 року, коли федеральна комісія зв'язку – Federal Communication Commission (FCC) США дозволила застосування над-

широкопasmових пристроїв усередині приміщень у діапазоні 3100–10600 МГц за максимальної щільності потужності випромінювання $7,41 \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц (- 41,3 дБм/МГц) у США це стало можливим [4].

У 2002 році для вироблення єдиного підходу до збільшення швидкостей обміну в мережах IEEE 802.15.3 утворилася дослідницька група Tg3a. До неї увійшли представники практично всіх найбільших напівпровідникових та телекомунікаційних фірм. Незабаром з'явилися дві конкуруючі пропозиції за технологією СШП-передачі - на основі ортогональних кодів (так званий множинний мультисмуговий доступ за допомогою ортогональних несучих, MB-OFDM) і шляхом розширення спектра сигналу методом прямої послідовності (DS-UWB). Першу пропозицію підтримувала більшість фірм на чолі з гігантами Texas Instruments та Intel (у березні 2003 року було створено спеціальне об'єднання MBOA – Multiband OFDM Alliance), табір прихильників другого очолили компанії Motorola та XtremeSpectrum. У MBOA входить 170 компаній, серед яких – 9 із 10 найбільших напівпровідникових компаній (крім TSMC). За ухваленими в комітеті IEEE 802 правилами, для того щоб затвердити стандарт, за запропонований варіант мають проголосувати не менше 75 відсотків членів робочої групи. Незважаючи на чисельну перевагу прихильників MB-OFDM, на голосуваннях їм не вдалося набрати 75 відсотків голосів від загальної кількості компаній, що працюють над стандартом IEEE 802.15.3a. Причин тут кілька, можливо, одна з основних причин у технології MB-OFDM. Суть її в тому, що весь роздільний діапазон ділиться на лінії шириною 528 МГц. У стандартному режимі передбачено три смуги, а в розширеному – сім, кожна смуга, у свою чергу, розбивається на 128 частот, що піднесуть, з кроком 4,125 МГц. З них використовується 122: 100 піднесних для модуляції даних, 12 піднесних – пілотні та ще 10 – захисні. Кожна піднесуча модулюється за допомогою QPSK. Один OFDM-символ містить 100 або 200 кодованих біт (100 у разі, коли однаково модулюються дві піднесучі, симетричні відносно центральної). Період проходження символів – 312,5 нс. Досі все відповідає звичайній OFDM. Мультисмуговість означає, що наступний символ може передаватися в іншій частотній смузі, жорстко визначеної схеми для кожного логічного каналу (передбачається чотири таких канали) [6].

Частотно-часовим кодом називають послідовність переходу з однієї лінії на іншу. Передбачено поки що чотири такі коди (таблиця 1.3)

Таблиця 1.3

Частотно-часові коди

Номер логічного каналу	Режим трьох смуг	Режим семи смуг
1	1→2→3→1→2→3	1→2→3→4→5→6→7
2	1→3→2→1→3→2	1→7→6→5→4→3→2
3	1→1→2→2→3→3	1→4→7→3→6→2→5

Крім переходу з частоти на частоту передбачено режим, коли один символ може передаватися кілька разів (два або чотири). Наприклад, код 1→2→3→1→2→3 означає, що перший OFDM-символ передається у смугах 1 та 2, другий OFDM-символ – у смугах 3 та 1, третій – у смугах 2 та 3. Структура кадрів фізичного рівня відрізняється від описаної структури стандарті IEEE 802.15.3 – у яких передбачені каналні інтервали кожного з пристроїв, тобто. в той самий момент інформацією можуть обмінюватися лише два пристрої. Кадр складається з преамбули (набору синхронізуючих послідовностей), заголовка (керуюча інформація) та поля даних. Преамбула та заголовки завжди транслюються з найменшою з можливих швидкостей – 55 Мбіт/с. Наявність чотирьох логічних каналів означає, що в безпосередній близькості можуть працювати принаймні чотири рiсonet. Для цього кожному логічному каналу відповідає унікальний вид синхропослідчості у преамбулі [6].

Пропонується таким чином комбінація OFDM і відомого механізму частотних стрибків (FH). В результаті, формується спектр швидкостей від 55 до 480 Мбіт/с, залежно від швидкості кодування та числа повторів символів. Змінюючи вид модуляції, можна досягти і більших швидкостей – так, застосування 16-QAM за тієї ж схеми кодування дасть вже $480 \times 2 = 960$ Мбіт/с. Інший шлях – використання передачі одночасно трьох діапазонів. Тоді при модуляції QPSK та швидкості згорткового кодування $3/4$ досягається швидкість обміну $480 \times 3 = 1440$ Мбіт/с.

Метод частотних стрибків – не найефективніший з погляду використання спектрального діапазону. Опоненти MB-OFDM вказують, що побічні даної технології

у своїх вимірах середньої потужності випромінювання передавача усереднюють її за часовим інтервалом близько 1 мс. Цей час відповідає тривалості трьох символів. Насправді, при використанні механізму повторів (і при вимірах), символ в одному субканалі за цей час передається лише один раз. В результаті щільність потужності випромінювання при роботі передавального пристрою може перевищувати допустимі мінус 41,3 дБм/МГц. Оскільки йдеться про сигнал зі смугою понад 500 МГц, це є серйозною проблемою.

Для розширення спектру прихильники технології DS-UWB пропонують класичний метод прямої послідовності. У цьому кожен біт замінюється спеціальною кодовою послідовністю довжиною до 24 біт. Передбачено два види модуляції – двійкова фазова (BPSK, один біт на символ) та так звана 4ВОК-модуляція (модуляція на основі чотирьох ортогональних двійкових кодів). Відомий варіант ВОК - метод СБК, основний вид модуляції в стандарті IEEE 802.11b [1]. 4ВОК - фактично варіант квадратурної модуляції, один 4ВОК-символ містить 2 біти.

Весь діапазон мовлення розбитий на дві зони – 3,1-4,85 ГГц (нижній діапазон) та 6,9-9,7 ГГц (верхній діапазон). У кожному діапазоні передбачено по шість каналів *risonet* (з кроком 39 МГц у нижньому діапазоні, починаючи з 3900 МГц, та з кроком 78 МГц – у верхньому, починаючи з 7800 ГГц). Обов'язковими для підтримки кожним пристроєм є лише чотири смуги нижнього діапазону з центральними частотами 3939, 3978, 4017 і 4056 МГц, інші смуги – додаткові. Частота проходження модуляційних символів у кожному каналі дорівнює 1/3 його центральної частоти. Залежно від швидкості попереднього кодування, виду модуляції та довжини кодової послідовності швидкість передачі даних може становити 28, 55, 110, 220, 500, 660, 1000 та 1320 Мбіт/с.

Зазначимо, що суперечки прибічників двох різних підходів до реалізації СШП- *risonet* тривали не один рік, виробники НВІС готові були почати випуск необхідних компонентів (а деякі нетерплячі почали), і ситуація мала незабаром вирішитися. Тим більше, що вже з'явилися пропозиції, як об'єднати ці дві технології і без особливих витрат виробляти двомодові пристрої, що підтримують і МВ-OFDM, і DS-UWB.

Проте, створена для стандартизації технологій ультраширокопasmового зв'язку (UWB), робоча група IEEE 802.15.3a, нарешті дійшла єдиної думки – що настав час само розпускатися. І на початку січня 2006 року, так і не затвердивши стандарту UWB, витративши на цю діяльність майже три роки та чимало грошей платників податків, під час голосування робоча група IEEE 802.15.3a сама розпустилася.

Протягом трьох років діяльності робочої групи точилися спекотні суперечки навколо того, який варіант стандартизувати: тобто запропонований (тоді ще – Motorola Semiconductor) Freescale DS-UWB, варіант із використанням всього частотного діапазону «єдиним шматком» або запропонований WiMedia Alliance (до складу якого входять Intel, Staccato, Wisair і Alereon) MBOA-UWB, варіант з розбиттям на піддіапазони 528 МГц та використанням технології мультиплексування по ортогональних несучих (OFDM). У першому випадку пропускна здатність могла б досягти 1,5 Гбіт/с, але на дистанції всього до 3 м, у другому – до 480 Мбіт/с, але дальність дії могла б бути до 10 м. (Якщо бути точним, то максимальна пропускна здатність у першому випадку досягається на дистанції до 1 м, у другому – до 3 м. Пропускна спроможність на максимальній дистанції становить 480 та 110 Мбіт/с, відповідно) [6].

Крім цього, були ще два проміжні варіанти – з ширшими піддіапазонами, але тільки у MBOA-UWB і DS-UWB були хоч якісь шанси на стандартизацію в IEEE. Жоден із варіантів так і не зміг зібрати 75 відсотків голосів членів комісії, необхідних для затвердження як стандарт. Проте за розпуск робочої групи проголосувало 94,7 відсотків членів – приголомшлива одностайність.

Тим не менш, технологія, не утвердившись у самостійний стандарт, продовжує своє існування, що виявляється у бажанні великих виробників випускати обладнання, що працює за її концепцією.

РОЗДІЛ 2

КОНЦЕПЦІЯ UWB

2.1. Потенційні можливості UWB

Надширокосмуговий зв'язок UWB є способом передачі інформації, яка використовує високочастотні імпульси з малою енергією. Оскільки інформаційна місткість UWB значно більша порівняно з іншими поточними технологіями, що розвиваються, UWB має великий потенціал. Це дозволяє реалізовувати більш швидкодіючі бездротові мережі з немислимою в минулому пропускнуою спроможністю (рисунок 2.1). Рухливість, що підштовхує дослідження в області надширокосмугового зв'язку, очевидна - це головний пріоритетний напрямок розвитку всіх без винятку бездротових технологій - підвищення пропускнуої спроможності бездротового каналу зв'язку [3].

Швидкість 1000 Мбіт/с	IEEE 802.15	IEEE 802.11	IEEE 802.16	3GPP
100 Мбіт/с	UWB 802.15.3			
10 Мбіт/с		Wi-Fi 802.11.a/g	WiMAX 802.16 (802.16-2004 і 802.16e)	
1 Мбіт/с		Wi-Fi 802.11b		3G
	Bluetooth 802.15.1 ZigBee 802.15.4			2.5G
	<1 м	10 м	100 м	>30 км
	PAN	LAN	MAN	WAN

Рис. 2.1. Порівняльна діаграма максимальної дальності та пропускнуої спроможності різних технологій бездротового зв'язку

Ще в 1940 році почалися дослідження в області надширокосмугового радіозв'язку, а з 1960 по 1990 роки ця технологія використовувалася військовими в радарях, передачі зображень та високозахищених прихованих комунікаційних системах. У 1994 році, поки інформація не була опублікована, ці технології залишалися секретними і тривалий час фінансувалися урядом США. З цього часу технологія набула комерційного розвитку завдяки наступним розробкам [4]:

а) Федеральна комісія з комунікацій США FCC 14 лютого 2002 дала обмежений дозвіл на використання надширокосмугового обладнання. Це започаткувало процес комерціалізації технології UWB на безліцензійній основі для трьох різних категорій пристроїв: систем передачі зображень, пересувних радіолокаційних станцій та комунікаційних та вимірювальних систем (які на даний момент і розвиваються найшвидшими темпами). Ці нормативи для забезпечення, що не вимагає отримання ліцензії функціонування пристроїв, були пізніше (13 лютого 2003 року) переглянуті комісією FCC з незначними розширеннями.

б) Рушійною силою, що підштовхує розвиток принципово нової технології надширокосмугового зв'язку, послужив той факт, що досягнення в галузі кремнієвої технології поступово почали підходити до своєї практичної межі і постало питання пошуку принципово нових рішень, які дозволили б відкрити новий потенціал для подальшого зростання. Другим вирішальним фактором стало бурхливе зростання світового ринку бездротових рішень, що вимагають все більшої надійності та пропускну здатності від бездротових інформаційних каналів зв'язку.

Стандарт дозволяє обмінюватися зі швидкістю 110 Мбіт/с для відстаней аж до 10 м. Проблеми тут пов'язані, крім іншого з тим, що цей частотний діапазон використовується військовими для цілей радіолокації. Використання широкої смуги дозволяє теоретично UWB забезпечити швидкість обміну до 480 Мбіт/с на відстані 3 м. (Рисунок 2.2).

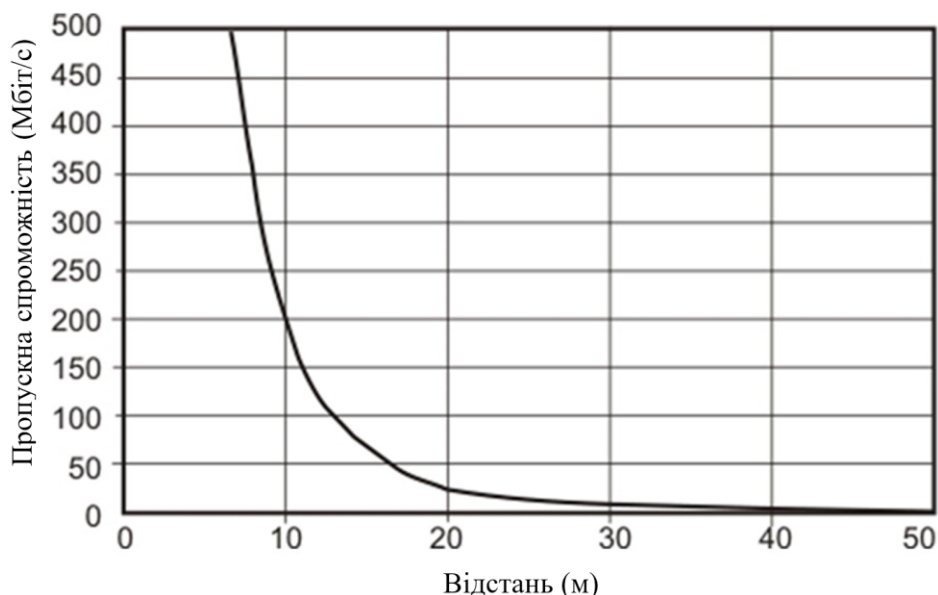


Рис. 2.2. Залежність пропускної спроможності UWB від відстані

У стандарті UWB використовується найширший спектр з усіх технологій передачі даних діапазон частот від 3 до 10 ГГц. В ефір передається не сильне гармонійне коливання, як завжди, а надкороткий імпульс тривалістю від 0,2 до 2 нс, а вся "трансляція" тягнеться від 10 до 1000 нс. Щоб не заважати іншим сигналам, що працюють на тій же частоті, використовується режим модуляції Time Hopping (стрибок часу) - зміщення випромінюваного імпульсу в часі за псевдовипадковим законом, що дозволяє розподілити енергію у широкій смузі частот, а сам сигнал зробити схожим на шум. У UWB передавачі відсутня необхідність використовувати підсилювач потужності та ланцюга перетворення частоти. Комутуючі елементи повинні бути стабільними та забезпечувати високу швидкодію (10-100 пс). У широкосмуговому діапазоні потрібно набагато менше витрат енергії (оскільки ефір відправляються імпульси з меншим ставленням сигнал/шум), ніж із передачі вузькосмугового сигналу. Тому UWB-чіпи виявляються економічнішими у роботі, ніж чіпи Bluetooth або Wi-Fi, всього близько 0,05 мВт; при цьому вони досить дешеві.

Завдяки широкій смузі частот можна досягти високої швидкості передачі даних: від 110 Мбіт/сек і вище.

Ще один мінус нововведення в тому, що серед розробників виникло дві течії, що посилено один з одним борються. Ініціатор запровадження стандарту UWB Intel

виступала за застосування OFDM-UWB. Таке рішення покликане знизити спотворення у кожному піддіапазоні та трохи збільшити дальність зв'язку. У цьому випадку вдається досягти максимальної швидкості 480 Мбіт/сек на відстані 3 метри. Можливо, Intel так посилено "пробиває" цей варіант для того, щоб уніфікувати UWB і USB 3.0, а згодом впровадити UWB в стандарт Wireless USB, що розробляється. Надалі компанія сподівається збільшити дальність до 50 і навіть 100 метрів, тоді USB справді відійде на другий план.

Хлопці з другого крила, очолюваного Motorola, борються за варіант DSUWB, при якому весь спектр використовується як єдине ціле, що дозволяє досягти фантастичної швидкості в 1,5 Гбіт/сек на тих же трьох метрах віддаленості.

Зазначимо, що ця магічна цифра три метри також присутня у представленому на IDF варіанті Intel для максимальної пропускної здатності в 480 Мбіт/с. Відмінність у показниках швидкості між варіантами Intel і Motorola таки пояснюється тим, що в першому випадку частотний діапазон розбивається на шматки, а в другому немає. Зауважимо також, що саме число 480 Мбіт/с обрано не випадково – ця швидкість обміну даними відповідає специфікаціям USB 2.0. Сподіваючись на універсальність технології, Intel і підтримує варіант MBOA-UWB (тут необхідно подолати низку труднощів, пов'язаних із сильною взаємодією ширококутвого сигналу 3-10 ГГц з усім, що трапляється у його шляху стінами, деревами, людьми і т. д.). Але якщо це вдасться, стандарт зможе конкурувати з бездротовими технологіями сімейства 802.11. Підсумувавши, можна сказати, що Intel, з одного боку, хоче бачити технології UWB як основу для використання у стандарті Wireless USB, а з іншого боку, не хоче перетворення UWB на вузькоспеціалізовану технологію (як цього бажає Motorola).

У будь-якому випадку, рішення як Intel, так і Motorola мають достатню пропускну здатність для того, щоб обмінюватися потоками мультимедійних даних в режимі реального часу між безліччю "зав'язаних" бездротову мережу пристроїв, а також "визити" в інтернет і одночасно підключати до ПК периферійні гаджети. Ще одна перевага UWB полягає в тому, що сигнали мають хорошу стійкість до багатопромене-

вого загасання, яке виникає при відображенні хвилі від стін, стелі та подібних великогабаритних артефактів. Так що об'єднані в мережу пристрої можуть бути в різних кімнатах і на різних поверхах.

Противники впровадження UWB намагалися переконати американську Федеральну комісію зв'язку не дозволяти виводити з ринку системи, засновані на передачі сигналу в надширокому діапазоні частот. Тому що це випромінювання як може заважати нормальній роботі систем GPS, стільникових мереж (на це особливо наголошували мобільні оператори) і військових радіолокаційних станцій. Але все ж таки розробники IEEE802.15.3а змогли довести, що імпульси UWB надзвичайно малопотужні і жодних збоїв за собою не спричинять. У результаті FCC дозволила спільне функціонування Ultra Wide Band з вже працюючими програмами в одній смузі частот, але все-таки наклала деякі обмеження за потужністю та частотами.

Головна перевага бездротового зв'язку – відсутність ненадійних проводів, що вічно заважають, не потребує пояснення. Друга головна перевага UWB – у великій швидкості передачі даних, причому, якщо пофантазувати, то легко можна уявити, як на основі нинішньої технології UWB у майбутньому будуть створені інтерфейси зв'язку, з якими провідні стандарти просто не зможуть конкурувати через обмежену ширину смуги пропускних частот. Пропускна здатність технологій UWB, в будь-якому з описаних варіантів (Intel і Motorola), достатня для обміну потоками мультимедійних даних у режимі реального часу між безліччю пристроїв у домашній мережі – MP3-програвачами, відеомагнітофонами, DVD-пристроями, не кажучи вже про організацію доступу інтернет з мобільного терміналу або про одночасне підключення безлічі периферійних пристроїв до персонального комп'ютера (ПК) [5].

Згадаймо, скільки різних пристроїв оточує нас та наших друзів помічників – ПК. Як відомо, більшість периферійних пристроїв пов'язані з ПК з допомогою провідних послідовних інтерфейсів здебільшого, з допомогою USB. Зв'язок одних периферійних пристроїв з мультимедійними гаджетами, скажімо, принтера з цифровою камерою, також, як правило, відбувається за допомогою стандарту USB, який недаремно називається універсальним. Відповідно до історичної традиції, при зв'язку по послідовному каналу зв'язку один пристрій виступає у ролі ведучого (хоста), другий у

ролі веденого (клієнта). Однак як бути тому ж принтеру, якому в одній ситуації доводиться бути хостом, а в другій клієнтом, або MP3-програвачеві, для завантаження запису в який часто доводиться використовувати комп'ютер як проміжний пункт переважки? Стандарт USB On-The-Go (OTG) [7] вирішує цю проблему, з Wireless USB і UWB користувачі раз і назавжди забудуть про цю історичну спадщину провідних послідовних інтерфейсів. За допомогою технологій широкосмугового зв'язку мультимедійні пристрої, що знаходяться в межах досяжності один одного (а 10 метрів – цілком достатня дистанція, щоб вмістити все обладнання в межах однієї кімнати), зможуть об'єднуватися в високошвидкісні мережі і обмінюватися файлами.

Для мобільних пристроїв важливим є той факт, що в широкому спектрі потрібно набагато менше витрат енергії, ніж для передачі вузькосмугового сигналу через різний рівень сигналу: у широкому спектрі можна використовувати шумоподібні сигнали з малим сигнал/шум. Тому (як очікується), чіпи UWB будуть економічнішими, ніж, наприклад, чіпи Bluetooth LE, володіючи при цьому набагато більшою пропускнуною здатністю і дозволяючи працювати довше.

Всі UWB-системи поділяються на три групи залежно від дальності зв'язку та швидкості обміну інформацією. Перша група - це низькочастотні рішення (до 100 кбіт/сек) призначені до виконання телеметричних завдань і здатні забезпечувати високу скритність передачі на відстані до кількох кілометрів за малої потужності випромінювання. Середньошвидкісні мають радіус дії від 10 до 100 м і можуть становити серйозну конкуренцію всім версіям WiFi a/b/g/n. Швидкість даних варіюється від 1 до 100 Мбіт/сек. Високошвидкісні системи мають радіус дії до 10 метрів, зате швидкість перевищує 100 Мбіт/сек. Ця версія більш економічна, ніж Bluetooth LE, вона ж найперспективніша для розробників.

Власне, перспективи величезні завдяки великій кількості переваг над вузькосмуговими та простими широкосмуговими системами зв'язку [12]. Насамперед слід зазначити головне – великі швидкості передачі; за пропускнуною спроможністю UWB змагається з FireWire (IEEE 1394). Другий пункт – висока завадозахищеність: вплив вузькосмугових перешкод надто незначний, плюс сукупна тривалість передавальних імпульсів становить близько 1 % від часу трансляції, отже 99 % це просто шум, який

потім " вирізається " . По-третє, слід згадати високу стійкість зв'язку за умов багато-променевого поширення радіохвиль. Звичайні сигнали багаторазово відбиваються від стін і такою собі кашею прилітають на антену приймача. У UWB ця проблема вирішена: наноімпульс, що передається, встигає загаснути ще до того, як до антени добереться його "відбиття". Четверта перевага – чудова захищеність від перехоплення. Завдяки механізму передачі імпульсів всякі шпигунські приймачі та детектори сприймають UWB-випромінювання як сторонній шум та випадкові перешкоди. П'ятий плюс впливає з четвертого – сигнали UWB-систем мало створюють видимих перешкод інших пристроїв. Шоста перевага - можливість багаторазового повторного використання однієї і тієї ж лінії радіочастот різними радіосистемами. Це означає, що: оскільки сигнал UWB не випромінюється в якомусь конкретному частотному діапазоні, а поширюється на ділянці спектра, то надширокосмугові передавачі можуть ділити ту саму частоту з іншими системами – як цивільними, так і військовими. Оскільки в кожній точці спектра радіочастот потужність UWB-сигналу вкрай мала (не перевищуючи рівень побічних випромінювань мобільників, телевізорів і т.д.), всі рішення на основі надширокосмугового зв'язку можуть використовуватися без ліцензування. Черговий, сьомий пункт – висока проникаюча здатність UWB-сигналів, завдяки чому зв'язок можна здійснювати у місцевостях зі складним рельєфом – між будинками та навіть у товщі землі! Восьмий плюс: завдяки надкоротким імпульсам з'являється можливість визначати відстань до об'єктів з точністю до кількох сантиметрів! Дев'ята перевага: через низьку випромінювану потужність мало того, що забезпечується скритність передачі радіосигналів і практично зникає ймовірність перехоплення інформації, так ще й споживається при цьому мінімум енергії. Десятий пункт -кінцеві UWB пристрої гранично прості як по виготовленню, так і по принциповій конструкції - немає підсилювача потужності, гетеродина, елементів частотної фільтрації, а сигнал, що формується, відправляється відразу на антену, тобто передача здійснюється прямо з плати. Просто та дешево. Нарешті, у UWB систем дуже висока щільність передачі даних. Цей показник – один із найважливіших, що характеризує ефективність систем бездротового зв'язку. Чим вище сумарна швидкість передачі на квадратний

метр робочої зони, тим краще. У Bluetooth цей показник на рівні 30 кбіт/сек/м², UWB – до 30 Мбіт/сек/м².

Застосування UWB-систем не обмежується лише офісними потребами, варіантів використання СШП безліч [16]:

1) Радіорелейні мережі підземного зондування. Сигнали проникають на глибину до 7 метрів і дозволяють виявляти підземні поховання - чи це людські останки, отруйні відходи або поклади мін, які не перебувають за допомогою звичайних РЛС.

2) Системи радіоспостереження (низькочастотні – до 960 МГц, середньочастотні – від 1,99 до 3,1 ГГц та високочастотні – до 10,6 ГГц). За допомогою цієї програми запросто можна з достатньою точністю визначати місце розташування людей під завалами, тріщини в дорожньому покритті, неметалеві труби в стінах.

3) Медичний моніторинг на основі UWB набагато ефективніше дає змогу зняти кардіограму.

4) Відеосистеми охоронної сигналізації дозволяють приховано контролювати територію - навколо зони, що охороняється, на відстані 100-150 метрів створюється невидимий радіоекран, що фіксує будь-яке проникнення - будь то миролюбна кішка або зла людина.

5) Автомобільні радары працюють на частотах 22-29 ГГц - з ними можна практично наосліп перебудовуватися з ряду в ряд і паркуватися заднім ходом.

6) Нарешті, що внутрішньоофісний зв'язок (все ті ж 3,1 -10,6 ГГц). Можна законектіть ноутбуки, принтери, PDA та інші офісні пристрої.

Стало відомо про появу двох альтернативних чіпів – рішення компанії Wisair, представленого в ході японського IDF, та компанії Freescale, дочірнього підприємства Motorola. За твердженнями Wisair і Intel, їхнє рішення вже тоді забезпечувало пропускну здатність 480 Мбіт/с на дистанціях в 3 м і до 110 Мбіт/с на дистанціях в 10 м. Чіп Freescale був поки не здатний забезпечити 1 Гбіт/с, пропонуючи лише швидкість передачі даних 110 Мбіт/с.

Говорячи про продукцію, слід згадати також, що першою компанією, яка отримала сертифікацію FCC на свій UWB-виріб, стала Freescale Semiconductor, яка нещодавно була перейменована на таку з Semiconductor Products Sector of Motorola. Чіпсет

XS110 використовує протокол DS-UWB (що і слід очікувати все-таки дітище "Мотороли"), який, як відомо, в даний час є одним із кандидатів на стандарт IEEE 802.15.3 для мереж WPAN. Використовуючи протокол DS-UWB, XS110 підтримує обмін даними на швидкості до 110 Мбіт/с за мінімального енергоспоживання. На конгресі 3GSM взимку цього року Freescale Semiconductor представила учасникам мобільний телефон Samsung Electronics, який підтримує технологію UWB. Для демонстрації вражаючих можливостей технології UWB стендисти Freescale передали зроблену вбудованою фотокамерою телефону знімок на розміщений поблизу ноутбук. На завершення цієї операції потрібно менше однієї секунди/ За заявою представників компанії, телефон може також запросто передавати MP3-файли, дані з адресної книги та іншу об'ємну інформацію. Ці процеси показувалися на виставці постійно та безперервно – швидкість та можливості вражали навіть фахівців.

Крім тих компаній, що складають кістяк двох "фракцій" стандарту UWB, у розробку кінцевих пристроїв втягнулася японська компанія Sanyo. Керівництво заявило про те, що їх чіпсет UWB може застосовуватися, наприклад, у цифрових камерах, LCD-проекторів, мобільних телефонах, DVD-рекордерах і телевізорах. "Жучок" підтримуватиме багатосмугову OFDM передачу та забезпечуватиме пропускну здатність до 480 Мбіт/с. За даними компанії, дана модель включає малошумний підсилювач (МШУ), що підтримує діапазон 3,1-10,6 ГГц, а також високошвидкісний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) і каналний процесор зі зниженою споживаною потужністю. МШУ вбирається у рівень шуму в 2,5-3 дБ, а АЦП здатний обробляти понад 1 млрд. семплів на секунду. Низьке енергоспоживання мікросхем дозволяє припускати сумарну споживану потужність гаджета лише на рівні близько 300-500 мВт. Передбачається, що початкова ціна модуля буде близько 14 доларів.

Перспективи розвитку самі собою вимальовуються у мозку. Консалтингова компанія ASIS заявляє, що в найближчі кілька років зростання UWB ринку складе 285% на рік і вже у всьому світі буде 274 млн UWB-гаджетів, з яких 59 млн зможуть працювати на великих радіусах.

Загалом, UWB представляє чудове вирішення проблем для більшості досліджень сьогоденної бездротової індустрії та додатків. Розглянемо їх докладніше.

Немає обмежень високочастотного (ВЧ) діапазону. Обмеження доступності ВЧ спектру перешкоджають еволюції та розростанню бездротових технологій. Технологія UWB не використовує ВЧ несучі, що дає безліч нових переваг та можливостей. З іншого боку, сьогодні ми спостерігаємо таку картину розвитку технологій апаратного забезпечення, при якій рівень інтеграції однокристальних рішень значно вищий, ніж було в недалекому минулому, і постійно зростає. Тому передбачається, що апаратні рішення UWB мають бути більшими, ніж просто пристроями PHY або навіть пристроями PHY+MAC. Такі апаратні рішення повинні включати повний трансівер UWB разом з гнучко настроюваним контролером вводу-виводу в одному пристрої, що дозволяє досягти легкої інтеграції електронних компонентів UWB в широкий спектр додатків.

Швидкість. Той самий пристрій UWB можна масштабувати за критерієм швидкості у величезному діапазоні, що просто необхідно для додатків з дуже низькою швидкістю (обумовленою необхідністю підтримки низької потужності), таких як, наприклад, кишенькові вимірювальні прилади.

Безліч каналів. UWB може одночасно підтримувати сотні каналів (на відміну від трьох у стандарті 802.11b та десяти у 802.11a). Це можна порівняти з водінням: по багаторядному шосе водити набагато зручніше і краще, ніж одноколісною дорогою.

Одночасна робота мереж. Технологія UWB може функціонувати одночасно як персональна, локальна та глобальна обчислювальна мережа (Wide Area Network, WAN). Це еквівалентно конвергенції технологій Bluetooth, 802.11 та 4G в єдину мережу з одним пристроєм. Сьогодні дуже гостро стоїть це питання і тому дуже актуальне зараз і буде актуальним у майбутньому.

Найменша ціна та складність. Так як пристрої, що використовують високочастотний спектр, вимагають реальної радіоприймальної системи, і тому вони мають складнішу конструкцію та компоненти, їх ціна вища, і вони споживають значно більшу потужність. Крім того, вони менш надійні, ніж пристрої UWB, які працюють на рівнях нижче рівня шумів традиційних радіосистем, малопотужні, невибагливі до параметрів обладнання та потребують лише кількох зовнішніх компонентів.

Глобальна сумісність. Варіації у призначенні радіочастотного спектра в різних країнах перешкоджають глобальній сумісності пристроїв, що використовують радіочастотний спектр. Без таких обмежень технологія UWB дає передумови існування у майбутньому глобальної сумісності.

Велика захищеність. Крім специфічної природи UWB-сигналу та обладнання, пристрої UWB використовують потужність сигналу практично на рівні шуму, що забезпечує захист інформації, що передається - сигнали UWB практично неможливо приймати нецільовою системою, особливо на деякому віддаленні від функціонуючого пристрою. Цей факт робить зв'язок UWB, можливо, найбільш безпечним з усіх бездротових систем зв'язку з точки зору захисту від несанкціонованого доступу до інформації.

Дешево та точно визначення розташування. Технологія UWB пропонує недороге рішення для систем позиціонування з високою точністю при роздільній здатності менше сантиметра. Для безлічі додатків позиціонування, а також короткодистанційних людино-машинних інтерфейсів це дає великий потенціал.

Дотримання умов прямої видимості не вимагається. Завдяки фундаментальним фізичним основам роботи UWB, технологія не вимагає дотримання умов прямої видимості, яка є основною вимогою для отримання кращих характеристик поширення радіохвиль, що накладається традиційними бездротовими радіосистемами.

2.2. Співіснування UWB з іншими бездротовими технологіями

Оскільки сигнали UWB не інтерферують як один з одним, так і з традиційними радіочастотними несучими, технологія дає величезні комунікаційні можливості через створення нового, відокремленого комунікаційного середовища. Вона може мирно співіснувати з іншими бездротовими технологіями, що функціонують.

Конвергенція додатків обміну даними, розважальних та мобільних комунікаційних систем усередині будинку створює нові потреби для поєднання безлічі різно-

планових пристроїв у єдину мережеву архітектуру, здатну підтримувати та інтегрувати унікальні вимоги кожного сектора додатків. З цією метою промислові консорціями, такі як альянси Digital Living Network та WiMedia створили посібники з розробки та стандарти, що описують можливості взаємодії. Програми Wireless 1394, Wireless USB та системи на базі IP-транспорту вже зараз знаходяться на завершальній стадії розробки та ґрунтуються на технології UWB та платформі від WiMedia [17, 18, 19].

Виробники мікросхем та кінцевих продуктів споживчої електроніки, персональних комп'ютерів та мобільних пристроїв як оптимальне рішення для систем UWB підтримують метод MB-OFDM. MBOFDM демонструє деякі технічні переваги, особливо гнучкість щодо використання частотного спектру, що дозволить досягти UWB повсюдного використання.

Сьогодні визначення надширокосмугової системи згідно з FCC — це будь-яка технологія радіопередачі з спектром, що займає, понад 20 % від центральної частоти або мінімум 500 МГц. Розуміючи переваги нової технології, які можуть виявитися при її використанні у споживчій електроніці, FCC спеціально для цих цілей ліцензувала радіочастотний спектр від 3,1 до 10,6 ГГц. Додатковий спектр доступний для використання у медичних, наукових організаціях, а також для пожежників та служб порятунку.

Для передачі інформації радіо інтерфейс UWB вимагає використання повного діапазону шириною 7,5 ГГц або доступну його частину. FCC визначила спеціальну мінімальну ширину смуги пропускання частот 500 МГц при рівні -10 дБ. Ця мінімальна ширина смуги частот спільно з іншими вимогами FCC, по суті, спрямована на захист обладнання, що працює вище за цей частотний діапазон. Гнучкість, що забезпечується правилами FCC, значно розширює можливості комунікаційних систем UWB. Розробники вільні у використанні комбінацій піддіапазонів шириною 500 МГц всередині частотного спектру, для оптимізації якості системи, потужності та складності конструкції, що розсіюється. Системи UWB можуть підтримувати таку ж низьку потужність передачі, як вони використовували повну смугу пропускання. Це досягається шляхом чергування символів у цих піддіапазонах.

Інформація може бути передана традиційним імпульсним способом з урахуванням однієї несучої, чи складнішими способами з безліччю несучих. Імпульсні системи на основі однієї несучої передають сигнал за допомогою модуляції фази дуже тонкими імпульсами. У той час, як ця покращена технологія дозволяє використовувати дуже просту конструкцію передавача, вона має кілька недоліків. Серед них такі: складно зібрати достатню енергію сигналу в типових умовах (де присутня безліч поверхонь, що відображають), використовуючи всього один радіочастотний ланцюг; вимоги до часу перемикавання можуть бути дуже суворими як приймача, так передавача; ланцюги обробки прийнятого сигналу дуже чутливі до флуктуацій групової затримки, що вносяться компонентами аналогових зовнішніх каскадів; ширина частотного спектра може спеціально звужуватися, для зниження вузькосмугової інтерференції.

Оскільки частотний спектр для пристроїв UWB є неліцензійним, всі бездротові пристрої, що розділяють між собою цей спектр, повинні співіснувати один з одним без проблем. Незалежно від поточного стану або майбутнього розподілу частот та обмежень щодо випромінювання у різних регіонах світу, MB-OFDM здатна забезпечувати локальні (в географічному плані) частотні обмеження за допомогою динамічного відключення певних тонів або каналів програмним способом. Цієї гнучкості не надають конкуруючих рішень, що забезпечує величезний потенціал для прийняття систем UWB по всьому світу.

Системи MB-OFDM спеціально розроблені з метою зниження складності реалізації. Єдиний ланцюг аналогового приймача спрощує загальну архітектуру всієї системи і тому роздільна здатність ЦАП/АЦП і внутрішня точність цифрового base band-контролера може бути значно знижена. Відносно великі відстані між несучими також послаблюють вимоги до фазових шумів у ланцюгах синтезу частот та покращують стійкість до помилок синхронізації [20].

Щоб забезпечити захищеність, еквівалентну тій, яка потрібна бездротовій технології при збереженні прозорості роботи для кінцевого користувача, механізми безпеки та захисту інформації реалізуються на кількох рівнях стеку протоколів. DRM (Digital Rights Management — Цифрове управління правами) бере до уваги окремі

проблеми безпеки, пов'язані з прикладним рівнем. Хороший потенціал DRM гарантує його прозоре використання у платформах UWB.

Дуже важливим фактором є час роботи мобільних пристроїв. MB-OFDM здатна забезпечити щонайменше дві години безперервної роботи від одного комплекту батарей за типових умов (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1.

Споживання потужності в MB-OFDM

Швидкість обміну даними	Споживана передавачем потужність	Споживана приймачем потужність	Споживана потужність у сплячому режимі
110 Мбіт/с	93 мВт	155 мВт	15 мкВт
200 Мбіт/с	93 мВт	169 мВт	15 мкВт

2.3. Моделі використання

Можливість відображати, редагувати, слухати, забезпечувати доступ та обмін інформацією між пристроями без необхідності тривалого та складного налаштування фахівцями розкриває величезні перспективи безлічі споживачів. У середині типової "домашньої" інфраструктури виділяються три основні категорії: комп'ютери, мультимедіа-центри та мобільні пристрої (наприклад, телефони). Персональні комп'ютери, принтери та інша периферія, а також модеми, шлюзи та маршрутизатори представляють первинні елементи централізованих мереж; ширококомовний розважальний кластер зазвичай складається з домашніх кінотеатрів з дисплеями PVR, STB та ін, звукового та відеообладнання; мобільних пристроїв, таких як кишенькові портативні комп'ютери (КПК), смартфони та ноутбуки. Вони можуть (і повинні) вільно пересуватися по всій будівлі.

Конвергенція зазначених видів комунікаційних систем усередині будівлі створює необхідність включення цих пристроїв у єдину мережеву архітектуру, більш функціональну, ніж успадковані технології підтримки та інтегрування кожної категорії:

а) Інтерфейс USB спочатку був розроблений як дротовий інтерфейс для підключення периферійних пристроїв до персонального комп'ютера. Він зазвичай використовується для додатків у будинках та офісах та орієнтований на обмін даними.

б) IEEE 1394 (відомий також як FireWire) був спеціально розроблений для передачі безлічі потоків аудіо та відео через різні типи кабелів. Використовується найперше у програмах для розваг.

в) Bluetooth - низькошвидкісна технологія обміну даними типу "заміна кабелю", що широко використовується в мобільних телефонах, бездротових гарнітурах і КПК.

Поки різні протоколи цих технологій достатньо націлені на відповідні сегменти цільового ринку, споживачам потрібна інтероперабельність всередині та між цими трьома сегментами, які сьогодні часто складаються з декількох категорій пристроїв. З цією метою групи розробки промислових стандартів, такі як Digital Living Network Alliance (Альянс цифрових домашніх мереж, DLNA), намагаються визначити методи досягнення такої повної інтероперабельності. Типові області застосування таких систем включають домашні та офісні програми, автомобільний та промисловий сектор.

2.4. UWB та перешкоди іншим системам

Необхідно пам'ятати, що UWB є радіочастотною (РЧ) технологією і тому, якщо вона розроблена не належним чином, без дотримання відповідних правил, то, як і будь-яка РЧ технологія, може створювати перешкоди існуючим системам. Крім того, має місце кілька способів генерації UWB-випромінювання. Деякі з цих способів більш схильні до генерування побічних випромінювань від впливу перешкод, деякі менш.

Наприклад, системи UWB, які використовують імпульсне збудження антени, виробляють енергію, в якій реальне розширення частотного спектра значно більше ніж розрахунковий робочий діапазон частот антени. Для розрахункового діапазону частот можна вибрати ширину коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСВН), тобто смугу частот, на яку КСВН менше деякого числа, скажімо, 2:1; або ширину смуги

випромінювання, яка становить частоту, коли він основний пелюсток діаграми спрямованості антени залишається у деяких межах, скажімо, близько 3 дБ від максимального значення. На жаль, дуже важко в жорстких межах контролювати ширину смуги пропускання та центральну частоту таких випромінювань з одиночною антеною.

Сучасні методики, такі як використовуються в поточних приладах MSSSI, створюють сигнали UWB у вигляді формування імпульсів до моменту передачі антеною. Ці методики мають значні переваги щодо контрольованості обох параметрів: частоти та ширини смуги та можуть бути використані для того, щоб працювати за межами обмежених діапазонів, таких як зарезервовані для GPS та систем життєзабезпечення.

Інші важливі аспекти UWB-пристроїв, які пов'язані з їх потенціалом, включають такі параметри, як довжина імпульсів і вид модуляції. Звичайно, системи UWB використовують більший робочий цикл, в результаті виходить, що передається велика середня величина енергії. У деяких запропонованих схемах UWB безліч імпульсів використовується для передачі одного біта інформації. Це, однак, небажано з точки зору подальшого збільшення загальної кількості переданої енергії і змушує розробника використовувати менші швидкості обміну даними для деякої заданої середньої енергії. Крім того, висока частота повторення імпульсів з мінімальним міжімпульсним обуренням має ефект більшої концентрації цієї енергії на набір спектральних ліній. Коли спектральна лінія знижується в смугу пропускання чутливості приймача (що, наприклад, має місце коли приймається сигнал від систем GPS), можуть виникнути значні перешкоди, навіть через «смугу пропускання» сигналу, яка може досягати сотень мегагерц [20].

2.5. Використання та розвиток UWB компанією Apple

На презентації Apple в 2019 році було анонсовано новий чіп для передачі даних U1, який, за заявами компанії, допоможе виставляти пріоритети для AirDrop, додасть в нове покоління iPhone «ще один сенс і приведе до нових дивовижних можливостей» [25].

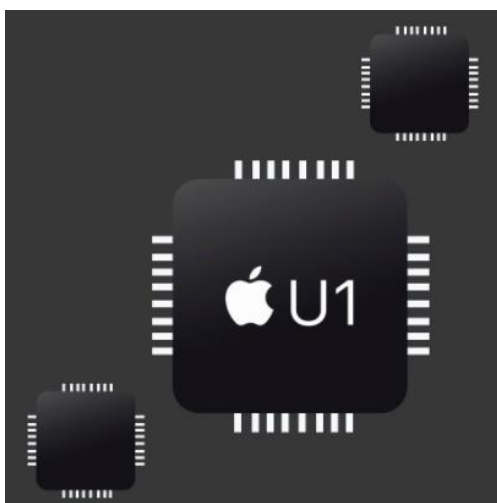


Рис. 2.3. Чіп U1 від компанії Apple

Новий чіп U1 базується на технології Ultra WideBand (UWB). UWB дозволяє замінити Bluetooth та передавати дані між пристроями на більш високих швидкостях та на більшій відстані за менших енерговитрат.

Його використовуватимуть для визначення розташування смартфона щодо інших пристроїв на базі чіпа U1. Варто лише направити телефон на інший iPhone з чіпом, і система сама вирішить, кому ви хочете відправити файли по AirDrop.

Apple AirTag підключається до iPhone подібно до того, як і усі інші фірмові аксесуари Apple. Після підключення мітку можна назвати, а потім покласти в гаманець, причепити до ключів або рюкзака [25].



Рис. 2.4. Apple AirTag на базі чіпу U1

Працює AirTag від батарейки таблетки CR2032 на 3 Вольти. Змінювати її потрібно приблизно раз на рік, робиться це просто. Також всередині є динамік для звукових сигналів.



Рис. 2.5. Живлення Apple AirTag

Починаючи з iPhone 11 до iPhone 13, у смартфонах з'явився чіп U1. Замість різної модуляції синусоїдального сигналу, яка потрібна, щоб передавати інформацію, використовуються імпульси. Тут важливий саме час між цими короткими імпульсами. Сигнали надсилаються приблизно з частотою 2 наносекунди кожен [25].

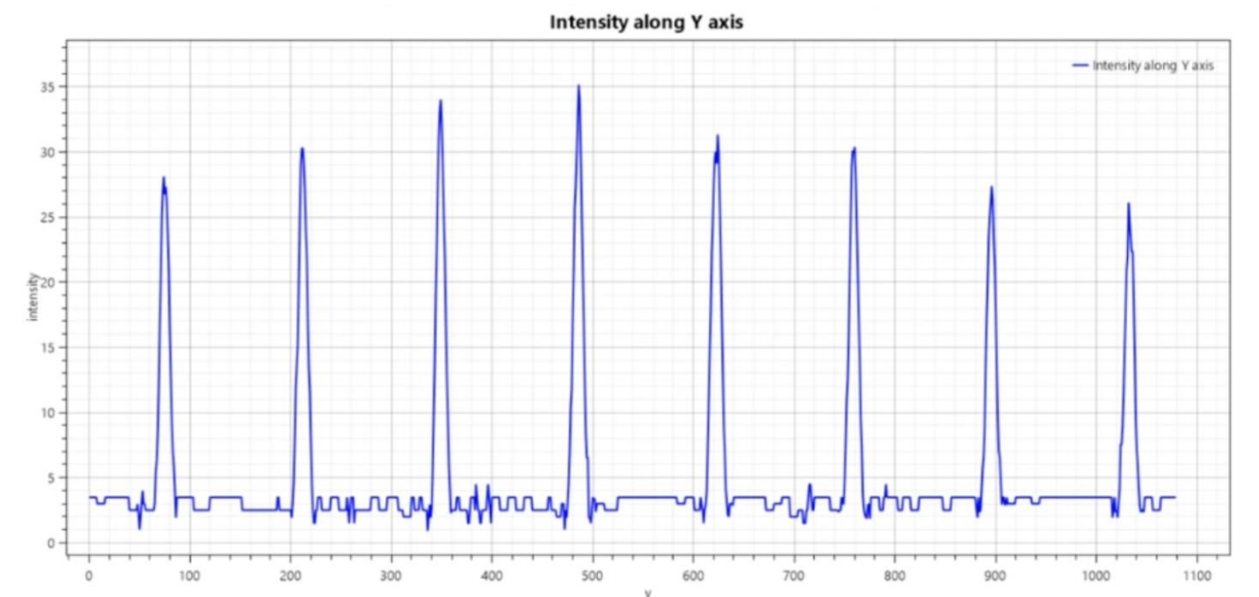


Рис. 2.5. Серія сигналів від чіпу U1

А оскільки імпульс посиляється неймовірно часто, то точність вимірювання зростає. Це прямо як гра Гаряче-Холодно. Час зменшується, коли ви наближаєтеся до об'єкта або відповідно збільшується, коли ви віддаляєтеся. У результаті досягається точність позиціонування за кілька сантиметрів.

Взагалі є три різні варіанти локації з використанням UWB, але Apple і Samsung використовують Two-Way Ranging або, інакше кажучи, Time-Of-Flight вимір [25].

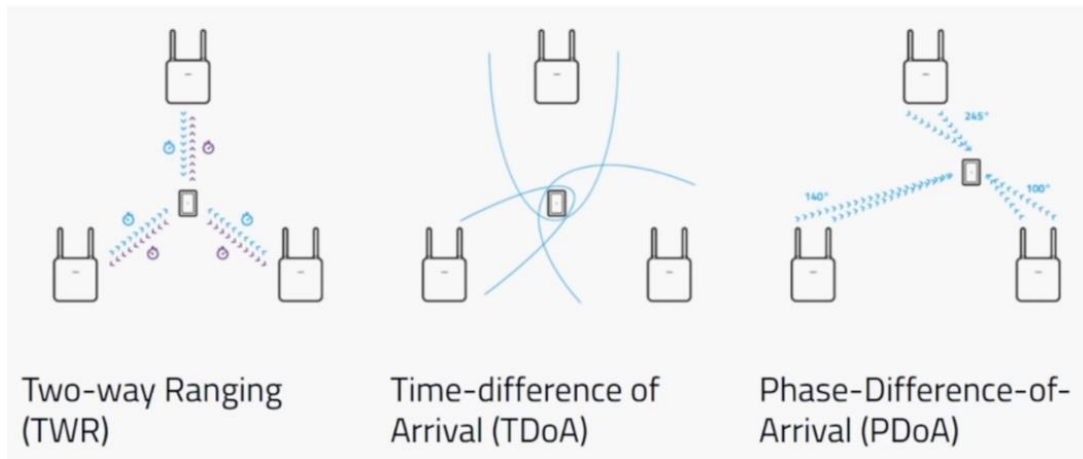


Рис. 2.6. Приклад використання Two-Way Ranging вимірів

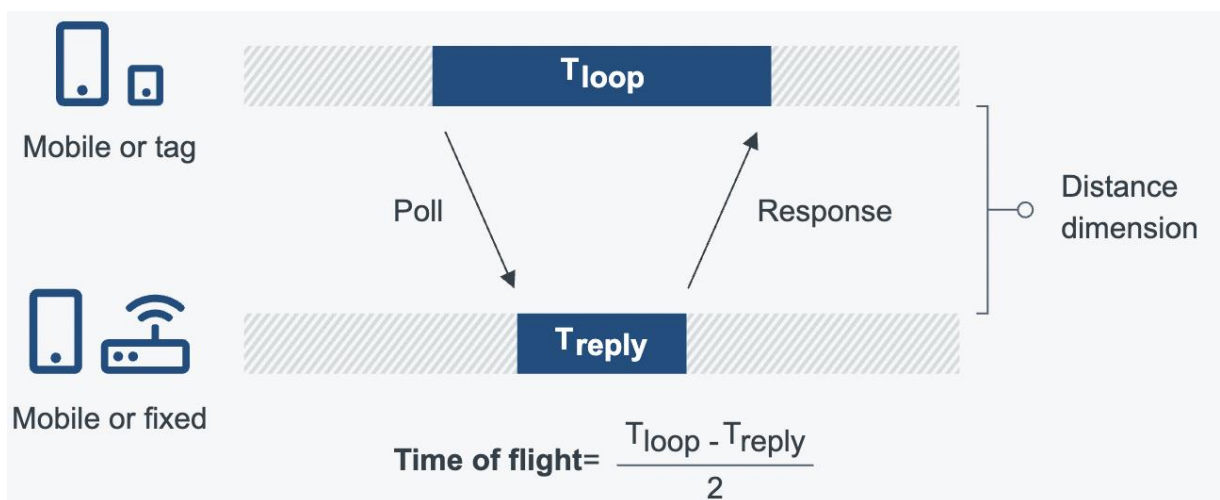


Рис. 2.7. Приклад використання Time-Of-Flight вимірів

Система використовує частоти від 3,1 до майже 11 ГГц. Звичайні технології, такі як Wi-Fi або GPS, мають дуже вузьку частотну смугу. Наприклад, Wi-Fi 2,4 ГГц, не використовує всю область частот, лише смугу шириною всього 22 МГц.

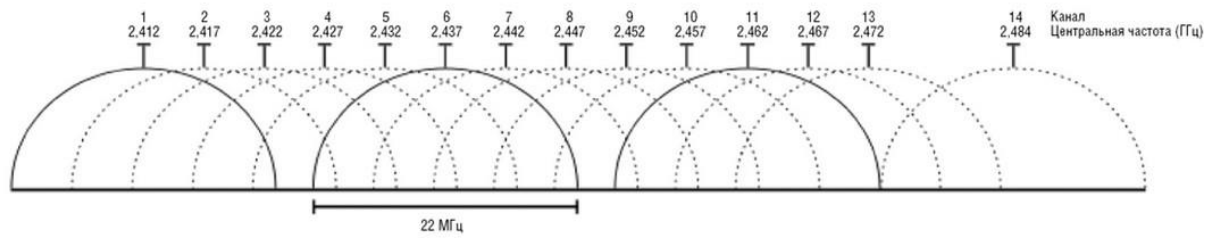


Рис. 2.8. Використання смуги шириною 22 МГц технологією Wi-Fi 2,4 ГГц

У той час як UWB використовує ширину каналу від 500 МГц до 1,3 ГГц. Це дозволяє передавати великі обсяги даних, використовуючи маленькі потужності самої антени.

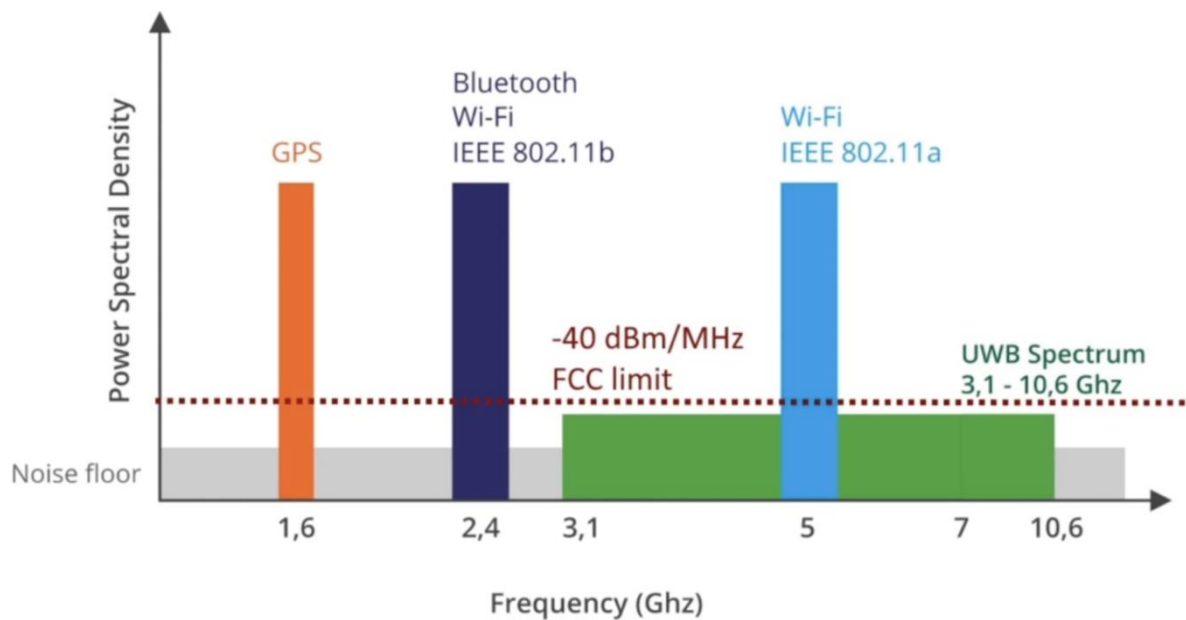


Рис. 2.9. Використання частот провідними бездротовими технологіями

Сучасний стандарт UWB дозволяє передавати файли зі швидкістю до 27 Мбіт на секунду і, наприклад, у США пристрої з UWB взагалі не вимагають сертифікації Федеральної комісії зв'язку через свою малу потужність [25].

Ця технологія стане базовою для систем розумного будинку та й взагалі для інтернету речей. Ваша машина точно знатиме, хто до неї підходить і буде автоматично підлаштовувати дзеркала, сидіння, включатиме вашу улюблену музику: Volkswagen вже анонсував подібне у своїх машинах. Та й сама Apple, розповідаючи про U1, вже відкривала автомобілі за допомогою iPhone саме по UWB.

Apple також явно планує використання UWB у своїх AR-окулярах. Взагалі для доповненої та віртуальної реальності це широкі можливості – у поєднанні з гіроскопами та акселерометрами це позбавить нас необхідності обставляти кімнату датчиками.

Насправді спектр величезний, а у комбінації з іншими датчиками та сенсорами у наших девайсах він стає практично безмежним.

Apple і Samsung створюють величезну мережу з мільйонів девайсів по всьому світі, які будуть виступати як маленькі локатори з високою точністю позиціонування. І, можливо, вони матимуть змогу працювати разом. Адже Apple анонсували API для своїх пристроїв. Будь-яка людина, що проходить повз ваш втрачений гаманець, миттєво відправляє сигнал на сервера Find My, і ви відразу ж отримуєте повідомлення.

РОЗДІЛ 3

ПРОЄКТ БЕЗПРОВІДНОЇ ПЕРСОНАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ UWB

3.1. Опис об'єкта дослідження

Метою даної дипломної роботи є оптимізація зв'язку за допомогою технології UWB. В даний час найбільш широко у сфері зв'язку UWB використовується для передачі відео високої роздільної здатності. Оскільки дані такого роду мають дуже великий обсяг, передавати їх за допомогою існуючих технологій бездротового радіодоступу часто виявляється досить складно і довго, а відтворити відеоролик високої роздільної здатності, що знаходиться в ноутбуці, за допомогою телевізора або проектора, підключеного до цього ноутбука, зовсім неможливо. Через широку смугу пропускання технологія UWB є на сьогоднішній день єдиною бездротовою технологією, здатною передати такі об'ємні дані як відео високої роздільної здатності без будь-якого стиснення, перешкод чи затримок.

Через малу дальність зв'язку, UWB використовують тільки в пікомережах, тобто в персональних бездротових мережах, таких як малі офісні та домашні мережі. Для впровадження технології як об'єкт буде використаний центр розваг та відпочинку. Це є відмінним рішенням, де можна буде відобразити всі переваги UWB, оскільки всі пристрої, які потрібно буде об'єднати в мережу, будуть знаходитися один від одного на відстані, що не перевищують ефективні дальності передачі сигналу.

Цей розважальний центр має комп'ютерний клуб з можливістю виходу в глобальну мережу Інтернет, також зал для гри на консолях Play Station 4-5, ігрові автомати, кафе-ресторан та інші заклади для відпочинку.

Оптимізація зв'язку в центрі відобразатиметься шляхом впровадження його в окремі заклади. Власники центру бажають проводити у своєму комп'ютерному клубі та залі ігор на консолях чемпіонати з кібер-спорту. Це передбачає наявність глядачів,

які повинні мати можливість спостерігати за тим, що відбувається на екранах пристроїв і не заважати учасникам. Для цього на виходах із залів будуть встановлені телевізори, які будуть з'єднані з комп'ютерами та консолями учасників за допомогою UWB, а також у кафе-ресторані буде проектор, пов'язаний з головним комп'ютером, який також матиме змогу показувати те, що відбувається на окремому комп'ютері чи консолі. Окрім цього, проектор із полотном для показу також служитиме для швидкого розгортання міні-кінотеатру, де глядачами будуть відвідувачі кафе. Відео, яке буде відтворюватися на виносних телевізорах і проекторі, матиме дуже високу роздільну здатність, так як сучасні комп'ютерні ігри мають дуже високі графічні характеристики, що вимагають мінімальної роздільної здатності приблизно 1280x720, а також в міні-кінотеатрі будуть проводитися покази фільмів виключно в широкому форматі Full HD та 4K.

3.2. Підбір необхідного обладнання

Бездротова мережа персонального доступу в даному центрі розваг буде розроблена з використанням радіоподовжувача Gefen Wireless for HDMI UWB Extender, адаптера Fujitsu Wireless Display Adapter, а також набір ультраширококуткового радіозв'язку (UWB) для швидкої та недорогої розробки UWB додатків на основі мікроконтролера.

3.2.1. Gefen Wireless for HDMI UWB Extender.

Gefen Wireless HDMI Extender [9] перший у світі бездротовий HDMI подовжувач відеосигналу високої чіткості (High Definition, HD) – дозволяє безперешкодно передавати HD-сигнал від 3-х AV-джерел на відстань до 50 метрів. Це досягається за допомогою застосування UWB технології, яка дозволяє передавати великі обсяги інформації відповідно до вимог протоколу інтерфейсу для мультимедійних файлів високої чіткості (HighDefinition Multimedia Interface, HDMI). У межах прямої видимості можна передавати сигнал із роздільною здатністю до 1080p.

У тих випадках, коли прокладання традиційного кабелю утруднено новий пристрій незамінний для застосування. Незалежно від того, куди необхідно доставити сигнал, процес інсталяції займає всього кілька хвилин: у сусідню кімнату або до підвішеного до стелі відеопроєктора. Наявність 3-х HD входів (2 HDMI та 1 компонентний) дозволяє використовувати Gefen Wireless HDMI Extender як AV-світильник сигналу високої чіткості.

Новий пристрій дозволяє підключати до передавального пристрою 2 HDMI та 1 компонентне джерело сигналу, а дисплей з опціональним аналоговим аудіо підключається до приймального пристрою. Все це дає можливість насолоджуватися відеосигналом високої чіткості практично у будь-якому куточку невеликого приміщення.

Для перемикання між наявними вхідними джерелами сигналу використовується перемикач на передній панелі пристрою. Крім цього, можна скористатися функцією автоматичного перемикання, яка контролює входи HDMI портів і перемикає їх при включеному джерелі HDMI. При вимиканні пристрій автоматично переключиться на останнє джерело сигналу [9].

Як опція пропонується також спеціальний SMA-адаптер, що дозволяє передавати HDMI-сигнал по RG-59 або RG-6 коаксіальним кабелям.

Технічні характеристики EXT-WHDMI:

- частотний діапазон, що використовується: 3,1-4,8ГГц;
- максимальна роздільна здатність: 1080p/1920*1200;
- рівень вхідного відеосигналу: 1.2В;
- Рівень вхідного сигналу DDC: 5В;
- роз'єм HDMI: тип "А" 19-контактний, розетка;
- Роз'єм компонентний: RCA (3), розетка;
- живлення: 5В постійного струму;
- Потужність: до 12,5 Вт;
- Зразкова вага: 2,72 кг.



Рис. 3.1. Радіоподовжувач Gefen Wireless for HDMI UWB Extender

Основними особливостями Gefen Wireless for HDMI UWB Extender є такі:

- відстань передачі сигналу може досягати 50 метрів при роздільній здатності 1080p;
- використовує UWB (Ultra Wide Band) технологію передачі компанії T-Zero;
- передавач забезпечений вбудованим комутатором 2:1 для HDMI та компонентним входом;
- дозволяє уникнути шумів обладнання у зоні перегляду;
- підтримує сигнали з роздільною здатністю до 1080p, 2K, 1920*1200;
- відповідає специфікації HDMI 2.0;
- Підтримує HDCP.

3.2.2. Fujitsu Wireless Display Adapter

Бездротовий адаптер Fujitsu Wireless Display Adapter [10] забезпечує надійне бездротове з'єднання між ПК та монітором або проектором за рахунок використання двох адаптерів: одного для головного пристрою (хост), а іншого для пристрою, що підключається. Якщо головний пристрій (хост) має вбудовану функцію Wireless USB, з боку пристрою, що підключається, застосовується бездротовий адаптер дисплея Fujitsu Wireless Display Adapter.

Бездротовий адаптер дисплея Fujitsu Wireless Display Adapter з боку пристрою, що підключається, має роз'єм цифрового відеоінтерфейсу (Digital Visual Interface, DVI). Крім того, адаптер дисплея має роз'єм для блоку живлення, через який адаптер отримує живлення.

Технічні характеристики:

- живлення: 5 В постійної напруги $\pm 10\%$ при 2 А (позитивна полярність);
- Потужність: 2,5 Вт;
- частотний діапазон, що використовується: 3,1-4,8 ГГц;



Рис. 3.2. Fujitsu Wireless Display Adapter

Основні переваги:

- передача сигналу через HDMI забезпечує найвищу цифрову якість відео та звуку, синхронно, в реальному часі, і все в одному сучасному, мобільному інтерфейсі;
- звук подається одночасно і у вихідний HDMI-інтерфейс, і в гніздо для підключення колонок/навушників;
- мала вага та розмір передавача (трохи більше флешки) та приймача (приблизно розміром із середній комунікатор) робить пристрій надмобільним: комплект легко переноситься у невеликому чохлі або коробці, програма для роботи за 10 хвилин встановлюється на будь-який комп'ютер;
- власна, виділена смуга радіочастот, забезпечує високу швидкість та відсутність перешкод у робочому діапазоні;

- можлива передача через не капітальні перешкоди (меблі, техніка, люди тощо);
- можна базувати приймач сигналу на горизонтальній поверхні (стіл, тумба), так і закріпити на стіну, для чого в пристрої передбачені спеціальні отвори для гвинтів;
- придатний для миттєвого, безболісного сполучення практично будь-яких видів комп'ютерів (настільні, ноутбуки, планшети; а також PC або Mac) та телевізорів (проекторів, моніторів, колонок, навушників);
- пристрій прозорий для системи, у користувача просто з'являється другий монітор та друга звукова карта;
- можливість покращувати та додавати функціональність за рахунок оновлюваного вбудованого програмного забезпечення (ПЗ, прошивки), що виходить регулярно.

Особливості:

- Заявлені характеристики зберігаються на відстані прямої видимості не більше 10 метрів.
- Гарантується якісна передача зображення в роздільній здатності вище 720p.
- Передача звуку у HDMI-інтерфейсі лише стерео (звук 5.1 не передається).
- Підтримка Linux відсутня.

3.2.3. Набір UWB компанії Atmel для програм на основі мікроконтролера AT91CAP9A

Набір AT91CAP9A UWB містить два набори розробки AT91CAP9A (один для передачі та один для прийому), кожен з яких містить три об'єднані плати (материнську, мезонинну та 3.3В карту розширення пам'яті), плату передавача CAP9 UWB PNY та плату приймача CAP9 UW також програмне забезпечення для програм UWB потокового відео.

У мікросхемі FPGA, яка емулює блок CAP мікроконтролера з масковим програмуванням, реалізований UWB Контролер MAC, а також необхідні для застосування додаткові схеми. PNY UWB реалізований на передавальній та приймаючій платах розширення, які підключаються до макетної плати CAP.

Така конфігурація утворює готове для використання середовище розробки UWB з прикладом реалізації програм потокового відео.

Набір AT91CAP9A UWB підключається до ПК, на якому запускаються стандартні інструменти розробки для процесорів ARM для розробки та налагодження додатків. Це дозволяє вести паралельну розробку програмного та апаратного забезпечення, що зменшує термін створення програми. Коли система буде повністю налагоджена, UWB MAC і додаткові схеми будуть перенесені в МР блок CAP, що конфігурується, утворюючи закінчену систему UWB приймача з малим числом використовуваних компонентів. Це недороге, середньосерійне рішення UWB ідеально підходить для використання в бездротових системах та інших аналогічних додатках.

Даний набір схемних рішень служить для об'єднання UWB приймачів у єдину мережу з подальшим її адмініструванням.



Рис. 3.3. Набір UWB на основі мікроконтролера AT91CAP9A

3.3. Моделювання каналу зв'язку UWB-мережі за допомогою програмного середовища MATLAB

MATLAB – пакет прикладних програм для вирішення завдань технічних обчислень та однойменна мова програмування, що використовується у цьому пакеті. Мова MATLAB є високорівневою мовою програмування, що інтерпретується, що включає

засновані на матрицях структури даних, широкий спектр функцій, інтегроване середовище розробки, об'єктноорієнтовані можливості та інтерфейси до програм, написаних іншими мовами програмування [11].

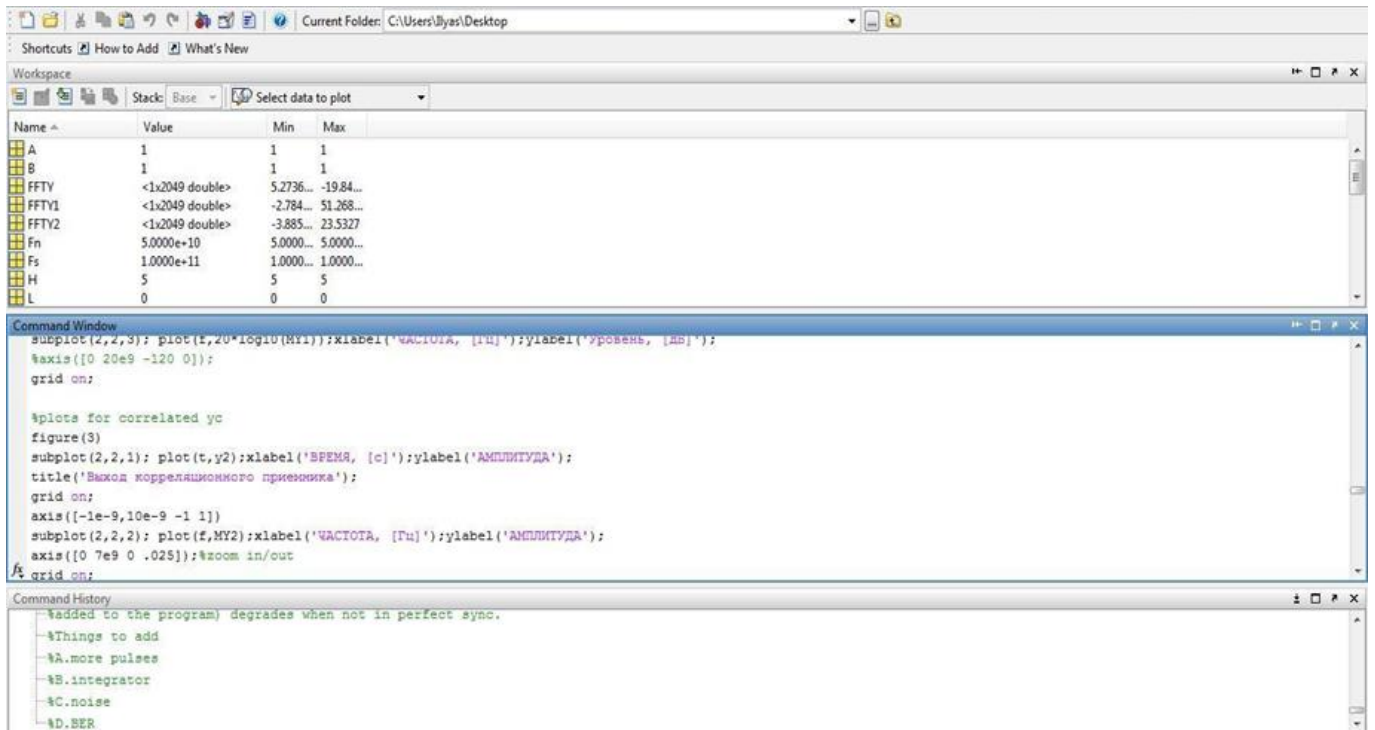


Рис. 3.4. Інтерфейс програми MATLAB

Далі автоматично буде запущено модель передачі сигналу. Дана модель ілюструє часові та частотні форми сигналу для модульованого та немодульованого імпульсних сигналів. Відстань від одного хвоста до іншого на часових діаграмах вважається фактичною тривалістю імпульсів.

Передається сигнал із 5 імпульсів «10101».

Для передачі цього сигналу використовується фазо-імпульсна модуляція (ФІМ). При ФІМ амплітуда і тривалість імпульсів не змінюються, змінюється їх позиція, тобто. певні імпульси запізнюються за часом. Маємо послідовність із 5 імпульсів, яка буде немодульованим сигналом. Далі ця послідовність модулюється за допомогою ФІМ, в результаті чого виходить модульований сигнал, у якого 2-ий і 4-ий імпульси запізнюються. Таким чином, імпульси, що відповідають логічній "1", зберігають своє положення, а імпульси, що відповідають логічному "0", запізнюються на 0,2 нс.

На малюнку 3.5 зліва зображені відповідні діаграми, а праворуч також наведені дані діаграми у збільшеному масштабі, з метою наочності запізнення імпульсів, що відповідають логічному «0».

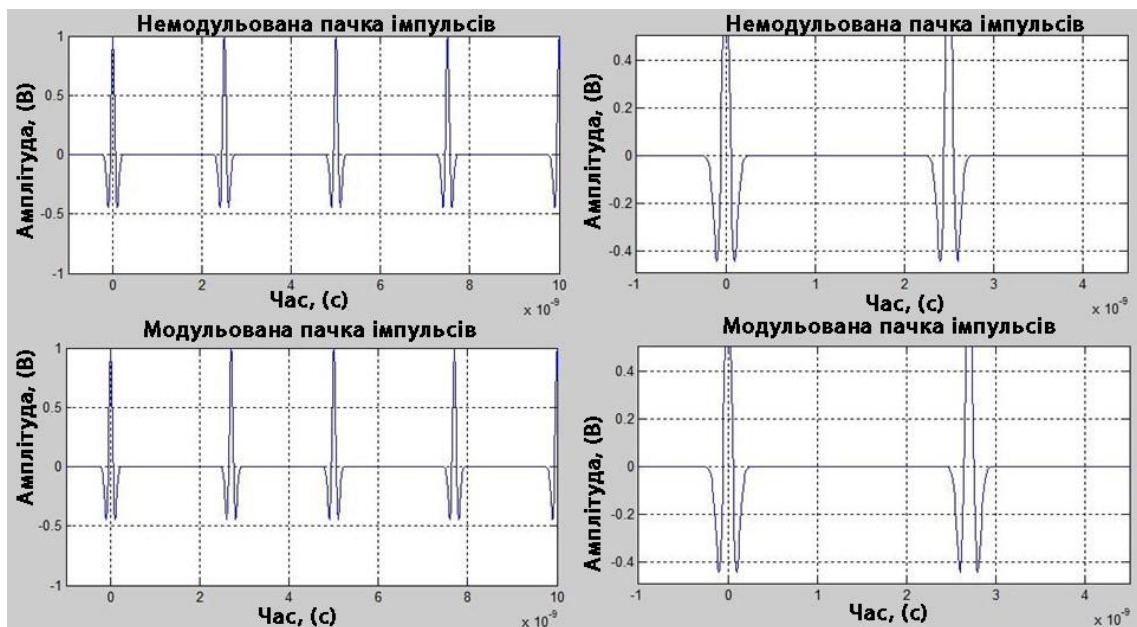


Рис. 3.5. Часові діаграми сигналів

Для відновлення цього сигналу використовуватиметься кореляційний приймач, так як на його входи надходитиме груповий сигнал. Замість складного АЦП у приймачі використовується простий компаратор (10101). У компараторі обидва сигнали перемножуються і утворюється вихідний сигнал «10101» (див. рис. 3.6).

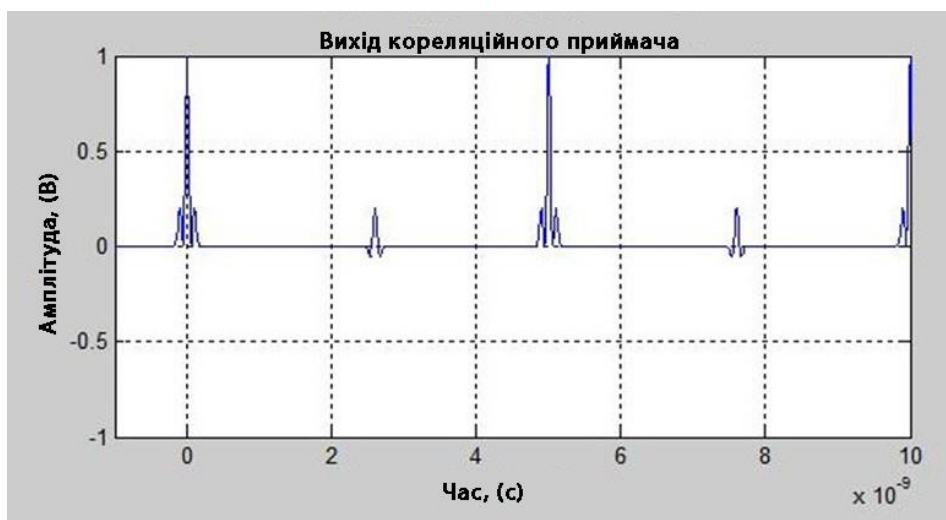


Рис. 3.6. Часова діаграма прийнятого сигналу

Ця програма додатково представляє спектральні діаграми та графіки залежності рівня сигналу від частоти (див. рис. 3.7).

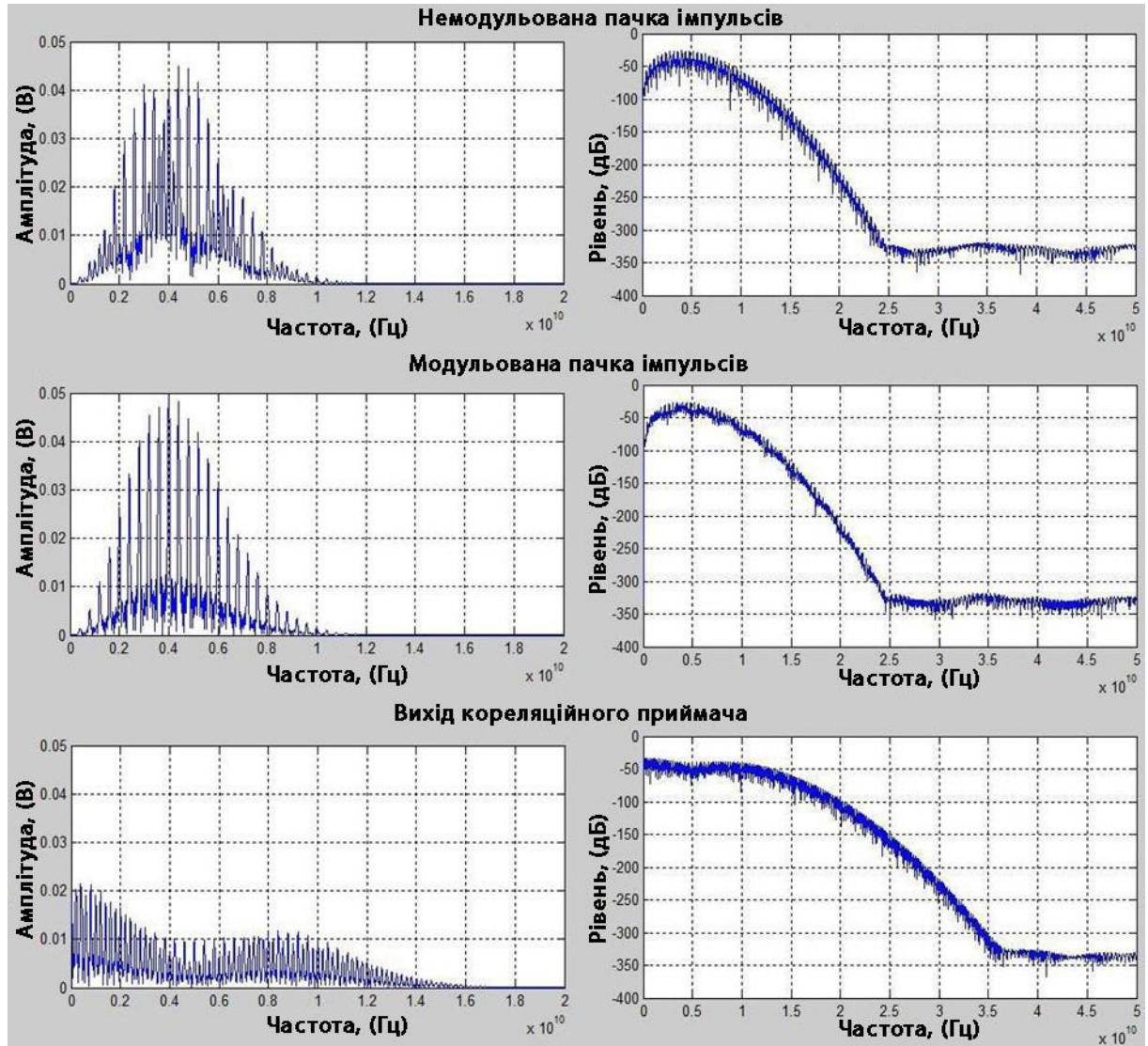


Рис. 3.7. Спектри та залежності рівня сигналу від частоти

Обґрунтуванням вибору ФІМ є такі факти:

- UWB технологія працює на основі передачі надкоротких імпульсів, що пояснює вибір імпульсного виду модуляції;
- з усіх видів імпульсної модуляції ФІМ має найвищу завадостійкість, що добре поєднується з однойменною гідністю технології UWB [12].

3.4. Розрахунок дальності зв'язку

3.4.1. Дальність дії UWB-систем в умовах обмежень на радіовипромінювання

Для спільної роботи UWB СШП-систем необхідно забезпечити відсутність перешкод із боку останніх. Для цього рівень випромінювання СШП систем повинен відповідати найжорсткішим законодавчим нормам на небажані випромінювання для УП-радіосистем, що автоматично забезпечує ЕМС СШП та УП-систем у заданій смузі частот [13].

У таблиці 3.1 наведено порівняльні рівні небажаних випромінювань, що нормуються у різних країнах для діапазонів частот вище 30 МГц.

Таблиця 3.1.

Зведена таблиця норм на небажані випромінювання

Діапазон частот f, МГц	Середня спектральна щільність потужності W_{av} , Вт/Гц		
	Україна	США	Європа
30-88	$2,77 \cdot 10^{-15}$	$2,91 \cdot 10^{-15}$	$2,43 \cdot 10^{-13}$
88-216	$2,77 \cdot 10^{-15}$	$6,71 \cdot 10^{-15}$	$2,43 \cdot 10^{-13}$
216-230	$2,77 \cdot 10^{-15}$	$1,22 \cdot 10^{-14}$	$2,43 \cdot 10^{-13}$
230-960	$1,4 \cdot 10^{-14}$	$1,22 \cdot 10^{-14}$	$2,43 \cdot 10^{-13}$
960-1000	$1,4 \cdot 10^{-14}$	$7,41 \cdot 10^{-14}$	$2,43 \cdot 10^{-13}$
1000-11700	$4,5 \cdot 10^{-13}$	$7,41 \cdot 10^{-14}$	$9,72 \cdot 10^{-14}$
11700-12500	$9 \cdot 10^{-14}$	$7,41 \cdot 10^{-14}$	$9,72 \cdot 10^{-14}$
12500-40000	на розгляді	$7,41 \cdot 10^{-14}$	$9,72 \cdot 10^{-14}$
вище 40000	на розгляді	$7,41 \cdot 10^{-14}$	на розгляді

Необхідно зазначити, що обмеження рівня основного радіовипромінювання СШП-систем відповідно до вимог, зазначених у таблиці 3.1, не гарантує повної відсутності їхнього впливу на УП-радіосистеми. Дослідження, проведені США [14], показали, що СШП-радіосистеми, які відповідають вимогам таблиці 3.1, можуть створювати перешкоди роботі глобальних навігаційних систем, наприклад GPS. Тому в США робота СШП пристроїв у деяких діапазонах частот обмежена.

Діапазон робочих частот СШП-систем зв'язку для внутрішньоофісного застосування США визначено в межах 3100-10600 МГц [15]. На решті частот встановлено рівень небажаного випромінювання СШП-систем (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2

Діапазони робочих частот та рівні випромінювання для СШП-систем у США

Діапазон частот f , МГц	Тип випромінювання	W_{av} , Вт/Гц
0,009-960	Небажане	$1,2 \cdot 10^{-13}$
960-1610	Небажане	$2,95 \cdot 10^{-17}$
1610-1990	«»	$4,67 \cdot 10^{-15}$
1990-3100	«»	$7,41 \cdot 10^{-15}$
3100-10600	Основное	$7,41 \cdot 10^{-14}$
вище 10600	Небажане	$7,41 \cdot 10^{-15}$

Оцінимо можливості СШП-систем зв'язку, що задовольняють зазначеним вище нормативним обмеженням на рівень випромінювання. Розрахунок дальності дії системи СШП-зв'язку будемо проводити за фіксованої максимально допустимої середньої потужності випромінювання. Оскільки в цих системах використовується передача цифрової інформації, розглянемо найпростіший метод її передачі за допомогою амплітудної маніпуляції з пасивною паузою, при цьому кожен інформаційний біт передається одним імпульсом (тобто період прямування імпульсів фіксований, поява/відсутність імпульсу означає 1/0). І тут фіксована середня потужність випромінювання визначає число імпульсів, випромінюваних в одиницю часу, тобто. швидкість передачі. Цей вид модуляції енергетично найвигідніший. Проте він найпростіший в апаратній реалізації, а тому й найперспективніший. Нехай тривалість випромінюваного СШП-імпульсу дорівнює 0,5 нс, а смуга робочих частот лежить у діапазоні 3,1-5,1 ГГц. Тоді допустима спектральна щільність потужності СШП-сигналу робочої смузи становитиме $7,41 \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц (див. таблицю 3.2). Прийом СШП-сигналів проводиться на тлі адитивного Гаусового білого шуму.

Вихідні дані

найменування показника	Позначення	Значення
Тривалість випромінюваного СШП-імпульсу (нс)	τ	0,5
Смуга робочих частот (ГГц)	$\Delta f_{\text{УВБ}}$	2
Спектральна щільність потужності (Вт/Гц)	$W_{\text{ав}}$	$7,41 \cdot 10^{-14}$
Коефіцієнт шуму приймача	N	10

Рівень шуму, що діє у робочій смузі СШП-приймача, розраховується за такою формулою:

$$N_{\text{RX}} = k \cdot T_{\text{K}} \cdot \Delta f_{\text{УВБ}} \cdot N, \quad (3.1)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$, – постійна Больцмана, Дж/К; $T_{\text{K}} = 293$ - абсолютна температура, К;

$$N_{\text{RX}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 2 \cdot 10^9 \cdot 10 = 80,9 \text{ пВт} = -70,9 \text{ дБм.}$$

Чутливість приймача:

$$P_{\text{RX}} = N_{\text{RX}} \cdot q, \quad (3.2)$$

де q – мінімальне відношення сигнал/шум на вході приймача, необхідне забезпечення заданої ймовірності помилки на біт (Bit Error Rate, BER) при прийнятому вигляді модуляції. Для $\text{BER} = 10^{-6}$ и 10^{-3} значення q при оптимальному прийомі складе 70 та 30 відповідно [16].

Для $\text{BER} = 10^{-3}$:

$$P_{\text{RX}} = N_{\text{RX}} \cdot q = 80,9 \cdot 10^{-12} \cdot 30 = 2,4 \text{ нВт} = -56,2 \text{ дБм.}$$

Визначимо граничну середню потужність P_{TXav} , яку може випромінювати передавач при заданій граничній середній спектральній щільності потужності W_{av} :

$$P_{TXav} = W_{av} \cdot \Delta f_{UWB}, \quad (3.3)$$

$$P_{TXav} = W_{av} \cdot \Delta f_{UWB} = 7,413 \cdot 10^{-14} \cdot 2 \cdot 10^9 = 0,15 \text{ мВт} = -8,24 \text{ дБм.}$$

Тоді пікова потужність:

$$P_{TXpeak} = P_{TXav} \cdot Q, \quad (3.4)$$

$$Q = T/t, \quad (3.5)$$

$$V = 1/T, \quad (3.6)$$

Де Q – скважність,

T - період проходження імпульсів, с;

V - швидкість передачі інформації, біт/с.

Дальність дії системи зв'язку визначимо за такою формулою:

$$D = \sqrt{\frac{P_{TXpeak} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot (c \cdot \tau)^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot P_{RX}}}, \quad (3.7)$$

де $G_{TX} = 1$ – коефіцієнт посилення антени передавача;

$G_{RX} = 1$ – коефіцієнт посилення антени приймача;

$c = 3 \cdot 10^8$ – швидкість світла, м/с.

Для $BER = 10^{-6}$:

$$P_{RX} = N_{RX} \cdot q,$$

$$P_{RX} = 80,9 \cdot 10^{-12} \cdot 70 = 5,66 \text{ нВт} = -52,5 \text{ дБм,}$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{P_{TXpeak} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot (c \cdot \tau)^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot P_{RX}}} = \sqrt{\frac{-8,24 \cdot (3 \cdot 10^8 \cdot 5 \cdot 10^{-8})^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot (-52,5) \cdot V \cdot 5 \cdot 10^{-8}}} = \sqrt{\frac{22,39 \cdot 10^9}{V}}. \quad (3.8)$$

При коефіцієнті посилення передавальної антени більше одиниці необхідно обмежувати енергетичний потенціал СШП-радіосистеми, що дорівнює $P_{TXpeak} \cdot G_{TX}$, таким чином, щоб випромінювана потужність у напрямку найбільшої спрямованості передавальної антени не перевищувала гранично допустимої.

За допомогою отриманої залежності (3.7) можна проілюструвати залежність дальності зв'язку від пропускної спроможності (рис. 3.8).

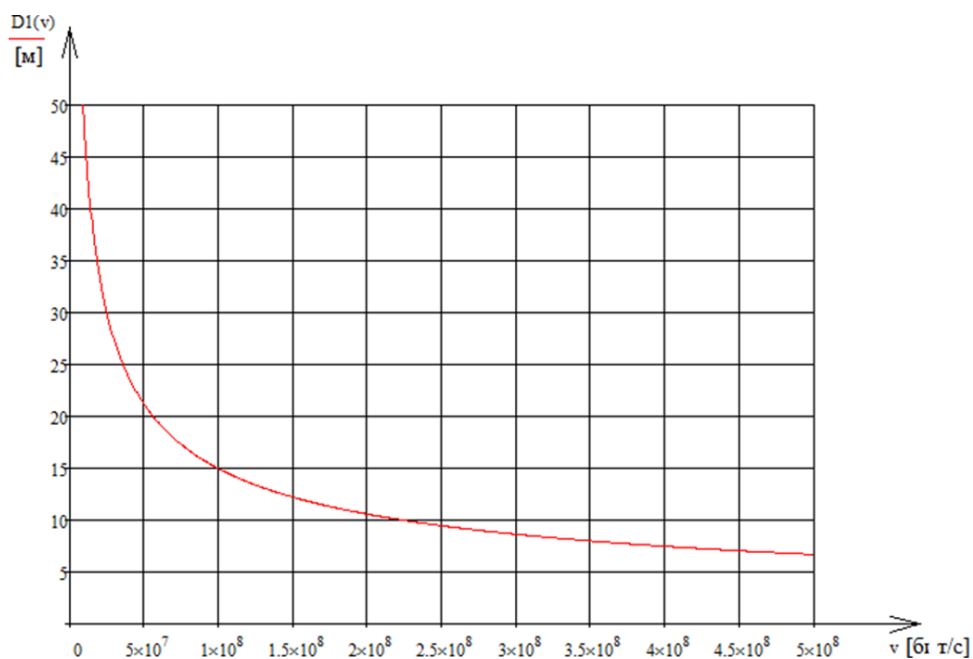


Рис. 3.8. Залежність дальності зв'язку від пропускної спроможності

3.4.2. Оптимізація мережі

Отримана залежність (рисунок 3.8) описує зв'язок за найсприятливішими умовами – коли між приймачем та передавачем немає жодних перешкод. У нашому випадку між приймачем і передавачем буде перебувати стіна, яка деякою мірою екрануватиме сигнал, що неминуче зменшує дальність зв'язку.

Потрібно провести оптимізацію, метою якої буде знаходження оптимальної відстані між приймачем та передавачем для забезпечення нормального прийому.

Вихідна функція (3.7) немає екстремумів, тобто. оптимізація методом перебування екстремумів у разі не застосовна. Доведемо це за допомогою математичного аналізу [17].

Щоб досліджувати функцію на екстремум, потрібно виконати такі кроки:

1) Знайти область визначення функції (всі допустимі значення її аргументу, у разі пропускнуї спроможності).

Функція визначена на проміжку $(0; \infty)$;

2) Визначити похідну функції. Ця функція має вигляд:

$$D(V) = k \sqrt{\frac{1}{V}}, \quad (3.9)$$

де k – дійсні числа.

Похідна такої функції:

$$D(V)' = \left(k \sqrt{\frac{1}{V}} \right)' = -\frac{k}{2V\sqrt{V}}, \quad (3.10)$$

1) Знайти точки, у яких похідна дорівнює нулю. Таких точок немає.

2) Знайти точки, у яких функція немає. $V_1 = 0$.

3) Позначити на координатній прямій область визначення та всі точки з пунктів 3 та 4 (критичні точки), визначити знак функції у кожному проміжку. Якщо при переході через критичну точку функція змінюватиме знак, то дана точка є екстремумом функції (рисунок 3.9).

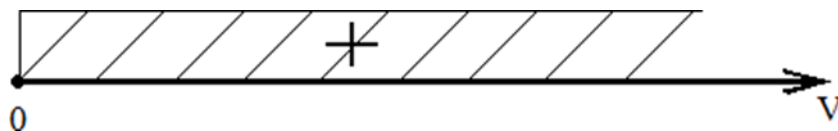


Рис. 3.9. Визначення екстремумів функції у критичних точках

Як очевидно з Рис. 3.9 функція 3.7 екстремумів немає, що й потрібно довести.

Скористаємося методом знаходження області оптимальних значень. Метод полягає в тому, щоб, знаючи обмеження, що накладаються на систему, знайти таку область значень параметрів, за якими ведеться оптимізація, щоб ці параметри задовольняли всім вимогам, що накладаються.

Заявлена дальність передачі сигналу радіоподовжувача Gefen становить 50 метрів.

Експериментально було доведено, що передачі відео високого дозволу 1920*1080 потрібно швидкість передачі щонайменше 11 Мбіт/с [18].

Підставляючи $v = 11 \cdot 10^6$ (3.9) отримаємо:

$$D_{max1} = \sqrt{\frac{22,39 \cdot 10^9}{11 \cdot 10^6}} = 45,12 \text{ м.}$$

Таким чином, щоб передати відео високої роздільної здатності, приймач і передавач повинні бути на відстані не більше 45 м., що є верхньою межею інтервалу оптимальної роботи.

Максимальна пропускна здатність, яку може забезпечити передавач, дорівнює 480 Мбіт/с.

Підставляючи $v = 480 \cdot 10^6$ в (3.9), отримаємо:

$$D_{min1} = \sqrt{\frac{22,39 \cdot 10^9}{480 \cdot 10^6}} = 6,8 \text{ м.}$$

Таким чином, передавач може передавати сигнал із максимальною швидкістю на відстані до 6 метрів, що виражає нижню межу інтервалу оптимальної роботи.

Також слід забувати, що розглянута залежність була побудована при $BER = 10^6$. Відомо, що за ФІМ BER приймає значення 10^{-6} - 10^{-3} . При збільшеному BER вийде інша залежність: для $BER = 10^{-3}$:

$$D_2 = \sqrt{\frac{P_{TXpeak} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot (c \cdot \tau)^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot P_{RX}}} = \sqrt{\frac{-8,24 \cdot (3 \cdot 10^8 \cdot 5 \cdot 10^{-8})^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot (-56,15) \cdot V \cdot 5 \cdot 10^{-8}}} = \sqrt{\frac{20,9 \cdot 10^{10}}{V}}.$$

$$P_{RX} = N_{RX} \cdot q = 80,9 \cdot 10^{-12} \cdot 30 = 5,66 \text{ нВт} = -56,15 \text{ дБм},$$

Підставляючи $v = 11 \cdot 10^6$ и $v = 480 \cdot 10^6$ в (3.10), отримаємо:

$$D_{max2} = \sqrt{\frac{20,9 \cdot 10^9}{11 \cdot 10^6}} = 43,5 \text{ м},$$

$$D_{min2} = \sqrt{\frac{20,9 \cdot 10^9}{480 \cdot 10^6}} = 6,6 \text{ м}.$$

Таким чином, верхня межа інтервалу звужується до 43 м. Нижня межа залишається на 6 м.

В експерименті, описаному в [18], було виявлено, що дальність сигналу, на шляху якого стоїть залізобетонна стіна зменшується на 22%. Тоді в нашому випадку максимальна дальність зв'язку:

$$D_{max} = \frac{43,5 \cdot (100 - 22)\%}{100\%} = 35 \text{ м}.$$

В результаті збудуємо залежність дальності зв'язку від швидкості передачі для двох значень BER і позначимо знайдені точки (рисунок 3.10)

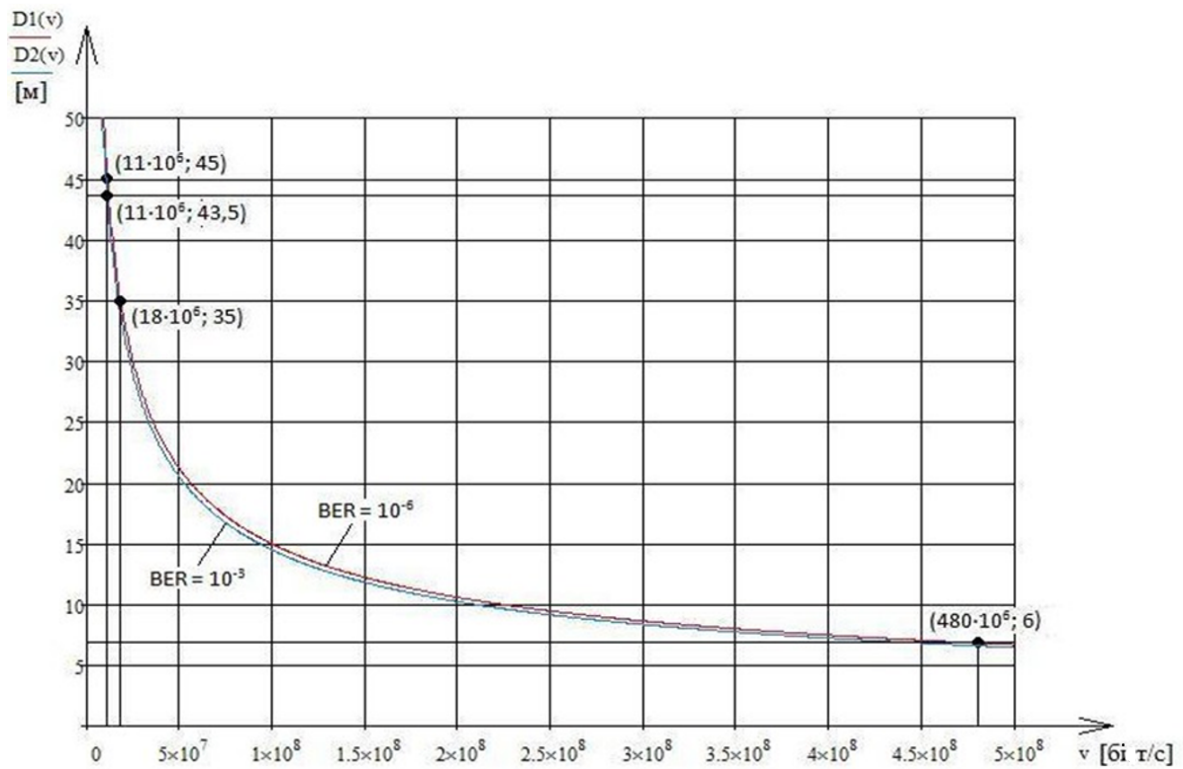


Рис. 3.10. Залежність швидкості передачі від відстані для 2 значень BER

Таким чином, шуканою областю оптимальної роботи, при якій приймально-передавальне обладнання Gefen Wireless for HDMI Extender буде здійснювати нормальні передачі і прийом є ділянка кривою, обмежена координатами $(18 \cdot 10^6; 35)$ и $(480 \cdot 10^6; 6)$.

В результаті проведеної оптимізації було з'ясовано, що відстань між приймачем і передавачем не повинна перевищувати 35 м. з умовою, що між ними буде залізобетонна стіна.

Схема мережі, що відповідає вимогам до оптимізації, наведена на Рис. 3.11.

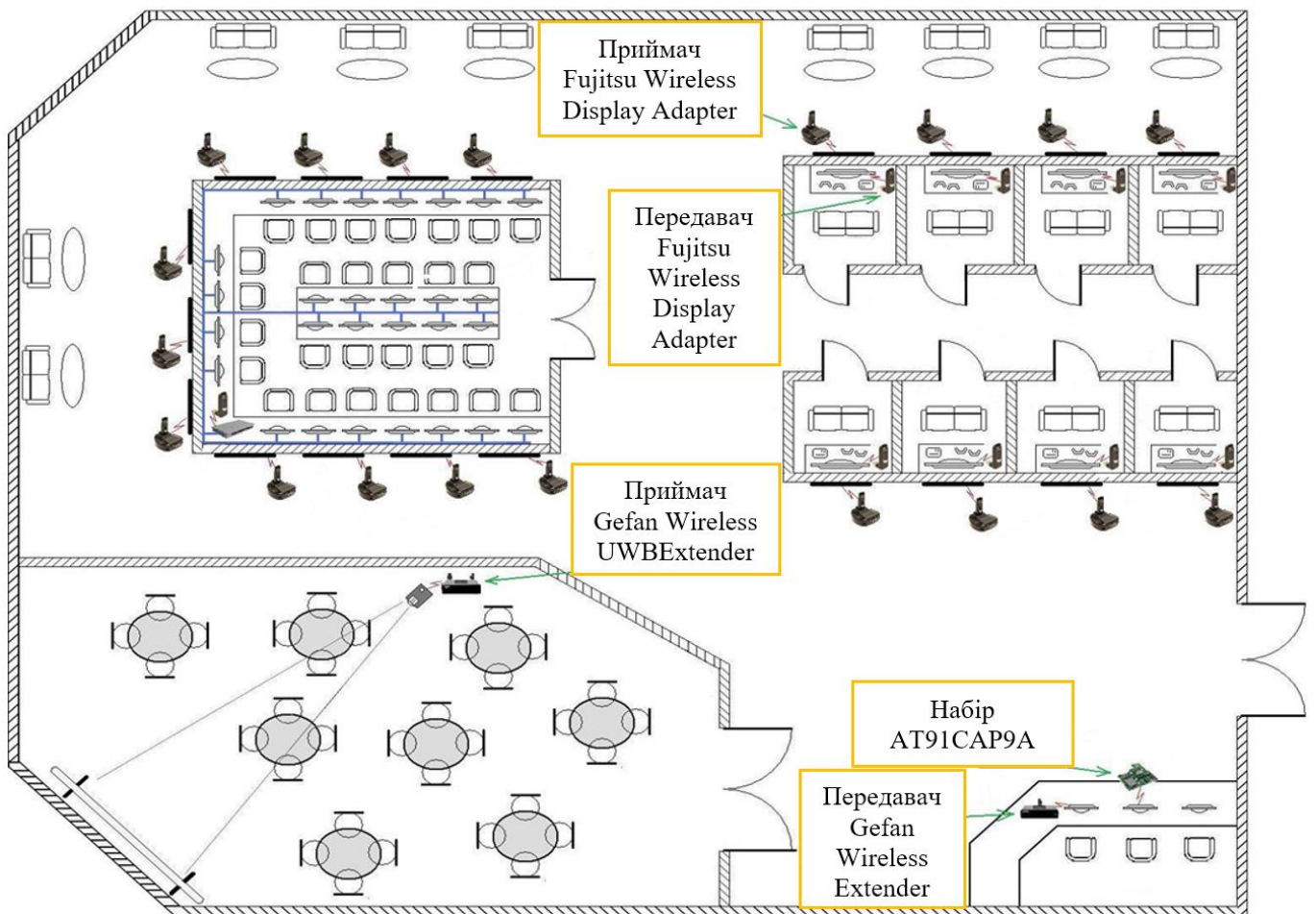


Рис. 3.11. Схема мережі, яка відповідає вимогам до оптимізації

ВИСНОВКИ

Бездротові технології стали зручним рішенням для мільйонів жителів, які з будь-яких причин не можуть або не хочуть бути "прив'язаними" проводами до стаціонарної точки. У перспективі люди хочуть мати пристрої, що бездротово передають великі обсяги інформації швидко і якісно.

Технологія UWB відкриває нові можливості бездротової передачі сигналів з дуже високою швидкістю передачі. В даний час тенденція на високоякісні мультимедіа дані, такі як відео, стрімко зростає. У свою чергу якісне відео займає великий обсяг, і щоб передавати такі «важкі» дані за допомогою існуючих стандартів бездротового зв'язку доводиться витратити багато часу, а відтворити в режимі реального часу часом і неможливо. Ця проблема повністю вирішується застосуванням технології UWB.

У розрахунковій частині дипломної роботи було проведено розрахунок залежності дальності зв'язку від пропускної спроможності, а також виконано оптимізацію, з метою вибрати оптимальну відстань між приймачем та передавачем для забезпечення зв'язку без затримок та перешкод в умовах екранування сигналу залізобетонною стіною. В результаті чого було знайдено оптимальну відстань, також визначено відстань, на якій обладнання працює з максимальною ефективністю. Крім цього, за допомогою програмного середовища MATLAB була проілюстрована модель каналу зв'язку, що обґрунтовує вибір ФІМ із усіх видів імпульсної модуляції.

На основі проведених розрахунків можна зробити висновок, що впровадження розробленого проекту мережі центру відпочинку та розваг застосовується в будь-якому об'єкті таких масштабів. Технологія UWB є найефективнішою при розробці бездротових мереж персонального доступу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Z. Yao S. Xiao Z. Jiang L. Yan and B. Wang "On the Design of Ultrawideband Circuit Analog Absorber Based on Quasi-Single-Layer FSS" IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett vol. 19 no. 4 pp. 591-595 Apr. 2020.
2. S. Keller Y.-F. Wu G. Parish N. Ziang J. J. Xu B. P. Keller et al. "Gallium nitride based high power heterojunction field effect transistors: Process development and present status at UCSB" IEEE Transactions on Electron Devices vol. 48 pp. 552-559 2019.
3. E. O. Johnson "Physical limitations on frequency and power parameters of transistors" RCA Rev pp. 163-177 1965.
4. S. Bajaj O. F. Shoron P. S. Park S. Krishnamoorthy F. Akyol T. H. Hung et al. "Density-dependent electron transport and precise modeling of GaN high electron mobility transistors" Applied Physics Letters vol. 107 no. 15 pp. 153504 2015.
5. Про технологію СШП. Застосування СШП. Інтернет-сторінка компанії UWB Group.
6. Крутов А. Надширокосмуговий зв'язок UWB. Частина 1. Технологія UWB: принципи функціонування, історія розвитку, особливості. Інтернет-сторінка компанії Wirerless Engineering.
7. UWB Technology. Надширокосмугова система зв'язку з високою швидкістю передачі даних. Інтернет-сторінка компанії UltraWide Band
8. T. Fang R. Wang H. Xing S. Rajan and D. Jena "Effect of optical phonon scattering on the performance of GaN transistors" IEEE Electron Device Letters vol. 33 no. 5 pp. 709-711 2012.
9. Gefen Wireless for HDMI UWB Extender. Advanced user manual. Інтернет-сторінка компанії Gefen and Wireless Products for Ordinary Home Usage.
10. Fujitsu Wireless Display Adapter. Advanced user manual. Інтернетсторінка компанії Fujitsu.
11. Softline. Консультаційний центр MATLAB. MATLAB & Toolboxes.

12. S. Bajaj T. H. Hung F. Akyol D. Nath and S. Rajan "Modeling of high composition AlGa_N channel high electron mobility transistors with large threshold voltage" *Applied Physics Letters* vol. 105 no. 26 pp. 263503 2014.
13. J. Simon V. Protasenko C. Lian H. Xing and D. Jena "Polarization-induced hole doping in wide-band-gap uniaxial semiconductor heterostructures" *Science* vol. 327 pp. 60-64 2010.
14. NTIA 01 43. Assessment of compatibility between ultra-wideband devices and selected federal systems. - U.S. Department of Commerce, NTIA, 2018.
15. Revision of part 15 of commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems. First report and order. FCC 0248. - Federal Communications Commission, 2012.
16. S. Rajan H. Xing S. DenBaars U. K. Mishra and D. Jena "AlGa_N/Ga_N polarization-doped field-effect transistor for microwave power applications" *Applied physics letters* vol. 84 pp. 1591-1593 2014.
17. S. Bajaj F. Akyol S. Krishnamoorthy Y. Zhang and S. Rajan "AlGa_N channel field effect transistors with graded heterostructure ohmic contacts" *Applied Physics Letters* vol. 109 pp. 133508 2016.
18. Y. Sui H. Gu and C. Yang "Reconfigurable stealth radome using active frequency selective surface technology" 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM) pp. 273-275 Apr. 2017.
19. C. M. Watts X. Liu and W. J. Padilla "Metamaterial electromagnetic wave absorbers" *Adv. Mater* vol. 24 no. 23 pp. OP98-OP120 May. 2012.
20. A. Sharma S. Malik S. Ghosh and K. V. Srivastava "A Miniaturized Band-Notched Absorber for Wideband RCS Reduction" 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) pp. 813-814 Jan. 2021.
21. J. Yang and Z. Shen "A Thin and Broadband Absorber Using Double-Square Loops" *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett* vol. 6 pp. 388-391 Dec. 2017.
22. Y. Ding et al. "Ultrawideband Frequency-Selective Absorber Designed with an Adjustable and Highly Selective Notch" *IEEE Trans. Antennas Propag* vol. 69 no. 3 pp. 1493-1505 Mar. 2021.

23. R. K. Pandey S. Ghosh H. Sheokand M. Saikia and K. V. Srivastava "A polarization-insensitive frequency selective radome with wideband absorption" 2017 4th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical Computer and Electronics (UPCON) pp. 556-561 Oct. 2017.

24. G. I. Kiani K. L. Ford K. P. Esselle A. R. Weily and C. J. Panagamuwa "Oblique Incidence Performance of a Novel Frequency Selective Surface Absorber" IEEE Trans. Antennas Propag vol. 55 no. 10 pp. 2931-2934 Oct. 2017.

25. Істішев В. Як працюють Apple Airtags? Що таке UWB та чіп U1? [Електронний ресурс] / Валерій Істішев // DROIDER. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://droider.ru/post/kak-rabotayut-apple-airtags-chto-takoe-uwb-i-chip-u1-razbor-07-05-2021/>.