

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему: «СИСТЕМА ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ З
ВИКОРИСТАННЯМ СВІТЛОВИХ СИГНАЛІВ»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 123 Комп'ютерної інженерії
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Комп'ютерні системи та мережі
(назва)

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело*

(підпис)	Максим БУТУСОВ Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача

Виконав:	здобувач(ка) вищої освіти гр. <u>КСДМ-62</u> <u>Максим БУТУСОВ</u> Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Керівник: науковий ступінь, вчене звання	<u>Віталій ВОЛОХІН</u> Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Рецензент: науковий ступінь, вчене звання	Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Комп'ютерної інженерії

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Освітньо-професійна програма Комп'ютерні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Наталія ЛАЩЕВСЬКА

_____ Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
«_____» _____ 2024р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Бутусов Максим Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Система передачі інформації з використанням світлових сигналів»

керівник кваліфікаційної роботи Віталій ВОЛОХІН, канд.техн.наук, доцент,
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від
«15» жовтня 2024р. №320,

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «29» грудня 2024р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Науково-технічна література, параметри роботи світлових систем зв'язку, принципи інтеграції гібридних мереж, методи реалізації технології Li-Fi, вимоги до безпечної та високошвидкісної передачі даних, критерії оцінки ефективності систем зв'язку.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз систем передачі інформації світловими сигналами

2. Технічні особливості та аналіз ефективності системи світлового зв'язку

3. Проектування та інтеграція Li-Fi у гібридні системи зв'язку

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація

1. Мета, об'єкт, предмет дослідження

2. Актуальність роботи

3. Проблематика сучасних технологій передачі даних

4. Обмеженість використання волоконно-оптичного зв'язку

5. Створення доступного рішення для масового ринку

6. Концепція гібридного маршрутизатора з підтримкою Li-Fi

7. Принцип роботи гібридного маршрутизатора

8. Принцип роботи модифікованих ламп

9. Принцип роботи у кінцевих пристроях

10. Інтеграція запропонованого рішення у базовий маршрутизатор

11. Майбутній потенціал та перспективи впровадження
 12. Порівняння існуючих рішень та запропонованого концепту
 13. Висновки
 14. Продовження висновків
 15. Публікації та апробація роботи
6. Дата видачі завдання «01» вересня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір даних	10.10-12.10.2024	
2	Обробка матеріалу	12.10-15.10.2024	
3	Розробка теоретичної частини	15.10-18.10.2024	
4	Технічні особливості та аналіз ефективності системи світлового зв'язку	18.10-22.10.2024	
5	Проектування та інтеграція Li-Fi у гібридні системи зв'язку	22.10-26.11.2024	
6	Висновки за результатами аналізу	29.11-30.11.2024	
7	Розробка презентації	30.11-08.12.2024	
8	Передзахист	09.12-11.12.2024	
9	Здача в деканат	20.12-29.12.2024	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Максим БУТУСОВ

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Віталій ВОЛОХІН

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістр: 112 стор., 68 рис., 4 табл., 56 джерел.

Мета роботи – аналіз, розробка та оцінка систем передачі інформації за допомогою світлових сигналів у рамках гібридної комунікаційної мережі з акцентом на інтеграцію технології Li-Fi для високошвидкісної, безпечної та енергоефективної передачі даних.

Об'єкт дослідження – гібридні системи зв'язку, які поєднують світлові технології, такі як Li-Fi, з традиційними методами зв'язку, включаючи зв'язок по лінії електропередач і радіочастотні системи.

Предмет дослідження – конструкція, компоненти та принципи роботи світлових систем зв'язку, зосереджені на їх інтеграції в гібридні мережі з використанням Li-Fi-сумісних маршрутизаторів і модифікованих ламп як вузлів мережі.

Короткий зміст роботи: Ця робота досліджує можливості та обмеження систем зв'язку на основі світла, зосереджуючись на їх інтеграції в гібридні мережі зв'язку. Дослідження включає аналіз принципів світлових технологій, оцінку їхніх технічних характеристик і проектування гібридної системи з використанням маршрутизаторів із підтримкою Li-Fi та модифікованих ламп.

Запропонована система використовує видиме світло та інфрачервоний зв'язок для двонаправленої передачі даних і включає зв'язок по лінії електропередач (PLC) для масштабованості. Дослідження підкреслює перевагу запропонованої системи, що включає високу швидкість, енергоефективність і підвищену безпеку, одночасно вирішуючи такі проблеми, як складність інтеграції та витрати на впровадження.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: LI-FI, VLC, PLC, IR ГІБРИД, МЕРЕЖА, БЕЗПЕКА, ЕФЕКТИВНІСТЬ, МАСШТАБОВАНІСТЬ.

ABSTRACT

The text part of the qualification work for obtaining a master's degree: 109 pages, 68 figures, 5 tables, 56 sources.

The purpose of the work is to analyze, develop and evaluate information transmission systems using light signals as part of a hybrid communication network with an emphasis on the integration of Li-Fi technology for high-speed, secure and energy-efficient data transmission.

The object of the research is hybrid communication systems that combine light technologies such as Li-Fi with traditional communication methods, including power line communication and radio frequency systems.

The subject of research is the design, components and principles of light communication systems, focused on their integration into hybrid networks using Li-Fi compatible routers and modified lamps as network nodes.

Summary of the work: This work explores the capabilities and limitations of light-based communication systems, focusing on their integration into hybrid communication networks. The research includes analyzing the principles of lighting technologies, evaluating their technical characteristics, and designing a hybrid system using Li-Fi-enabled routers and modified lamps.

The proposed system uses visible light and infrared communication for bidirectional data transmission and includes power line communication (PLC) for scalability. The study highlights the advantage of the proposed system, which includes high speed, energy efficiency, and increased security, while addressing issues such as integration complexity and implementation costs.

KEY WORDS: LI-FI, VLC, PLC, IR HYBRID, NETWORK, SECURITY, EFFICIENCY, SCALABILITY.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ СВІТЛОВИМИ СИГНАЛАМИ	10
1.1 Основні принципи передачі інформації за допомогою світлових сигналів.....	10
1.2 Типи джерел і приймачів світлових сигналів.....	18
1.3 Види середовищ для передачі сигналів	27
РОЗДІЛ 2 ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ СВІТЛОВОГО ЗВ'ЯЗКУ	33
2.1 Основні компоненти системи передачі інформації світловими сигналами.....	33
2.2 Характеристики системи світлового зв'язку.....	41
2.3 Вплив зовнішніх факторів на якість передачі сигналів	47
2.4 Переваги і обмеження світлових систем зв'язку в порівнянні з іншими технологіями.....	56
2.5 Сучасні напрямки розвитку.....	62
РОЗДІЛ 3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ LI-FI У ГІБРИДНІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ	72
3.1 Огляд технології Li-Fi.....	72
3.2 Гібридний маршрутизатор з можливостями Li-Fi	75
3.3 Модифіковані лампи як вузли Li-Fi	83
3.4 Зв'язок між кінцевими пристроями та лампами	88
3.5 Порівняння запропонованої системи з існуючими.....	92
ВИСНОВКИ.....	98
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	99
Додаток А. ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація).....	104
Додаток Б. Оцінка вартості комплектуючих для розробки прототипів запропонованої системи.....	117

ВСТУП

Світлові системи зв'язку стали інноваційною технологією, яка забезпечує високу швидкість передачі даних, енергоефективність і низьку затримку, знаходячи застосування у сферах комунікацій, медицини, промисловості та «розумних» міст. Інтеграція таких систем із традиційними технологіями відкриває перспективи створення гібридних мереж, які відповідають вимогам сучасного інформаційного суспільства.

Передача даних світловими сигналами заснована на використанні видимого світла, інфрачервоних та ультрафіолетових спектрів, що забезпечує значно вищу пропускну здатність порівняно з радіочастотними системами. Завдяки локалізованості сигналу, який обмежується одним приміщенням, підвищується рівень безпеки передачі даних, оскільки сигнал не проходить через стіни, зменшуючи ризик перехоплення. Li-Fi (Light Fidelity).

Особливу увагу приділено технічним характеристикам систем на основі світлових сигналів. Вони демонструють високу ефективність за умов обмеженої енергетичної інфраструктури, а також стійкість до перешкод у радіочастотному діапазоні. Водночас проєктування подібних систем вимагає вирішення низки викликів, таких як інтеграція з існуючими мережами, подолання впливу зовнішніх факторів і забезпечення масштабованості. Впровадження гібридних систем, які поєднують Li-Fi (Light Fidelity), IR (Infrared Radiation) та PLC (Powerline Communication), є перспективним напрямом для усунення цих обмежень.

Мета цієї роботи полягає в аналізі, розробці та оцінці систем передачі інформації за допомогою світлових сигналів у рамках гібридної комунікаційної мережі. У ході дослідження розглянуто основні компоненти таких систем, їхні переваги та недоліки, а також перспективи використання в різних галузях. Особливий акцент зроблено на інтеграції Li-Fi у гібридні маршрутизатори та модифіковані лампи як вузли мережі, що дозволяє забезпечити високошвидкісну, енергоефективну та захищену передачу даних.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ СВІТЛОВИМИ СИГНАЛАМИ

1.1 Основні принципи передачі інформації за допомогою світлових сигналів

Передача інформації за допомогою світлових сигналів базується на перетворенні даних у форму світла, передачі їх через середовище і подальшому декодуванні на приймальній стороні. Такий процес є основою для таких технологій, як оптоволоконний зв'язок, оптика вільного простору та безпроводні системи, наприклад, Li-Fi. Основними етапами тут є кодування даних, їх передача і прийом із наступним декодуванням, що забезпечує ефективне функціонування всієї системи. Використання світлових сигналів для передачі інформації має перевагу над традиційними методами завдяки високій швидкості передачі даних і мінімальним втратам сигналу.

Кодування даних за допомогою модуляції світлових сигналів. Кодування даних у світлові сигнали є першим етапом у передачі інформації. Для цього використовується модуляція – процес накладання інформації на світлову хвилю. Завдяки цьому методи модуляції забезпечують передачу як цифрових, так і аналогових сигналів. Нижче розглянуто основні типи модуляції, що застосовуються у світлових технологіях.

Амплітудна модуляція (АМ) – метод передбачає зміну інтенсивності світлового сигналу для представлення даних. У випадку аналогової амплітудної модуляції інтенсивність світлової хвилі змінюється відповідно до амплітуди вхідного сигналу. У цифровій амплітудній модуляції використовується двійкове представлення даних: «1» відповідає увімкненню джерела світла, а «0» – вимкненню. Прикладом використання є технологія Li-Fi, де зміна інтенсивності світла передає двійкові дані (див. рис. 1.1) [1].

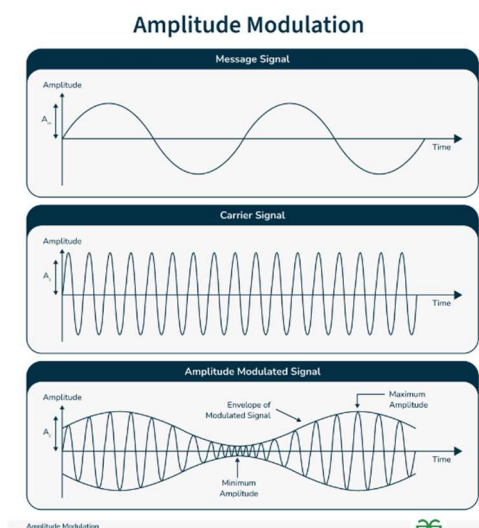


Рисунок 1.1 – Кодування даних за допомогою модуляції світлових сигналів:
амплітудна модуляція (AM)

Частотна модуляція (FM) – інформація кодується зміною частоти світлової хвилі. У аналоговій частотній модуляції частота змінюється безперервно відповідно до вхідного сигналу. У цифровій – передача даних відбувається шляхом зміни частоти або фази світлових імпульсів. Такий метод застосовується, наприклад, у високоточному оптичному зв'язку з використанням частотно-модульованих лазерів (див. рис. 1.2) [2].

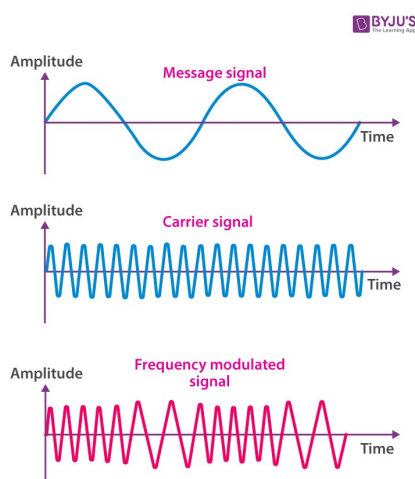


Рисунок 1.2 – Кодування даних за допомогою модуляції світлових сигналів:
частотна модуляція (FM)

Імпульсна модуляція – передбачає передачу даних у вигляді дискретних світлових імпульсів, і він є доволі ефективним і широко використовується в оптоволоконному зв'язку (див. рис. 1.3) [3]:

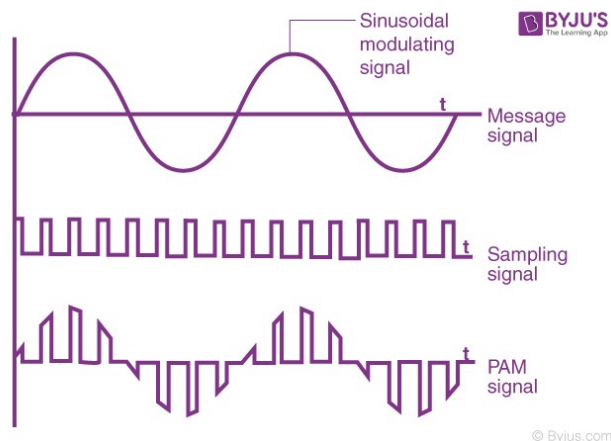


Рисунок 1.3 – Кодування даних за допомогою модуляції світлових сигналів:
імпульсна модуляція

1. Імпульсно-кодова модуляція (PCM): кожен імпульс відповідає цифровому коду. Такий метод поширений у цифрових телекомунікаціях, наприклад, для передачі голосу та даних у кабельному телебаченні.

2. Модуляція позиції імпульсу (PPM): інформація кодується шляхом зміни позиції імпульсу в заданому проміжку часу.

Загалом методи модуляції дозволяють ефективно використовувати світлові сигнали для передачі даних у видимому та невидимому спектрах, забезпечуючи високі швидкості та надійність передачі.

Передача даних через розповсюдження через середовище передачі сигналів. Після кодування даних і формування модульованого світлового сигналу наступним кроком є передача цього сигналу через середовище. Вибір середовища значно впливає на якість, дальність і ефективність передачі даних, оскільки воно визначає умови розповсюдження сигналу між точками А та Б. Людство тривалий час удосконалювало методи передачі, зокрема оптоволокну, яке стало одним із найефективніших середовищ для забезпечення високої швидкості й надійності передачі інформації.

Передача даних за допомогою оптоволокна. Оптичні волокна є провідним середовищем для передачі світлових сигналів у сучасних телекомунікаціях. Такі тонкі, гнучкі нитки зі скла або пластику складаються з двох основних елементів (див. рис. 1.4) [4]:

1. Серцевина: основний канал, через який проходить світло.
2. Оболонка: зовнішній шар, який утримує світло всередині серцевини за допомогою багаторазових відбиттів.
3. Світло, відбиваючись від внутрішніх стінок оболонки, продовжує свій шлях до пункту призначення. Завдяки цьому механізму сигнал зберігається і не втрачає інтенсивності під час передачі. Проте важливо уникати перегинів кабелю: у місцях перегину світло може вийти з волокна, що призводить до втрати даних і збоїв у передачі.

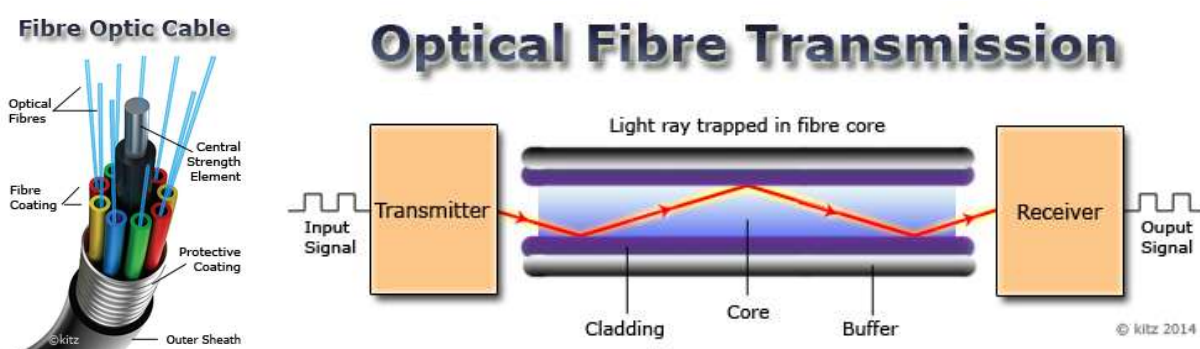


Рисунок 1.4 – Будова та принцип роботи оптоволокна

Переваги використання оптоволокна:

- оптоволоконні кабелі здатні передавати величезні обсяги даних;
- забезпечується ефективна передача на великі відстані;
- відсутність впливу зовнішніх джерел шуму.

Недоліки використання оптоволокна:

- крихкість волокна, що може призвести до пошкоджень при перегинах;
- ослаблення сигналу та дисперсія, які потребують ретельного керування;

- оптоволокну широко використовується для забезпечення інтернет-з'єднань на великі відстані, наприклад, у глобальних магістралях, що проходять під океанами, забезпечуючи безперебійний зв'язок між континентами.

Оптична передача у вільному просторі (FSO). FSO-системи передбачають передачу світлових сигналів через повітря або вакуум без використання оптичних волокон. У таких системах сигнал передається через відкритий простір між передавачем і приймачем (див. рис. 1.5) [5].

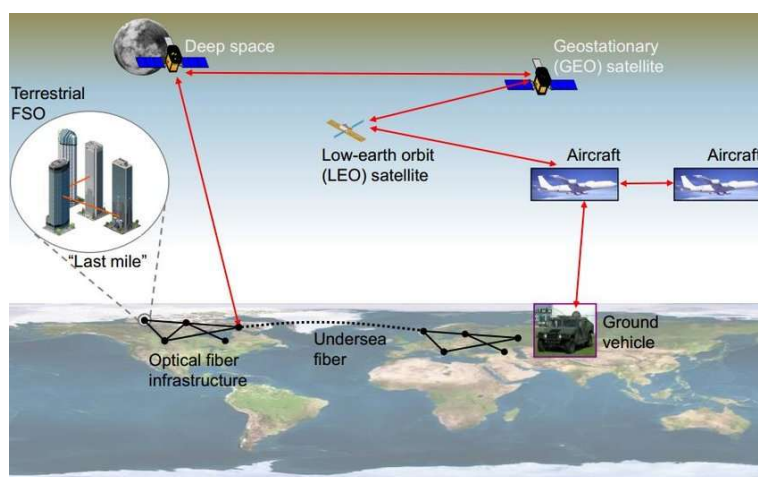


Рисунок 1.5 – Принцип роботи та взаємодії FSO-систем

Основні характеристики FSO:

1. Відсутність фізичних кабелів: передача сигналу безпосередньо через повітря.
2. Висока точність: світловий промінь повинен мати чітко визначений напрямок, щоб дістатися до приймача.

Сфери, де застосовується FSO:

1. Супутниковий зв'язок: використовується у лазерних каналах зв'язку між супутниками, Міжнародною космічною станцією та наземними пунктами.
2. Зв'язок між будівлями: для з'єднання мереж у міських умовах.
3. Військові та космічні програми: забезпечення захищеного зв'язку у складних умовах.

Обмеження FSO:

- потреба у прямій видимості між передавачем і приймачем.
- залежність від погодних умов: туман, дощ чи пил значно знижують якість передачі.

Гібридні системи. Для подолання обмежень кожного з методів передачі застосовуються гібридні системи, які поєднують оптичні волокна та FSO. Наприклад, волоконно-оптичні магістралі використовуються разом із FSO для забезпечення зв'язку на останніх етапах передачі даних («остання миля»), що дозволяє використовувати переваги обох технологій: високу швидкість та надійність оптоволокна і гнучкість FSO для локального зв'язку (див. рис. 1.6) [6].

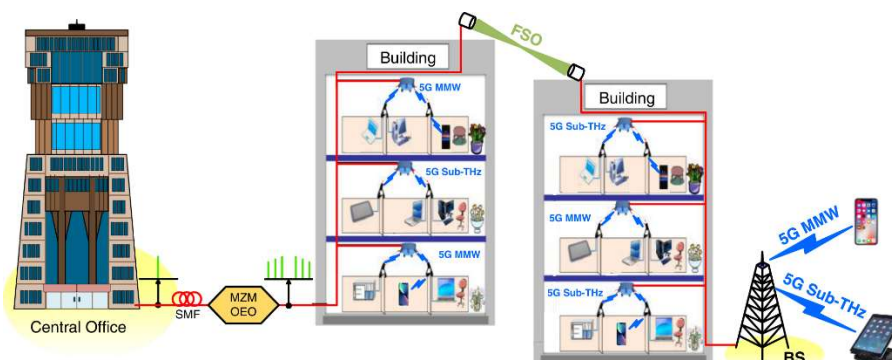


Рисунок 1.6 – Приклад гібридних оптичних систем:
оптоволокло та FSO

Прийом даних та їх декодування (перетворення світла назад у дані). Після проходження сигналу через середовище передачі наступним етапом є його прийом та декодування, тобто перетворення світлового сигналу назад у вихідні дані. На приймальному кінці сигнал повинен бути захоплений, декодований і перетворений у ту саму форму, в якій він був відправлений. Такий процес складається з кількох ключових етапів і вимагає використання спеціалізованих технологій та пристроїв (див. рис. 1.7) [7].

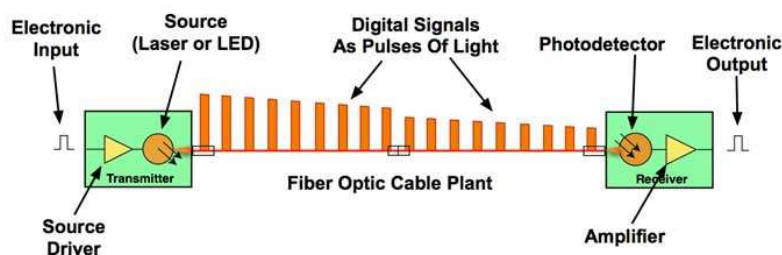


Рисунок 1.7 – Принцип передачі та прийому даних

Основним елементом систем прийому є фотодетектори, які перетворюють світловий сигнал на електричний. Серед основних типів фотодетекторів виділяють:

1. Фотодіоди – це напівпровідникові пристрої, які генерують електричний струм під дією світла. Вони широко застосовуються в оптичних приймачах завдяки своїй простоті та ефективності.
2. Лавинні фотодіоди (APD) – це такі більш чутливі пристрої, що забезпечують додаткове посилення сигналу, що робить їх ідеальними для зв'язку на великих відстанях.
3. Фототранзистори – подібні до фотодіодів, але мають вбудоване підсилення, яке підвищує чіткість сигналу.

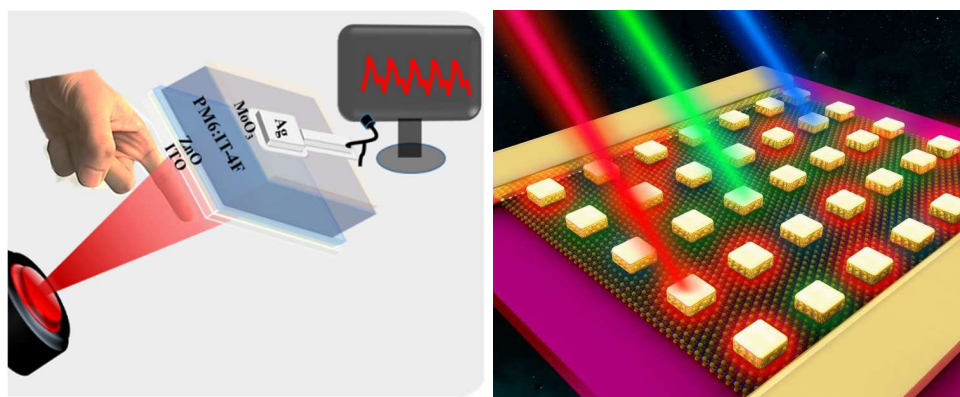


Рисунок 1.8 – Приймаюча сторона: фотодетектор

У волоконно-оптичних системах зв'язку фотодетектори забезпечують перетворення вхідного світлового сигналу в електричні імпульси, які потім проходять подальшу обробку (див. рис. 1.8) [8].

Обробка та декодування сигналу. Після того як сигнал перетворено на електричний, необхідно виконати обробку, щоб отримати вихідні дані, що включає у процес [9]:

1. Демодуляцію – зворотне відокремлення даних від несучої світлової хвилі.
2. Корекцію помилок – спеціальні алгоритми, такі як FEC (Forward Error Correction), які дозволяють виявляти та виправляти помилки, що виникають під час передачі. Наприклад, у цифрових системах ці алгоритми гарантують цілісність даних, навіть якщо деякі біти були спотворені. Без цього файл може стати непридатним для використання через пошкодження структури.

Доставка кінцевих даних. Після завершення обробки декодовані дані передаються користувачеві у вихідній формі, будь то текст, голос, відео чи інші цифрові дані (див. рис. 1.9) [10]. Наприклад:

- потокове відео або аудіо для онлайн-конференцій (Zoom, Discord);
- передача даних для роботи вебсайтів та додатків;
- голосові виклики через месенджери (Telegram, WhatsApp).

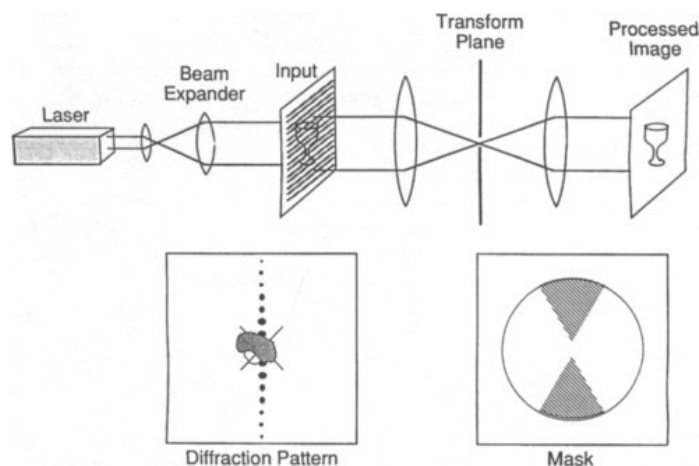


Рисунок 1.9 – Процес передачі та доставки даних

Такий складний процес дозволяє забезпечити безперебійну роботу інтернету та зв'язку навіть на великих відстанях, зокрема між континентами.

Загалом процес прийому та декодування можна розділити на три основні кроки [7-10]:

- 1) Кодування – модулювання даних у світловий сигнал.
- 2) Передача – розповсюдження сигналу через середовище (оптоволокну або повітря).
- 3) Прийом і декодування – перетворення світла на електричний сигнал, обробка та відновлення вихідних даних.

Весь цей процес є основою сучасних технологій зв'язку, забезпечуючи високу швидкість, надійність та стійкість до електромагнітних перешкод. Подальші дослідження та розробки в цій галузі спрямовані на вдосконалення стандартів, що дозволяє підвищувати продуктивність і ефективність оптичних систем передачі даних.

1.2 Типи джерел і приймачів світлових сигналів

Ефективність і надійність світлових систем зв'язку безпосередньо залежать від характеристик джерел, які генерують світлові сигнали, та приймачів, що їх сприймають, декодують і перетворюють на придатну для користувача інформацію. Джерела відповідають за створення сигналів, які несуть закодовані дані, а приймачі забезпечують їх точну інтерпретацію. Кожен із цих компонентів значною мірою визначає продуктивність, радіус дії та адаптивність системи у різних умовах експлуатації.

Джерела світла для передачі інформації різняться за своїми властивостями, продуктивністю та сферою використання. Основними видами є:

- лазери;
- світлодіоди (LED);
- діодні лазери.

Джерела світлових сигналів – лазери. Лазери є одними з найбільш важливих і поширених джерел світлових сигналів завдяки своїм унікальним характеристикам. Вони використовуються для створення когерентного світла (усі

хвилі мають однакову довжину і фазу), що забезпечує точність і мінімальні втрати сигналу (див. рис. 1.10) [11].

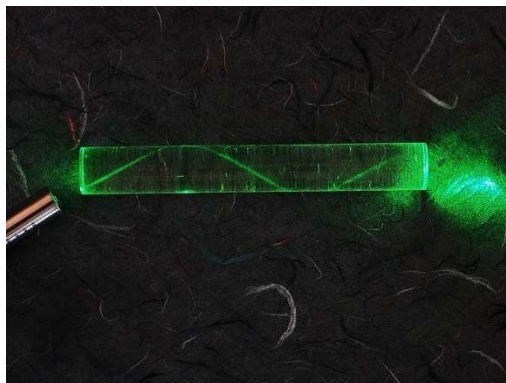


Рисунок 1.10 – Демонстративний процес проходження лазера через оптоволокну

Характеристики лазерів [11]:

1. Когерентне світло: лазер випромінює світло із фіксованою довжиною хвилі, що дозволяє зменшити спотворення при передачі.
2. Висока інтенсивність: дає змогу передавати інформацію на великі відстані без значних втрат.
3. Вузький і сфокусований промінь: мінімізує розсіювання і забезпечує точне спрямування сигналу до приймача.

Сфери, де застосовуються лазери:

1. Телекомунікації: лазери є основними джерелами сигналів у волоконно-оптичних мережах, що забезпечують високу швидкість передачі даних.
2. Космічний зв'язок: використовуються для передачі даних між супутниками і наземними станціями завдяки високій точності і швидкості.
3. Медицина: лазери застосовуються у хірургічних процедурах для розрізання тканин і обробки ран.
4. Промисловість: у сфері високоточної обробки матеріалів, лазери використовуються для різання, зварювання і гравіювання.
5. Оптичні диски: лазери читають і записують інформацію на носії типу DVD або Blu-Ray.

Переваги використання лазерів:

- мінімальні втрати сигналу на великих дистанціях;
- надзвичайно високі швидкості передачі.

Недоліки використання лазерів:

- висока вартість потужних лазерів;
- чутливість до точного вирівнювання передавача і приймача;
- складність обслуговування.

Джерела світлових сигналів – світлодіоди (LED). Світлодіоди — це напівпровідникові пристрої, що випромінюють світло при проходженні через них електричного струму. Їх використовують у системах зв'язку, де не потрібна висока когерентність сигналу (див. рис. 1.11) [12].

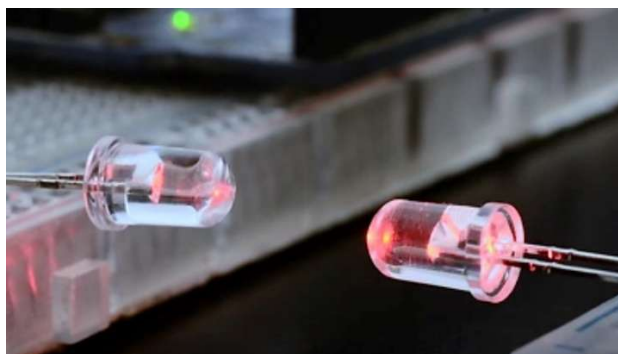


Рисунок 1.11 – Зовнішній вигляд та процес проходження світлодіода через оптоволокну

Характеристики світлодіодів [12]:

1. Некогерентне світло: випромінює широкосмугове світло, що охоплює діапазони від видимого до інфрачервоного спектра.
2. Енергоефективність: споживає мало енергії і має тривалий термін служби.

Сфери, де застосовуються світлодіоди:

1. Технології Li-Fi: світлодіоди передають дані за допомогою модульованого світла, яке використовується для безпроводного зв'язку.
2. Розумні будинки: у системах освітлення світлодіоди забезпечують одночасне освітлення і передачу інформації.

3. Автомобільна індустрія: використовуються для зв'язку між транспортними засобами через світлові сигнали фар або ліхтарів.

Переваги використання світлодіодів:

- низька вартість і довговічність;
- енергоефективність у порівнянні з лазерами;
- безпечність при використанні на коротких відстанях;

Недоліки використання світлодіодів:

- обмежена швидкість передачі даних;
- низька стабільність роботи в умовах зовнішніх джерел світла, які можуть створювати перешкоди.

Джерела світлових сигналів – діодні лазери. Діодні лазери є проміжною ланкою між традиційними лазерами і світлодіодами. Вони мають дещо нижчу когерентність, проте вирізняються компактністю і ефективністю (див. рис. 1.12) [10-11].

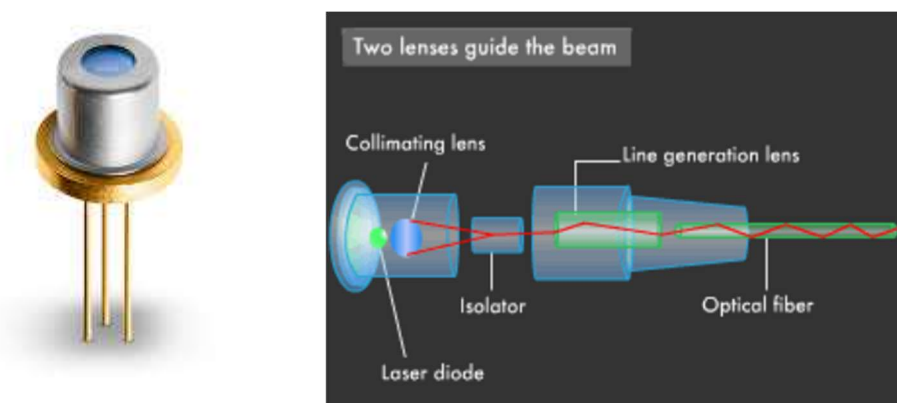


Рисунок 1.12 – Зовнішній вигляд та процес проходження лазерного діода через
ОПТОВОЛОКНО

Характеристики світлодіодів [10-11]:

1. Компактність: легко інтегруються у пристрої.
2. Сфокусований промінь: забезпечує високу точність передачі, хоча й нижчу, ніж у традиційних лазерів.

3. Помірна когерентність: підходить для застосувань, де надвисока точність не є критичною.

Сфери, де застосовуються діодні лазери:

1. Оптичні диски: використовуються у пристроях для зчитування та запису CD, DVD і Blu-Ray.
2. Оптоволоконний зв'язок: діодні лазери ефективні для систем передачі даних середньої і малої дальності.
3. Лазерні принтери: застосовуються для високоточних друкарських операцій.

Переваги використання діодних лазерів:

- доступність у порівнянні з потужними лазерами;
- енергоефективність на рівні світлодіодів;
- простота інтеграції у компактні пристрої.

Недоліки використання діодних лазерів:

- обмежена потужність;
- короткий термін служби при інтенсивному використанні, що може призводити до втрати ефективності з часом.

Кожен такий тип джерела світлових сигналів має свої переваги та недоліки, які визначають його застосування. Лазери забезпечують високу точність і дальність передачі, але мають високу вартість і складність експлуатації. Світлодіоди підходять для економних і енергоефективних рішень, однак поступаються за швидкістю передачі. Діодні лазери поєднують переваги обох підходів, зберігаючи доступність і функціональність у більшості середньоінтенсивних завдань [9-12].

Окрім джерел світлових сигналів, важливу роль у системах оптичного зв'язку відіграють приймачі, які приймають і обробляють ці сигнали. Основне завдання приймачів — перетворення світла на електричні сигнали, які потім можуть бути декодовані для подальшого використання. Центральним елементом таких пристроїв є фотодетектори, що є невід'ємною частиною оптичного зв'язку.

Фотодетектор — це такий пристрій, що здатний сприймати світлові сигнали й перетворювати їх на електричні. Вони забезпечують прийом і декодування

переданих даних, що робить їх критично важливими для роботи оптичних систем зв'язку (див. рис. 1.13) [13].



Рисунок 1.13 – Зовнішній вигляд фотодетектора

Існує кілька основних типів фотодетекторів [13-16]:

- фотодіоди;
- лавинні фотодіоди;
- фоторезистори.

Приймаюча сторона світлових сигналів – фотодіоди. Фотодіоди — це напівпровідникові пристрої, які генерують електричний струм під дією світла (див. рис. 1.14).



Рисунок 1.14 – Зовнішній вигляд фотодіода

Характеристики фотодіодів [14]:

1. Висока швидкість реакції, що дозволяє використовувати їх у високошвидкісних системах зв'язку.

2. Чутливість до широкого спектру світлових хвиль.

Сфери, де застосовуються фотодіоди:

1. Використовуються в оптичних приймачах для декодування даних, що передаються через волоконно-оптичні кабелі.

2. У технології Li-Fi (Light Fidelity), де фотодіоди приймають модульовані світлодіодні сигнали та перетворюють їх у дані.

Приймаюча сторона світлових сигналів – лавинні фотодіоди (APD). Лавинні фотодіоди забезпечують внутрішнє посилення сигналу завдяки явищу лавинного множення, що підвищує їх чутливість, особливо для роботи на великих дистанціях (див. рис. 1.15) [15].



Рисунок 1.15 – Зовнішній вигляд лавинних фотодіодів

Характеристики лавинних фотодіодів [15]:

- висока чутливість навіть за умов слабого сигналу;
- підходять для застосування в системах зв'язку на великі відстані.

Приймаюча сторона світлових сигналів – фоторезистори. Фоторезистори поєднують властивості фотодіодів із вбудованим підсиленням, що робить їх придатними для роботи за умов слабого освітлення (див. рис. 1.16) [16].

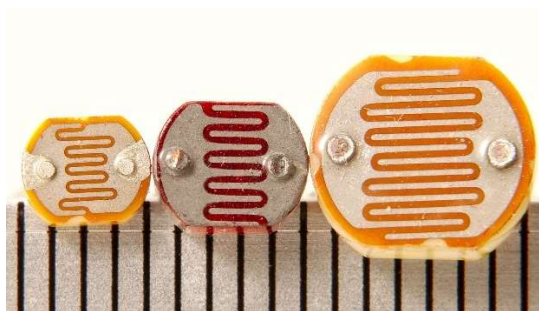


Рисунок 1.16 – Зовнішній вигляд фоторезисторів

Характеристики фоторезисторів [16]:

- здатність працювати в умовах мінімальної інтенсивності світла;
- використовуються в умовах, де потрібна висока чутливість, але обмежена швидкість;
- застосування фотодетекторів

Фотодетектори широко використовуються у різних галузях:

1. Телекомунікації: використовуються для прийому і декодування сигналів у волоконно-оптичних системах.
2. Медичне обладнання: входять до складу пульсометрів, пульсоксиметрів і діагностичних пристроїв, що вимагають високої швидкості передачі даних.
3. Li-Fi: технологія безпроводного зв'язку на основі світлових сигналів, де фотодетектори грають ключову роль.

Окрім фотодетекторів, у багатьох системах застосовуються оптичні датчики, які визначають зміни в інтенсивності, довжині хвилі чи фазі світла, перетворюючи їх на електричні сигнали(див. рис. 1.17) [17].



Рисунок 1.17 – Різноманітність оптичних датчиків

Особливості оптичних датчиків [17]:

- широкий діапазон виявлення, включаючи видиме, інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання;
- гнучкість у застосуванні.

Сфери, де застосовуються оптичні датчики:

1. Промислова автоматизація: оптичні датчики контролюють виробничі процеси та виявляють дефекти у реальному часі.
2. Інтернет речей (IoT): використовуються в сенсорах, що реагують на зміни освітлення, руху та інших параметрів навколишнього середовища.
3. Системи безпеки: виявляють рух або зміни у світлових умовах для цілей спостереження.

Переваги використання оптичних датчиків:

- безконтактність вимірювань, що знижує знос обладнання;
- висока точність і надійність.

Недоліки використання оптичних датчиків:

- чутливість до умов навколишнього середовища, таких як пил і туман;
- потреба у регулярному калібруванні для підтримки точності.

Системи оптичного зв'язку вимагають ретельного вибору джерел і приймачів світлових сигналів. Лазери й діодні лазери забезпечують необхідну інтенсивність і точність передачі на великі відстані, тоді як світлодіоди оптимальні для енергоефективного короткодістанційного зв'язку. На стороні приймача фотодетектори та оптичні датчики виконують критичну функцію прийому і перетворення сигналів у цифрові дані. З розвитком технологій їх ефективність і спектр застосування постійно розширюються, сприяючи створенню швидших і надійніших мереж [12-17].

1.3 Види середовищ для передачі сигналів

Світловий зв'язок — це технологія, яка використовує світлові сигнали для передачі даних. Завдяки високій швидкості передачі інформації, стійкості до зовнішніх впливів та здатності долати великі відстані, цей тип зв'язку стає

незамінним у багатьох сферах. Для організації такої передачі використовуються спеціальні середовища, кожне з яких має свої особливості, переваги та виклики.

Головними типами середовищ передачі сигналу є:

- волоконно-оптичні системи, які передають сигнали через оптичні кабелі;
- оптичний зв'язок у вільному просторі (Free-Space Optics, FSO), де дані передаються через відкритий простір за допомогою світлових імпульсів.

Для забезпечення ефективної роботи будь-якої з цих технологій необхідно створити надійну систему передачі даних, яка буде стабільно функціонувати у різних умовах, мінімізуючи вплив зовнішніх факторів.

Середовище передачі даних – волоконно-оптичні системи. Волоконно-оптичні системи є основою сучасних телекомунікаційних мереж (див. рис. 1.18), які забезпечують передачу даних на великі відстані з мінімальними втратами. Вони використовують тонкі нитки з високоякісного скла або пластику, які спрямовують світлові імпульси, що дозволяє досягати високої швидкості передачі даних і стабільності сигналу, що робить такі системи незамінними для глобальних мереж зв'язку [18].

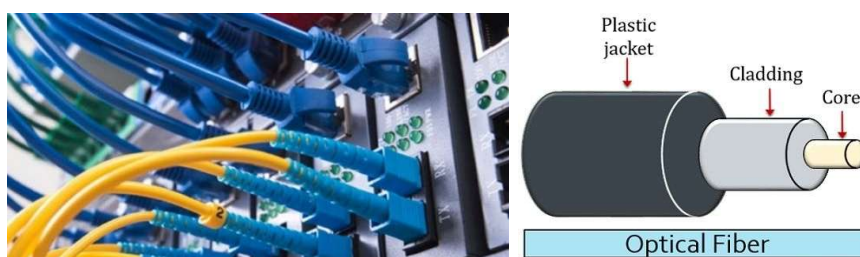


Рисунок 1.18 – Зовнішній вигляд та у розрізі: оптоволокну

Волоконно-оптичний кабель має багатшарову структуру, що забезпечує захист і функціональність. Основними елементами є [18]:

1. Серцевина:

- центральна частина кабелю, де передається світловий сигнал;

- виготовлена зі скла або пластику з високим показником заломлення;
- забезпечує передачу даних завдяки явищу повного внутрішнього відбиття.

2. Оболонка:

- оточує сердцевину та відбиває світловий сигнал назад, не дозволяючи йому виходити за межі волокна;
- сприяє збереженню сигналу в межах кабелю, мінімізуючи втрати.

3. Буферне покриття:

- захисний шар, який оберігає волокно від механічних пошкоджень та зовнішніх впливів;
- підвищує довговічність кабелю.

4. Зовнішня оболонка (куртка):

- останній захисний шар, що захищає кабель від вологи, хімічного впливу, ультрафіолетового випромінювання та інших зовнішніх факторів.

Світловий сигнал передається через сердцевину кабелю за рахунок багаторазового відбиття від оболонки. Світло проникає у сердцевину під певним кутом, що дозволяє зберігати напрямок сигналу навіть на великих відстанях – механізм мінімізує втрати та забезпечує високу якість передачі даних [18].

Світлові імпульси, що проходять через волокно, представляють собою закодовані дані. На приймальній стороні ці імпульси перетворюються на електричні сигнали, які використовуються для передачі інформації у звичних цифрових форматах (див. рис. 1.19) [18-19].

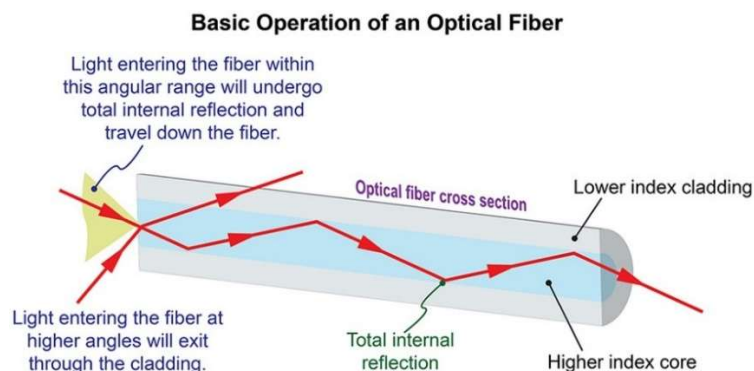


Рисунок 1.19 – Процес проходження світла через ізольоване середовище:
ОПТОВОЛОКНО

Типи оптичних волокон [19]:

1. Одномодове волокно (SMF):

- використовує лише один світловий режим для передачі сигналу;
- підходить для передачі даних на великі відстані (до 80–100 км без підсилювачів);
- часто використовується у міжконтинентальних магістральних мережах.

2. Багатомодове волокно (MMF):

- підтримує кілька режимів освітлення одночасно;
- підходить для коротких відстаней, наприклад, у локальних мережах та центрах обробки даних;
- використовується у домашніх підключеннях і невеликих офісах.

Переваги використання волоконно-оптичних систем [18-19]:

- можливість передавати величезні обсяги даних одночасно;
- забезпечує швидкісний доступ до інтернету та стабільність зв'язку.
- сигнал долає великі відстані з мінімальним затуханням;
- зменшує необхідність у повторювачах сигналу.
- світловий сигнал не піддається впливу магнітних або електричних полів.
- злому оптичного кабелю без спеціального обладнання майже неможливо.

— за правильних умов кабель служить десятиліттями.

Недоліки та виклики використання волоконно-оптичних систем [18-19]:

- потреба у спеціальному обладнанні та кваліфікованих спеціалістах;
- волокна легко пошкоджуються при надмірному згинанні;
- вартість кабелів і їх прокладки значно вища порівняно з мідними аналогами;
- у разі пошкодження волокна потрібно спеціальне обладнання для зварювання чи заміни.

Середовище передачі даних – оптичний зв'язок у вільному просторі (FSO).

FSO — це технологія передачі даних за допомогою світлових сигналів, що поширюються через відкритий простір, наприклад, повітря або вакуум, замість фізичних кабелів – тип зв'язку, що реалізується за допомогою лазерів або світлодіодів, які генерують світлові імпульси, спрямовані від передавача до приймача. Використання FSO є особливо ефективним у ситуаціях, де прокладання оптоволоконних кабелів є складним, дорогим або фізично неможливим, наприклад, через річки, шосе або в космічному просторі (див. рис. 1.20) [20-21].

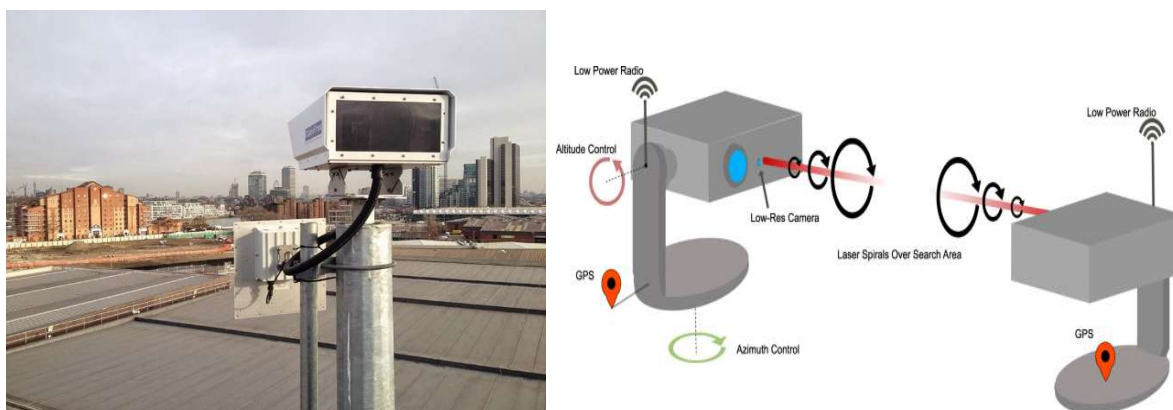


Рисунок 1.20 – Зовнішній вигляд та під час роботи:

CableFree Free Space Optics

Сфери застосування та переваги FSO [20-21]:

1. Космічний зв'язок: FSO активно використовується для передачі даних між супутниками, космічними апаратами та наземними станціями. Такі системи забезпечують високошвидкісні канали зв'язку, що особливо важливо для глибококосмічних місій. Наприклад, NASA інвестує значні ресурси у розвиток лазерного зв'язку, щоб забезпечити швидке і стабільне передавання великих обсягів даних на відстанях, недоступних для кабельних систем.

2. Зв'язок між будівлями: у міських районах FSO використовується для передачі даних між будівлями, де прокладка кабелів може бути ускладненою або недоцільною, що дозволяє створювати тимчасові або постійні високошвидкісні з'єднання без додаткових витрат на інфраструктуру.

3. Військові та оборонні системи: FSO забезпечує безпечні канали зв'язку із прямою видимістю, що особливо важливо під час тактичних операцій. Такий зв'язок складно перехопити, а мобільність його розгортання робить FSO ефективним для динамічних умов.

4. Аварійні ситуації та відновлення зв'язку: після стихійних лих чи техногенних катастроф FSO використовується для швидкого розгортання тимчасових каналів зв'язку. завдяки цьому можна забезпечити передачу даних у віддалені або пошкоджені регіони без потреби у масштабній інфраструктурі.

Переваги використання FSO [20-21]:

- FSO здатний досягати швидкостей на рівні гігабіт на секунду, порівнянних або навіть вищих, ніж у традиційного оптоволокна;
- не залежить від фізичної інфраструктури, що робить її ідеальною для важкодоступних місць або тимчасових рішень;
- канали FSO можуть бути встановлені набагато швидше, ніж кабельні системи, що робить їх зручними для термінових потреб;
- у короткостроковій перспективі витрати на встановлення FSO значно нижчі, ніж на прокладку оптоволоконних мереж, особливо для коротких і середніх дистанцій.

Недоліки та обмеження використання FSO [31-32]:

- для роботи FSO необхідний прямий шлях між передавачем і приймачем без перешкод. якщо на шляху сигналу є будь-які фізичні об'єкти або серйозні атмосферні явища, система може не працювати;
- атмосферні явища, такі як туман, дощ, сніг або пил, можуть послаблювати або розсіювати світлові сигнали, знижуючи їх ефективність;
- сигнал FSO має вузький промінь, який вимагає дуже точного вирівнювання. будь-які коливання або зсуви можуть порушити з'єднання;
- FSO зазвичай використовується для коротких і середніх дистанцій. для більших відстаней потрібне використання спеціального обладнання та коригувальних пристроїв.

FSO, в цілому, інноваційна технологія, яка відкриває нові можливості для організації зв'язку. Вона забезпечує високу швидкість передачі даних та гнучкість у встановленні, але має обмеження, пов'язані з погодними умовами та потребою у прямій видимості. Завдяки своїм унікальним перевагам FSO активно розвивається у сферах космічного зв'язку, військових операцій та аварійного відновлення зв'язку, доповнюючи існуючі рішення в галузі телекомунікацій [20-21].

РОЗДІЛ 2 ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ СВІТЛОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Основні компоненти системи передачі інформації світловими сигналами

Системи світлового зв'язку базуються на трьох ключових компонентах: джерелах світла, модуляторах і приймачах сигналів. Усі ці елементи взаємопов'язані та відповідають за успішну передачу даних через світлові сигнали. Від кожного компонента залежить ефективність, надійність і точність роботи системи. Для розуміння принципів функціонування світлового зв'язку необхідно детально проаналізувати кожную складову.

Система передачі інформації через світло починається з генерації світлового сигналу. Джерело світла створює несучу хвилю, яка модулюється даними для передачі інформації. Після цього сигнал проходить через модулюючий пристрій, який адаптує його до вимог передачі, і завершується процес на приймачі, який декодує дані назад у зрозумілу форму.

Джерела світла — це основа системи світлового зв'язку, оскільки саме вони генерують світлові хвилі, які несуть інформацію. Вибір джерела залежить від багатьох факторів, включаючи необхідну швидкість передачі даних, дальність зв'язку та сферу застосування. Основними джерелами світла є лазери та світлодіоди (LEDs), які мають різні характеристики та сфери використання.

Лазери є високотехнологічними джерелами світла, які працюють на основі принципу стимульованого випромінювання, де механізм забезпечує створення вузького, висококогерентного і монохроматичного променя. Завдяки цим властивостям лазери стали незамінними в системах оптичного зв'язку, які вимагають високої точності та швидкості передачі даних (див. рис. 2.1) [22-24].



Рисунок 2.1 – Типи лазерів: напівпровідникові, твердотільні, газові

Типи лазерів [22-24]:

1. Напівпровідникові лазери:

- найбільш поширені в оптоволоконному зв'язку завдяки компактності, ефективності та доступній вартості;
- використовуються для передачі даних на великі відстані.

2. Твердотільні лазери:

- придатні для високопотужних застосувань, таких як космічний зв'язок;
- забезпечують стабільність роботи навіть у складних умовах.

3. Газові лазери:

- рідко застосовуються у зв'язку, але широко використовуються в наукових дослідженнях завдяки точності.

Переваги використання лазерів:

- лазери створюють зосереджений промінь, що мінімізує втрати сигналу і забезпечує точну передачу даних;
- придатні для передачі сигналів на великі відстані, включаючи космічний простір;
- дає можливість досягти високих швидкостей передачі інформації.

Недоліки використання лазерів:

- технології лазерів є дорогими у порівнянні з іншими джерелами світла;
- лазерне випромінювання може пошкодити сітківку ока, тому потребує особливої обережності під час експлуатації.

Світлодіоди є економічно вигідним і енергоефективним джерелом світла. Вони генерують некогерентне світло, яке є менш зосередженим у порівнянні з лазерним, але чудово підходить для використання в системах малого радіуса дії (див. рис. 2.2) [25].

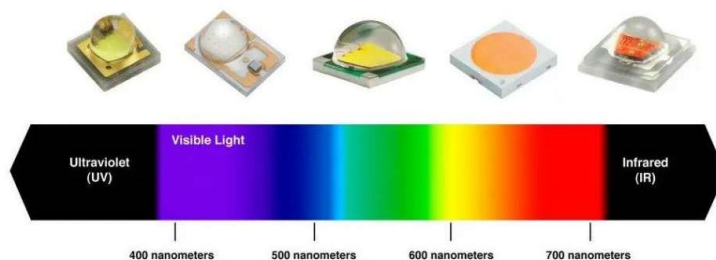


Рисунок 2.2 – Типи світлодіодів: інфрачервоні, видимого світла, ультрафіолетові

Типи світлодіодів [25]:

1. Інфрачервоні світлодіоди:

- використовуються в системах дистанційного керування та для короткодистанційного зв'язку;
- широко застосовуються в побутових пристроях, таких як пульти.

2. Світлодіоди видимого світла:

- є основним компонентом у технології Li-Fi (Light Fidelity).
- забезпечують передачу даних через видиме світло в умовах безпроводного зв'язку.

3. Ультрафіолетові світлодіоди:

- використовуються в спеціалізованих нішевих комунікаційних програмах, наприклад, для зв'язку в специфічних середовищах.

Переваги використання світлодіодів:

- низьке енергоспоживання дозволяє використовувати їх у пристроях, які працюють від акумуляторів;
- світлодіоди є дешевшими у виробництві, ніж лазери, і простішими у заміні;

- завдяки низькій потужності вони безпечніші в експлуатації і не потребують суворих заходів захисту.

Недоліки використання світлодіодів:

- через некогерентність світла передача сигналу на великі відстані є малоефективною;
- у порівнянні з лазерами, світлодіоди мають нижчий показник швидкості передачі через розсіювання світла.

Моделюючі пристрої відіграють важливу роль у системах передачі даних, оскільки перетворюють електричні сигнали в світлові для подальшої передачі. Такі пристрої забезпечують генерацію модуляційних шаблонів, які кодують інформацію у світловий сигнал (див. рис. 2.3) [1-3, 26].

Модуляція сигналу може здійснюватися трьома основними методами [26]:

1. Амплітудна модуляція (AM): інтенсивність
2. Частотна модуляція (FM): час
3. Імпульсна модуляція (PWM або PPM): інформація передається через імпульси різної ширини або положення.

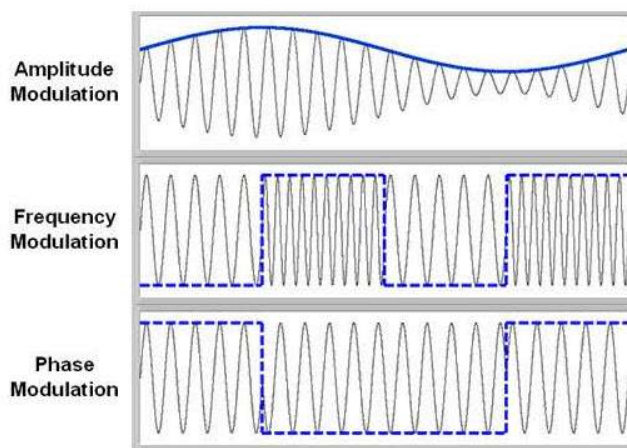


Рисунок 2.3 – Типи модуляції сигналу

Складові моделюючих пристроїв [1-3, 26]:

1. Електронні схеми: включають як аналогові, так і цифрові компоненти, що генерують сигнали модуляції. Наприклад:

- осцилятори для частотної модуляції;
- генератори імпульсів для імпульсної модуляції.

2. Оптоелектронні драйвери: вони перетворюють електричний сигнал у світловий – ці драйвери, у свою чергу, керують лазерними джерелами, регулюючи їхню потужність і забезпечуючи правильну генерацію сигналу протягом усього процесу передачі даних.

Переваги використання модуляції [1-3, 26]:

- модуляція дозволяє мультиплексувати сигнали, збільшуючи ємність каналів;
- частотна модуляція (FM) покращує чіткість сигналу, мінімізуючи вплив шумів;
- забезпечує інтеграцію аналогових сигналів із цифровими платформами, що дозволяє їх ефективно перетворювати.

Виклики та обмеження під час використання модуляції[1-3, 26]:

- деякі методи модуляції потребують складніших електронних рішень, що ускладнює їх реалізацію;
- деякі модуляційні схеми можуть вимагати значної електроенергії, що знижує їхню енергоефективність, особливо у великих системах передачі даних.

Після модуляції сигналу у світлову форму необхідно його декодувати для подальшої обробки, потім це завдання виконують приймачі сигналів, які вловлюють модульований світловий сигнал і перетворюють його назад у електричний. Від ефективності та точності приймача залежить збереження цілісності даних (див. рис. 2.4) [27].

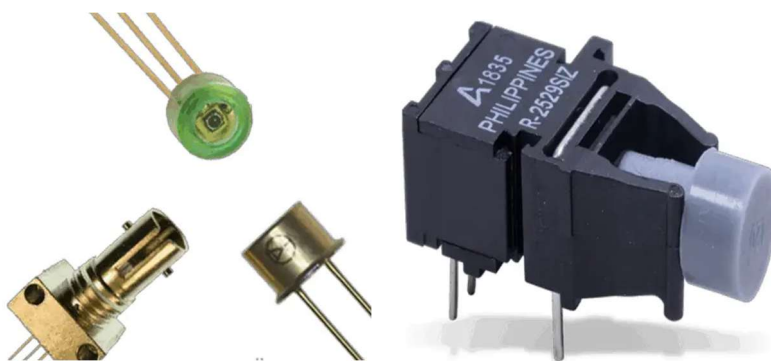


Рисунок 2.4 – Основні типи приймачів: фотодетектори (фотодіоди, лавинні фотодіоди, фототранзистори) та оптичний датчик

Основними типами приймачів є [27]:

1. Фотодетектори:

- фотодіоди: напівпровідникові пристрої, що перетворюють світло в електричний струм. вони широко застосовуються у волоконно-оптичному зв'язку через простоту використання та надійність;
- лавинні фотодіоди (APD): забезпечують високу чутливість і посилення сигналу, проте потребують більшої потужності для роботи;
- фототранзистори: працюють за принципом фотодіодів, але мають вбудоване підсилення сигналу, що робить їх корисними для додаткової обробки слабких сигналів.

2. Оптичні датчики:

- використовуються у програмах, де потрібна висока точність виявлення світла, наприклад, у промисловій автоматизації та системах Інтернету речей (IoT).

Принцип роботи приймачів заключається в тому, що світлові сигнали потрапляють на фотодетектор, який генерує електричний струм пропорційний інтенсивності світла. Потім цей струм підсилюється та обробляється для отримання вихідних даних.

Переваги використання фотодетекторів [27]:

- дозволяє виявляти сигнали низької інтенсивності, що забезпечує передачу даних на великі відстані;
- підтримка високошвидкісної передачі даних;
- простота підключення до цифрових систем обробки сигналів.

Виклики та обмеження під час використання фотодетекторів [27]:

- фотодетектори можуть сприймати сторонні електромагнітні та оптичні завади, що впливає на якість сигналу та його обробку;
- продуктивність пристроїв змінюється залежно від температури навколишнього середовища, що може негативно впливати на стабільність сигналу.

У системі світлового зв'язку взаємодія між компонентами відбувається за чітким алгоритмом, що забезпечує передачу даних від відправника до отримувача через світловий сигнал (див. рис. 2.5) [9].

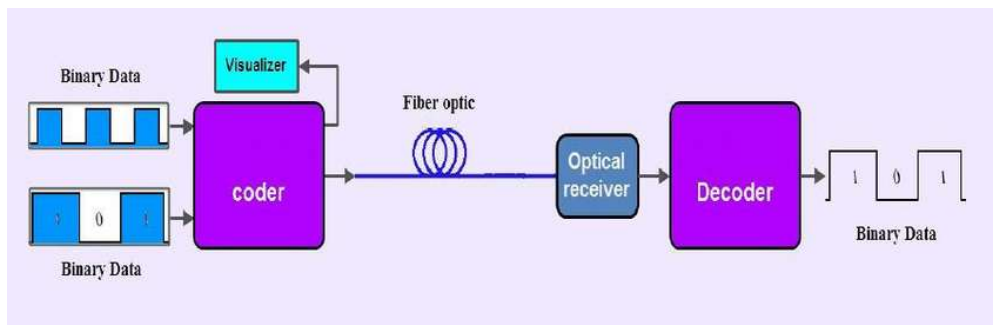


Рисунок 2.5 – Процес кодування та декодування даних

Основні етапи та взаємодія компонентів виглядають так [9]:

1. Кодування даних – процес починається з кодування інформації за допомогою модулюючого пристрою. Він перетворює електричний сигнал у світловий, застосовуючи відповідний тип модуляції (амплітудну, частотну чи імпульсну).

2. Генерація світла – джерело світла (наприклад, лазерний діод) отримує модульований сигнал від модулюючого пристрою і генерує світловий сигнал, який буде використовуватися для передачі даних.

3. Поширення сигналу – світловий сигнал поширюється через вибране середовище:

- оптичне волокно: забезпечує передачу даних на великі відстані з мінімальними втратами;
- вільний простір: використовується для безпроводних оптичних систем.

4. Прийом сигналу – приймач (фотодетектор або інший оптоелектронний пристрій) вловлює модульоване світло та перетворює його назад в електричний сигнал.

5. Декодування – після перетворення сигнал декодується, відновлюючи вихідні дані для подальшої обробки та використання на стороні отримувача.

У багатьох системах світлового зв'язку реалізовано механізм зворотного зв'язку. Він дозволяє (див. рис. 2.6) [28]:

- контролювати модуляцію та регулювати параметри сигналу для оптимальної продуктивності;
- компенсувати вплив зовнішніх факторів (наприклад, температурні коливання, втрати сигналу у середовищі передачі);
- регулювати вихідну потужність джерела світла для забезпечення стабільної передачі даних.

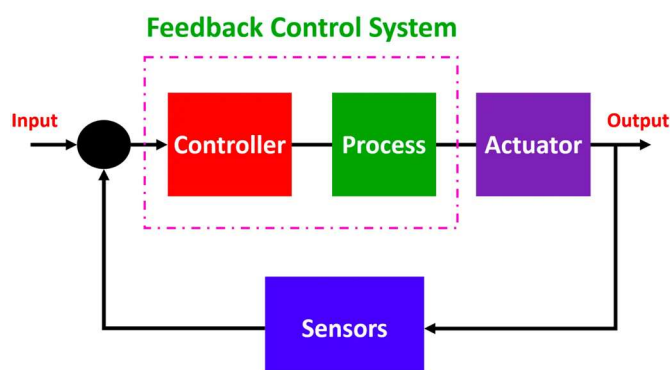


Рисунок 2.6 – Механізм зворотнього зв'язку

Такий контроль забезпечує безперебійну роботу системи, мінімізуючи помилки та підтримуючи цілісність даних на всіх етапах передачі.

2.2 Характеристики системи світлового зв'язку

Системи світлового зв'язку мають низку унікальних характеристик, які вигідно відрізняють їх від традиційних провідних та безпроводних систем передачі даних. Такі характеристики визначають продуктивність, практичність та ефективність таких систем у різних сферах застосування. Одним із ключових параметрів є дальність передачі, яка залежить від типу середовища, потужності джерела світла та чутливості приймача. Важливу роль відіграє і потужність системи, яка визначає ефективність передачі даних на великі відстані та залежить від потужності джерела, втрат сигналу й зовнішніх умов. Швидкість передачі даних є ще однією важливою характеристикою, що забезпечується завдяки високочастотним світловим сигналам і ефективним методам модуляції. При цьому система може бути чутливою до зовнішніх факторів, таких як температура, атмосферні умови чи механічні впливи. Усі ці параметри необхідно враховувати при проектуванні системи, щоб забезпечити її стабільну роботу та адаптацію до умов експлуатації [29].

Характеристика світлового зв'язку – дальність. Дальність передачі — це ключова характеристика систем світлового зв'язку, яка визначає максимальну відстань, на яку можна ефективно передавати дані за допомогою світлових сигналів, тобто параметр залежить від кількох факторів, що впливають на якість і стабільність передачі сигналу [30-31].

Основними факторами, що визначають дальність передачі, є [30-31]:

1. Середовище передачі:

- Оптоволокну: Забезпечує передачу світлового сигналу через ізольоване та контрольоване середовище з мінімальними втратами. Завдяки використанню підсилювачів сигнали можуть передаватися на відстані до сотень кілометрів без значної деградації.
 - Вільний простір (FSO): У таких системах світловий сигнал передається через повітря або вакуум, що робить їх чутливими до атмосферних умов, таких як туман, дощ або пил. Такі фактори можуть суттєво обмежувати дальність передачі або навіть повністю її блокувати.
2. Тип джерела світла:
- лазери: завдяки високій потужності можуть передавати сигнали на великі відстані;
 - світлодіоди: менш потужні, тому використовуються для систем із малою дальністю передачі, таких як Li-Fi.
3. Зовнішні умови:
- атмосферна турбулентність, пил, дощ та інші погодні явища можуть розсіювати світлові промені, що зменшує їхню інтенсивність на приймачі.
4. Розбіжність променя:
- світлові промені мають властивість розсіюватися на великих відстанях, що знижує силу сигналу на приймачі та ускладнює його фокусування.
5. Фізичні перешкоди:
- для передачі сигналу у вільному просторі необхідна пряма видимість між передавачем і приймачем. Будь-які фізичні об'єкти можуть блокувати сигнал, що вимагає ретельного проєктування системи.

У системах на основі оптоволокна підсилювачі та повторювачі дозволяють посилювати сигнал без його перетворення в електричний, що забезпечує високу

ефективність та дальність передачі. У практичних умовах сигнал можна передавати на відстані до 100 км без підсилення, а з використанням повторювачів — до 1000 км (див. рис. 2.7) [30].

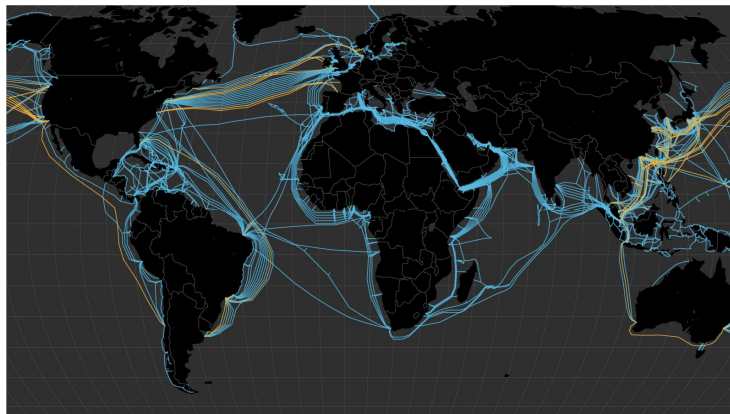


Рисунок 2.7 – Мапа розміщення оптоволоконна між континентами

У системах оптичного зв'язку у вільному просторі (FSO) дальність обмежується кількома метрами (як у Li-Fi) або кількома кілометрами (лазерні з'єднання «точка-точка»). Однак навіть у таких умовах світловий зв'язок залишається ефективним завдяки високій швидкості передачі даних та енергоефективності.

Оптоволоконні системи мають значну перевагу над традиційними провідними технологіями, такими як мідні кабелі, оскільки можуть передавати дані на значно більші відстані з меншою потребою у підсилювачах і зниженою енерговитратністю.

Характеристика світлового зв'язку – ємність. Ємність у системах світлового зв'язку — це пропускна здатність, тобто максимальна кількість даних, яку можна передати за одиницю часу, зазвичай вимірюється в бітах на секунду (bps). Завдяки унікальним властивостям світлових сигналів, такі системи мають значно більшу пропускну здатність порівняно з традиційними технологіями передачі даних [31].

Фактори, що впливають на ємність [31]:

1. Смуга пропускання світла:

- Світло має значно ширший діапазон частот порівняно з радіохвилями, що дозволяє передавати більше даних одночасно, що особливо актуально для інфрачервоного та видимого спектрів, які використовуються в різних технологіях, включаючи Li-Fi.

2. Методи модуляції:

- Мультиплексування за довжиною хвилі (WDM): дозволяє передавати кілька потоків даних одночасно на різних довжинах хвиль, що значно збільшує загальну пропускну здатність.
- Імпульсно-кодова модуляція (PCM) та квадратурна амплітудна модуляція (QAM): ці методи дозволяють кодувати більше бітів на символ, підвищуючи швидкість передачі даних.
- Мультиплексування за часом (TDM): дозволяє кільком сигналам ділити один канал передачі, використовуючи часові інтервали.

3. Співвідношення сигнал/шум (SNR):

- Високий рівень SNR забезпечує якісне приймання сигналу з мінімальними помилками, що дозволяє досягати вищих швидкостей передачі даних.

Практичні можливості та застосування (див. рис. 2.8-2.9) [32]:

1. Одне оптоволокно може передавати дані зі швидкістю понад 1 терабіт на секунду. У закритих середовищах, таких як дата-центри, швидкість передачі може досягати кількох гігабітів на секунду.

2. Світловий зв'язок використовується для передачі даних між супутниками та наземними станціями. Тут застосовуються високопродуктивні лазери, які забезпечують передачу даних на великі відстані з надзвичайно високою швидкістю. Однак такі системи є дорогими та енерговитратними, що обмежує їх використання у вузькоспеціалізованих завданнях.

Optical fiber	Randomly coupled 3-core fiber	15-mode fiber	Uncoupled 4-core fiber	55-mode fiber	Current result Randomly coupled 19-core fiber
Cross-sectional view					
Achieved records	Mar. 2020 Product of data-rate and distance	Dec. 2020 Transmission capacity	May 2022 Transmission capacity	Sep. 2022 Transmission capacity	Mar. 2023 Transmission capacity
Transmission capacity (petabits/s)	0.17	1.01	1.02	1.53	1.7
Transmission distance (km)	2,040	23	51.4	25.9	63.5
Frequency band (terahertz)	9.0	9.6	20	4.6	9.5
Power consumption of MIMO processing	Small	Large	None	Large	Small

Рисунок 2.8 – Пропускна спроможність у різних типів промислового оптоволокна

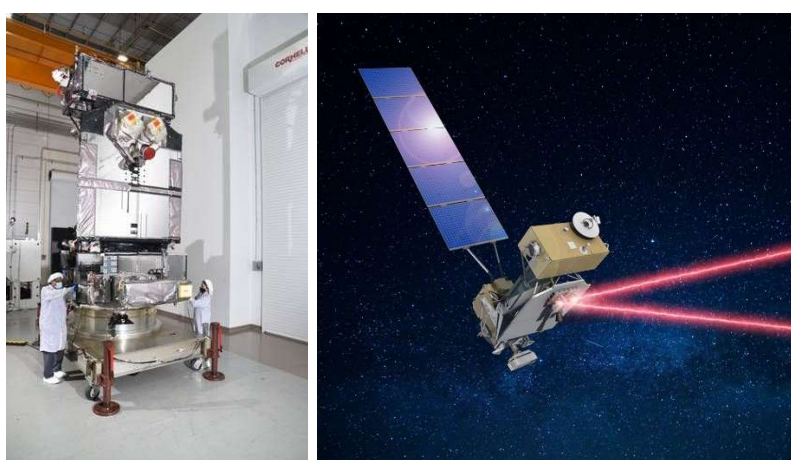


Рисунок 2.9 – Лазер у якості передачі даних у вакуумі: тестування NASA

Характеристика світлового зв'язку – енергоефективність. Енергоефективність є одним із ключових аспектів сучасних систем світлового зв'язку, особливо з огляду на глобальні тенденції до екологічної стійкості та зменшення викидів. Використання лазерів і світлодіодів у цих системах забезпечує високу ефективність передачі даних при мінімальних витратах енергії [33-34].

Переваги використання світлодіодів [33]:

- світлодіоди споживають значно менше енергії порівняно з традиційними джерелами світла, що робить їх ідеальними для енергоефективних систем;
- вони перетворюють більшу частину електричної енергії на світло, мінімізуючи втрати тепла, що забезпечує тривалу роботу без перегріву.

Переваги використання лазерів:

- лазери генерують світло високої когерентності, що дозволяє передавати дані на великі відстані з мінімальними втратами потужності;
- завдяки здатності швидко перемикатися, лазерні діоди забезпечують високу швидкість передачі даних при низькому енергоспоживанні.

Енергоефективність, вбудована в систему (див. рис. 2.10) [34]:

1. Пасивні оптичні мережі (PON): такі мережі використовують архітектуру «точка-багатоточка», що зменшує кількість активних компонентів і, відповідно, енергоспоживання;
2. Адаптивний контроль потужності: системи можуть регулювати потужність джерел світла залежно від відстані та потреб у передачі даних, що оптимізує енергоспоживання;
3. Охолодження та температурний контроль: ефективні механізми охолодження підтримують оптимальні температурні режими роботи пристроїв, збільшуючи їх довговічність та знижуючи витрати енергії.

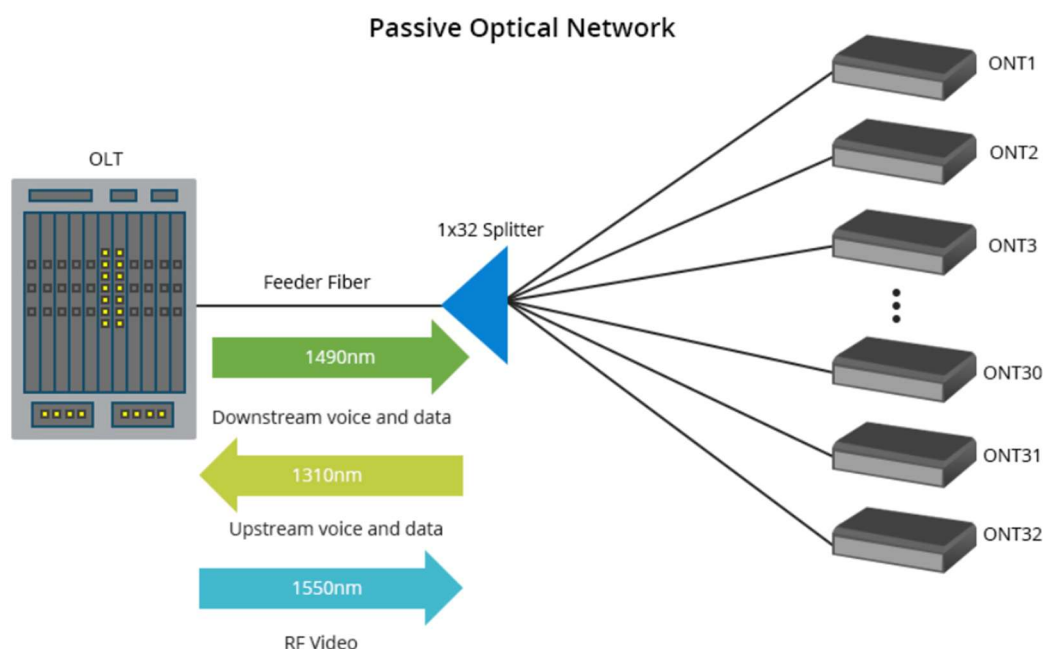


Рисунок 2.10 – Пасивні оптичні мережі (PON): не потребує додаткового живлення

Оптичні системи зв'язку сприяють зменшенню викидів та енергоспоживання, що є важливим фактором у боротьбі зі зміною клімату. Використання волоконно-оптичних технологій та Li-Fi підтримує «зелені» ініціативи та сталий розвиток, зменшуючи залежність від традиційних енергоємних технологій на основі мідних кабелів.

2.3 Вплив зовнішніх факторів на якість передачі сигналів

Одним із ключових викликів при виборі світлових систем зв'язку є проблеми, які можуть виникати через вплив зовнішніх факторів. Особливо це стосується систем, що базуються на використанні світлового сигналу, як-от волоконно-оптичний зв'язок (FOC) та зв'язок у вільному просторі (FSO).

Коли ми говоримо про волоконно-оптичні системи, то вони працюють у закритому ізольованому середовищі, де світло передається по кабелю. У таких умовах відсутні атмосферні завади, і сигнал може стабільно передаватися навіть через міжконтинентальні кабелі. Світловий промінь у цьому випадку проходить без перешкод, що дозволяє забезпечувати високу надійність зв'язку.

А от оптичний зв'язок у вільному просторі (FSO) має свої особливості. Такий зв'язок функціонує у відкритому середовищі, де немає ізольованих умов, і на передачу сигналу впливають зовнішні фактори. Теоретично FSO-системи здатні працювати ідеально, але у реальності їх ефективність залежить від багатьох чинників: Дощ, туман, сніг створюють бар'єри для проходження світла, що може суттєво знижувати якість сигналу. Сонячне випромінювання, зокрема ультрафіолетові промені, може частково розсіювати або поглинати світловий сигнал (див. рис. 2.12) [35].

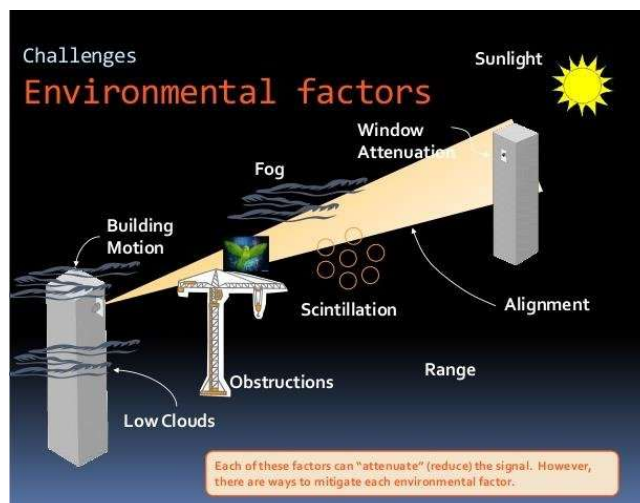


Рисунок 2.12 – Перешкоди у навколишньому середовищі для FSO-систем

Фізичні перешкоди:

- об'єкти, що можуть випадково опинитися на шляху променя, наприклад, дерева, будівлі чи транспорт, здатні блокувати сигнал;
- нестабільність поверхонь для відбиття світла також створює труднощі для зв'язку.

Турбулентність та нестабільність середовища:

- турбулентні потоки повітря викривляють траєкторію світла, спричиняючи спотворення сигналу;
- зміни тиску чи температури можуть змінювати властивості середовища, через яке передається світло.

На відміну від волоконно-оптичних систем, де сигнал поширюється через ізольоване середовище, FSO працює через повітря чи вакуум, що робить його вразливим до впливу зовнішніх факторів. Основні атмосферні явища, які негативно впливають на роботу FSO, включають:

Вплив атмосферних перешкод – туман. Туман є одним із найбільш шкідливих атмосферних факторів для FSO. Висока щільність частинок у тумані розсіює і поглинає світло, значно знижуючи якість сигналу (див. рис. 2.13) [35].



Рисунок 2.13 – Перешкоди у навколишньому середовищі для FSO-систем: туман

Основні проблеми, спричинені туманом [35]:

1. Ослаблення сигналу: краплі туману, розмір яких співмірний з довжиною хвилі світла, спричиняють значні втрати сигналу.
2. Зниження потужності: у густому тумані потужність сигналу може впасти майже до нуля, унеможливаючи передачу даних.
3. Помилки при декодуванні: передані дані можуть втрачати фрагменти, що робить їх непридатними для використання.

Стратегії зменшення впливу туману:

- використання світла з довгими хвилями (наприклад, у ближньому інфрачервоному діапазоні), які менш чутливі до розсіювання;
- збільшення потужності світлового сигналу для «пробивання» туману;
- інтеграція FSO з радіочастотними системами для створення гібридних рішень, які компенсують проблеми зі світловим зв'язком у несприятливих умовах.

Вплив атмосферних перешкод – дощ. Дощ також впливає на FSO, хоча його негативний вплив менший, ніж у випадку туману (див. рис. 2.14) [35].



Рисунок 2.14 – Перешкоди у навколишньому середовищі для FSO-систем: дощ

Основні ефекти дощу [35]:

1. Поглинання і заломлення світла: краплі дощу поглинають і розсіюють світловий сигнал, знижуючи його інтенсивність;
2. Розсіювання Релея: виникає, коли розмір крапель набагато менший за довжину хвилі світла, спричиняючи додаткові втрати сигналу;
3. Бітові помилки: сигнал може досягати приймача із значними спотвореннями, що призводить до втрати даних.

Методи пом'якшення впливу дощу:

- використання ширших світлових променів для зменшення розсіювання;
- встановлення датчиків для моніторингу інтенсивності дощу і автоматичного коригування параметрів передачі, таких як потужність сигналу чи ширина променя.

Вплив атмосферних перешкод – пил і забруднення. У районах із високим рівнем пилу або забруднення повітря частинки можуть розсіювати і поглинати світло, створюючи такі проблеми (див. рис. 2.15) [36]:

1. Зниження потужності сигналу: пил утворює перешкоди для проходження світлового сигналу, особливо в посушливих регіонах чи промислових зонах.
2. Пошкодження обладнання: накопичення пилу на оптичних компонентах може призводити до зниження ефективності системи.

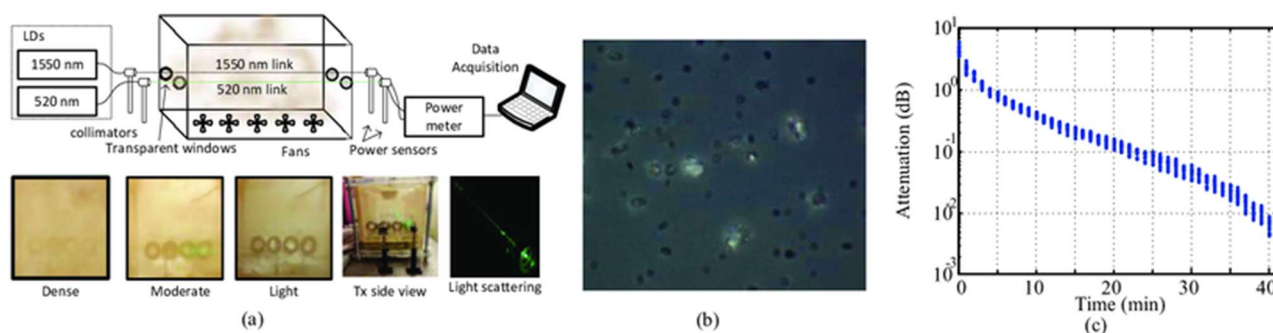


Рисунок 2.15 – Перешкоди у навколишньому середовищі для FSO-систем: пил та забруднення

Шляхи вирішення проблеми пилу:

- регулярне очищення оптичних компонентів для запобігання накопиченню пилу;
- використання захисних корпусів і фільтрів для зменшення проникнення частинок до чутливих елементів системи.

Атмосферні умови — це одна з основних проблем для систем FSO. Для мінімізації їхнього впливу необхідно використовувати адаптивні стратегії, такі як вибір оптимальних довжин хвиль, збільшення потужності сигналу, регулярне технічне обслуговування та впровадження гібридних систем.

Перешкоди, що виникають при використанні систем оптичного зв'язку у вільному просторі (FSO) та технологій Li-Fi, є важливою проблемою, яка впливає на стабільність та якість передачі даних. Такі перешкоди можуть походити як від природних факторів, так і від штучних джерел світла, створюючи численні виклики для розробників та користувачів таких систем [36].

Природні фактори, такі як сонячне світло, туман, дощ, пил та інші забруднення атмосфери, здатні суттєво знижувати якість оптичного сигналу, викликаючи втрату даних або збої в роботі системи [36].

Вплив природних факторів – сонячне світло. Сонячне світло є одним із найпотужніших природних джерел перешкод для оптичних систем зв'язку. Інтенсивність сонячного випромінювання може легко перевищувати рівень сигналу, що передається, через що (див. рис. 2.16) [37]:

1. Насичення фотодетекторів: сонце може перевантажувати приймальні пристрої, знижуючи їх чутливість до корисного сигналу.
2. Фоновий шум: сонячне випромінювання створює сильний фоновий шум, який ускладнює розпізнавання переданого сигналу.
3. Зниження SNR: відношення сигнал-шум (SNR) суттєво зменшується, що призводить до підвищення частоти помилок або повної втрати сигналу.

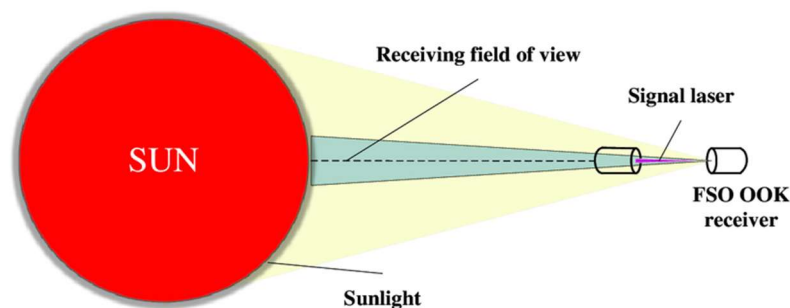


Рисунок 2.16 – Перешкоди у навколишньому середовищі для FSO-систем:
сонячне світло

Методи подолання природних перешкод [37]:

1. Вузькосмугові оптичні фільтри: такі фільтри блокують випромінювання, що знаходиться поза необхідним спектральним діапазоном, дозволяючи зменшити вплив сонячного світла.
2. Затінення обладнання: використання захисних бар'єрів або стратегічне розташування пристроїв, щоб уникати прямого впливу сонячного світла.
3. Оптимізація часу передачі: передача даних у періоди меншої сонячної активності, наприклад, вранці або ввечері.
4. Обслуговування обладнання: регулярне очищення лінз та сенсорів від пилу й забруднень, які знижують пропускання світла.

Штучні джерела світла, такі як вуличні ліхтарі, автомобільні фари, світлодіоди та екрани дисплеїв, створюють значні виклики для систем FSO та LiFi.

Вплив штучних перешкод – світлодіодне освітлення. Світлодіоди, що використовуються у вуличних ліхтарях, транспортних засобах або побутовому освітленні, можуть створювати перешкоди через (див. рис. 2.17) [37]:

1. Мерехтіння: частотні коливання, що впливають на точність прийому оптичного сигналу;
2. Спектральне перекриття: світлодіоди випромінюють у спектрі, близькому до діапазону сигналу системи зв'язку, що збільшує рівень шуму.



Рисунок 2.17 – Перешкоди у навколишньому середовищі для FSO-систем:
штучне освітлення (мерехтіння)

Вплив штучних перешкод – динамічні джерела світла. Рухомі автомобілі, які змінюють свою позицію відносно передавача та приймача, або випадкове освітлення від дисплеїв смартфонів також можуть створювати тимчасові збої в передачі.

Методи подолання штучних перешкод [37]:

- впровадження динамічних фільтрів, які налаштовуються для блокування небажаного освітлення;
- передача даних із частотою, яка нечутлива до низькочастотного мерехтіння джерел світла;
- використання фізичних бар'єрів для захисту від прямого впливу небажаного світла;

— монтаж обладнання в місцях із мінімальним рівнем штучного освітлення або надання переваги закритим приміщенням.

Перешкоди можуть мати кумулятивний ефект, коли природні фактори (наприклад, туман) комбінуються з штучними (вуличні ліхтарі), що робить передачу даних ще більш ускладненою. Комбіновані ефекти та міркування щодо проектування системи зв'язку стають ключовими в умовах реального середовища, де взаємодія різних факторів може значно погіршувати якість сигналу. У реальних умовах багато зовнішніх чинників діють одночасно, посилюючи свій вплив на якість передачі даних. Наприклад, туман, який поглинає та розсіює сигнал, може поєднуватися із штучним освітленням, додаючи фоновий шум і погіршуючи співвідношення сигналу до шуму. Інший приклад – це дощ, який зменшує інтенсивність сигналу, разом із сонячним світлом, що насичує фотодетектори, знижуючи їх чутливість до потрібного сигналу. Пил, як ще один фактор, може створювати спотворення, а джерела штучного світла, випромінюючи хвилі у тому ж спектрі, що і сигнал, здатні викликати спектральне перекриття, підсилюючи рівень шуму [35-37].

Розробка ефективної конструкції системи повинна враховувати ці комбіновані ефекти та передбачати стратегії для пом'якшення їх впливу. Однією з важливих стратегій є резервування та відновлення після відмови, де система проектується з резервними каналами зв'язку, наприклад радіочастотними чи оптоволоконними, які здатні підтримувати передачу даних навіть у разі несприятливих умов для основного каналу, що дозволяє забезпечувати безперервність роботи системи (див. рис. 2.18).



Рисунок 2.18 – Маршрутизатор TP-Link TL-MR150 N300 4G LTE:
два канали зв'язку

Також важливо впроваджувати адаптивне налаштування параметрів, яке включає [35-37]:

- динамічне регулювання потужності променя;
- зміну типу модуляції залежно від умов середовища;
- підбір довжини хвилі, менш чутливої до перешкод.

Крім цього, використання методів прямої корекції помилок (FEC) дозволяє виявляти та виправляти спотворення під час передачі, що зменшує частоту помилок навіть у складних умовах.

Одним із важливих підходів є оптична фільтрація, яка включає використання вузькосмугових фільтрів для блокування небажаних спектрів, таких як сонячне або штучне світло, одночасно забезпечуючи передачу потрібного сигналу. Динамічні фільтри, здатні адаптуватися до спектрального складу перешкод у реальному часі, також значно підвищують ефективність. Також, фізичний захист, наприклад екранування або стратегічне розташування обладнання, дозволяє мінімізувати вплив зовнішніх джерел світла та інших перешкод.

Гібридні системи зв'язку, які поєднують різні типи каналів, такі як (див. рис. 2.18) [35-37]:

- вільний оптичний зв'язок;
- радіочастотний канал;
- оптоволоконний зв'язок.

2.4 Переваги і обмеження світлових систем зв'язку в порівнянні з іншими технологіями

Системи світлового зв'язку, які охоплюють такі технології, як волоконно-оптичний зв'язок та оптичний зв'язок у вільному просторі (FSO), мають низку вагомих переваг порівняно з традиційними методами передачі даних. Однак кожна з цих технологій має і свої обмеження, що можуть впливати на їх продуктивність. Тому перед впровадженням систем світлового зв'язку необхідно розуміти всі переваги та виклики, особливо в контексті їхнього використання як у масштабних інфраструктурах, так і в локальних застосуваннях, наприклад, у приватних оселях або для серверних потреб, де передача великих обсягів даних є критично важливою.

Переваги систем світлового зв'язку. Серед ключових переваг світлових систем зв'язку слід відзначити їхню високу пропускну здатність, що є одним із найвагоміших факторів на користь цих технологій. Світловий спектр, особливо інфрачервоні та видимі діапазони, забезпечує значно ширшу смугу пропускання порівняно з радіочастотними технологіями. Завдяки цьому волоконно-оптичні кабелі здатні працювати з неймовірно високою швидкістю передачі даних, що сягає кількох терабіт на секунду. Цього вдається досягти завдяки передовим технологіям, таким як мультиплексування за довжиною хвилі (WDM). Системи оптичного зв'язку на короткі відстані, як-от Li-Fi (Light Fidelity), також здатні забезпечити гігабітну швидкість передачі даних, що робить їх особливо корисними для внутрішніх приміщень – ці можливості роблять світлові системи зв'язку ідеальними для задач, які вимагають інтенсивного використання даних (див. рис. 2.18) [38].

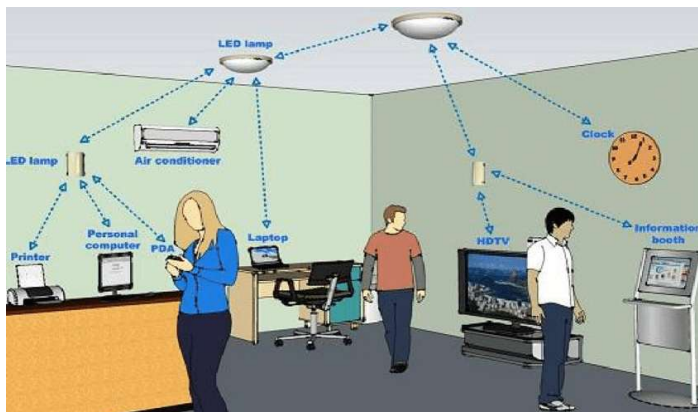


Рисунок 2.18 – Безпроводний оптичний зв'язок за допомогою Li-Fi

Серед таких застосувань (див. рис. 2.19):

- магістральні інтернет-мережі провайдерів для глобальної передачі даних на великі відстані, потокове відео високої чіткості;
- хмарні обчислення та технології майбутнього, зокрема 6G.

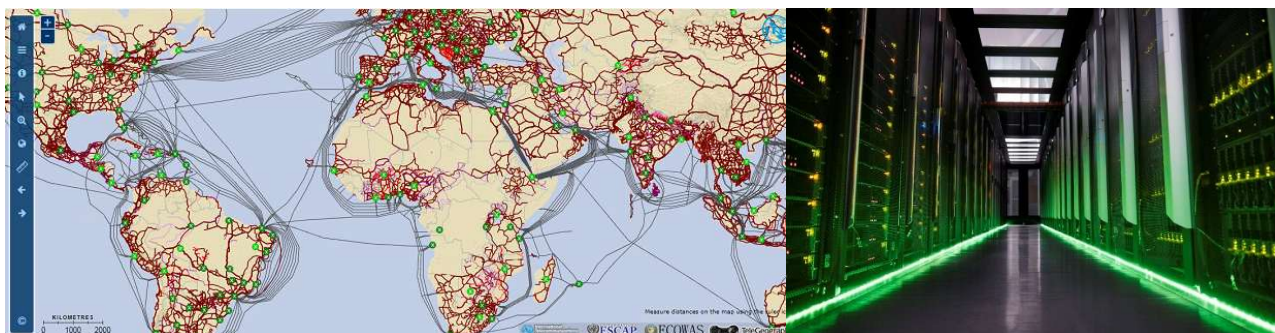


Рисунок 2.19 – Сфери використання волоконно-оптичного зв'язку:
дата центри та інтернет-провайдери

Оптичний зв'язок відіграє критичну роль у забезпеченні швидкісної передачі даних, що є основою для функціонування сучасних технологій та інфраструктур.

Ще однією вагомою перевагою є низька затримка, що робить системи світлового зв'язку ідеальними для застосувань, чутливих до часу. Швидкість поширення світла в оптичних волокнах значно перевищує швидкість передачі електричних сигналів у мідних кабелях. Крім того, системи FSO, що базуються на зв'язку прямої видимості, усувають потребу у проміжних вузлах, що додатково

зменшує затримки, що особливо важливо для таких сфер, як фінансова торгівля, де навіть мікросекундні затримки можуть бути критичними, онлайн-ігри, автомобільний транспорт та програми віртуальної й доповненої реальності. У цих випадках низька затримка значно покращує продуктивність та якість роботи користувачів (див. рис. 2.20) [39].

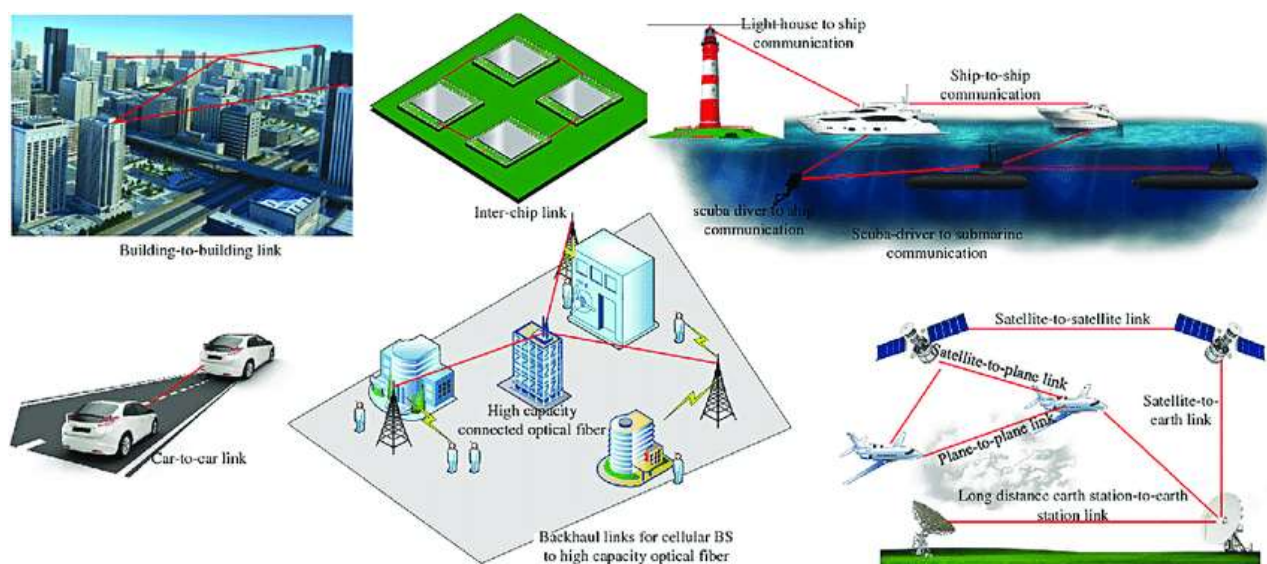


Рисунок 2.20 – Сфери використання волоконно-оптичного зв'язку:
оптичний зв'язок у вільному просторі

Обмеження систем світлового зв'язку. Хоча системи світлового зв'язку, зокрема волоконно-оптичні та системи оптичного зв'язку у вільному просторі (FSO), мають численні переваги, вони також стикаються з низкою обмежень. Такі фактори можуть впливати на їх продуктивність та обмежувати їхнє застосування у певних умовах. Розуміння цих нюансів є важливим при плануванні впровадження подібних систем у конкретних сценаріях.

Однією з основних проблем систем FSO є їхня вразливість до фізичних перешкод. Такі системи потребують наявності прямої видимості між передавачем та приймачем для ефективної передачі сигналу. Будь-які об'єкти, як-от будівлі, дерева чи транспортні засоби, можуть блокувати світловий шлях, що призводить до втрати сигналу або значного його ослаблення. Навіть незначне відхилення лінії передачі може спричинити втрату продуктивності. У густонаселених районах, де

багато інфраструктурних перешкод, використання систем FSO є ускладненим. Для вирішення цих проблем рекомендують впроваджувати релейні станції для обходу перешкод або застосовувати автоматизовані системи вирівнювання для стабільного з'єднання (див. рис. 2.21) [40].

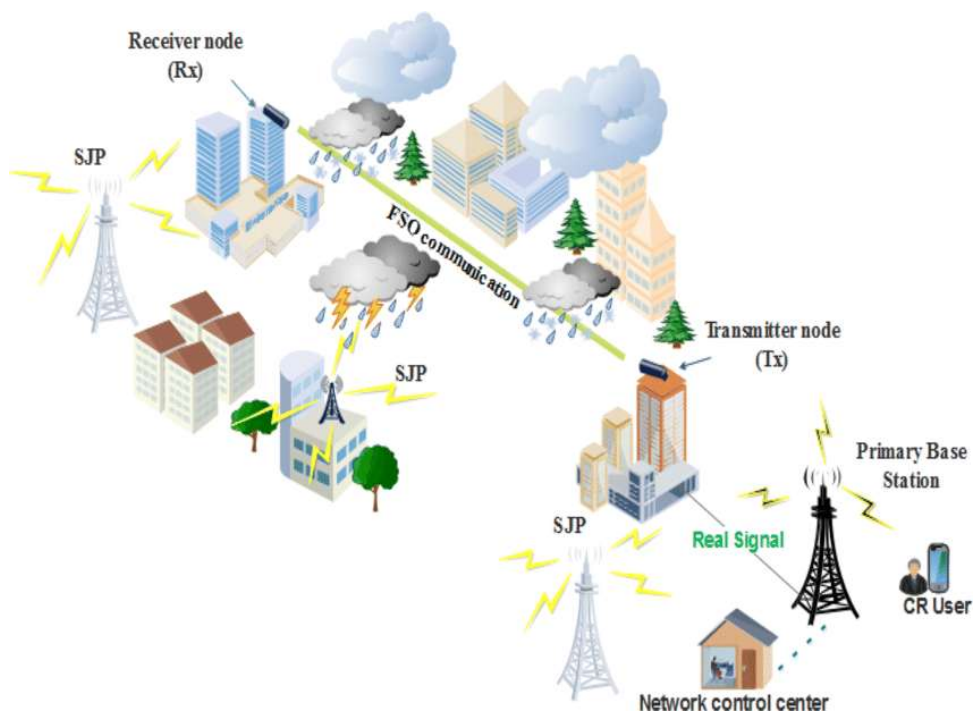


Рисунок 2.21 – Проблеми використання FSO:
атмосферні та штучні перешкоди

Другим критичним обмеженням систем FSO є чутливість до атмосферних умов. Фактори, як-от туман, дощ, пил або турбулентність повітря, здатні значно послабити сигнал. Атмосферні частинки можуть розсіювати або поглинати світло, що зменшує силу сигналу на виході та підвищує ймовірність помилок. Наприклад, густий туман може повністю блокувати світлові сигнали, що обмежує ефективність систем FSO у регіонах із частими несприятливими погодними умовами, знижуючи як надійність з'єднання, так і швидкість передачі даних. Для пом'якшення цих проблем можливе використання адаптивних систем керування потужністю, що дозволяють підвищити інтенсивність сигналу під час погіршення погодних умов, а також поєднання FSO з радіочастотними системами для забезпечення стабільності зв'язку незалежно від погоди [39-40] .

Також значним викликом для систем FSO є проблема вирівнювання – у системах, що працюють на великих відстанях, навіть незначні зміщення оптичного променя через зовнішні чинники, такі як вітер, вібрація або нестабільність обладнання, можуть призвести до втрати сигналу, що робить монтаж і обслуговування систем FSO досить трудомісткими, оскільки необхідно постійно контролювати та коригувати вирівнювання. Для усунення цієї проблеми застосовуються системи відстеження променя або широкопроменева оптика, що зменшує чутливість до невеликих зміщень (див. рис. 2.22) [41].

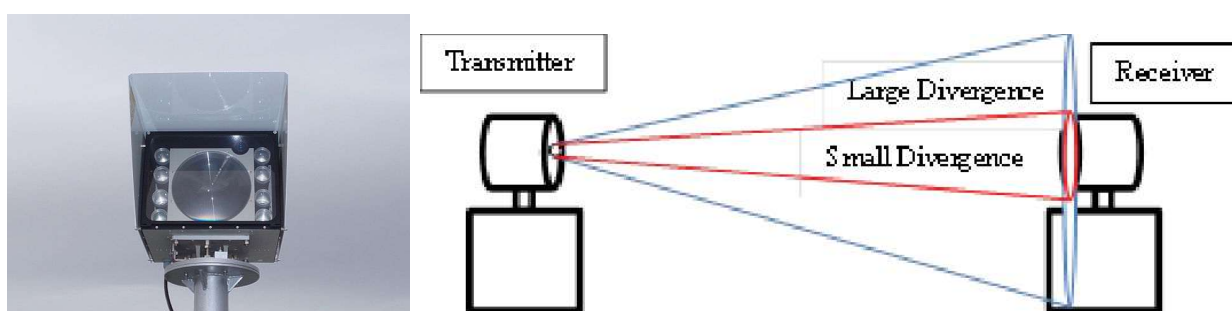


Рисунок 2.22 – Проблеми використання FSO:
вирівнювання світла

З іншого боку, волоконно-оптичні системи позбавлені багатьох проблем FSO завдяки ізольованому середовищу передачі даних, але вони також мають певні обмеження. Однією з головних проблем є висока вартість впровадження. Прокладка волоконно-оптичних кабелів потребує значних фінансових інвестицій, оскільки для цього необхідні спеціальні траншеї, кабельна інфраструктура та складний монтаж. Порівняно зі звичайними мідними кабелями, які є дешевшими та простішими в установці, волоконно-оптичні системи потребують значно більше ресурсів. Ця висока вартість робить оптоволокну недоступним для сільських та малонаселених районів, де відсутність попиту та обмежені фінансові можливості уповільнюють впровадження сучасних технологій (див. рис. 2.23) [41].

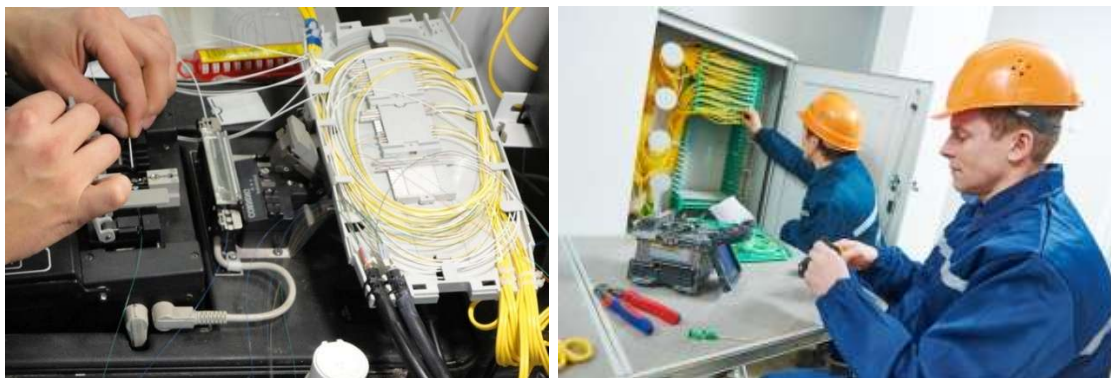


Рисунок 2.23 – Проблеми використання оптоволоконна:
висока вартість із-за складності впровадження

Крім того, на впровадження оптоволоконних мереж значно впливає відсутність стимулів для їхнього розвитку. Провайдери часто не зацікавлені в інвестиціях у нову інфраструктуру, оскільки існуючі мідні технології продовжують ефективно функціонувати. Для прискорення переходу на волоконно-оптичні системи необхідна підтримка держави, зокрема через субсидії, державні програми або державно-приватні партнерства, що дозволить зменшити витрати на впровадження та створити інфраструктуру, необхідну для масштабного переходу на сучасні технології (див. рис. 2.24) [42].



Рисунок 2.24 – Проблеми використання оптоволоконна:
недостатньо розвинена та віддалена інфраструктура

2.5 Сучасні напрямки розвитку

Удосконалення світлових систем зв'язку є необхідним кроком для подальшого розвитку технологій передачі даних та задоволення сучасних потреб суспільства, пов'язаних з експоненційним зростанням обсягу інформації. Перехід від традиційних систем зв'язку, таких як мідні кабелі (наприклад, Cat 5e), до інноваційних рішень на основі оптоволокна та безпроводного оптичного зв'язку (FSO, Li-Fi).

Коли мова йдеться про радіочастотний діапазон для роботи маршрутизаторів і безпроводного зв'язку (наприклад, у квартирах, багатоквартирних будинках чи офісах), мають свої обмеження. Однією з головних проблем є перенасичення радіочастотного спектру, що часто трапляється через велику кількість пристроїв, які працюють на тих самих частотах і каналах. Таке накладання сигналів створює інтерференцію, що призводить до погіршення якості зв'язку.

Зокрема, інтерференція може впливати на дальність передачі сигналу. Наприклад, сигнал маршрутизатора, який теоретично мав би досягати іншої кімнати в межах одного поверху, може втрачати свою потужність через взаємне «заглушення» сигналів. Це не лише знижує якість зв'язку, але й спричиняє затримки в передачі даних, що робить використання бездротового зв'язку (Wi-Fi) менш ефективним або навіть неможливим.

Для демонстрації цієї проблеми було використано програму Wi-Fi Analyzer. Аналіз показав, що мобільний пристрій виявляє велику кількість точок доступу Wi-Fi (або маршрутизаторів), які працюють одночасно в межах доступного діапазону. Наприклад, у багатоквартирному будинку чи офісі, коли сусідні точки доступу розташовані зверху, знизу або збоку, вони створюють перешкоди для нормального функціонування Wi-Fi через інтерференцію (див.рис.2.25).

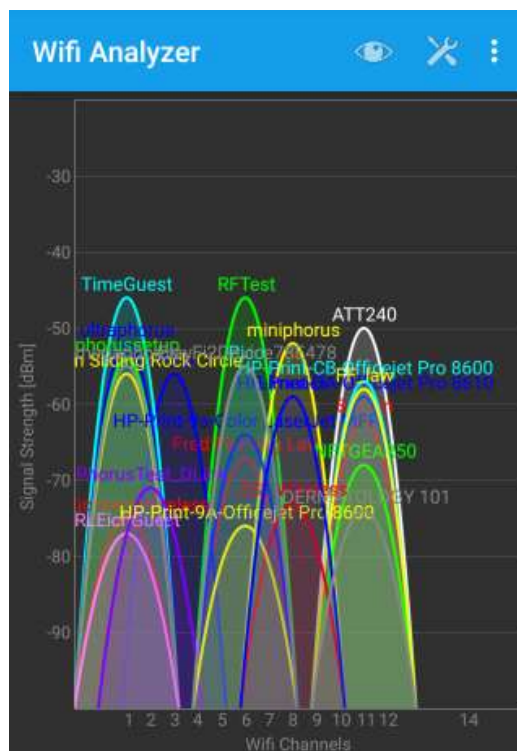


Рисунок 2.25 – Перевантаження радіочастотного діапазону та вплив інтерференції на якість Wi-Fi-зв'язку

На цій ілюстрації, представлений у дослідженні, можна побачити, як це виглядає у переповненому радіочастотному діапазоні. Діапазон 2,4 ГГц є найбільш перевантаженим, тоді як діапазон 5 ГГц має певні переваги, але його сигнал здебільшого ефективний лише в межах однієї кімнати. За межами кімнати швидкість передачі даних може знижуватися вдвічі або навіть втричі. Діапазон 6 ГГц, який міг би вирішити частину цих проблем, поки недоступний в Україні, при цьому розвиваються ще інші напрямки, які можуть створити альтернативні види безпроводного зв'язку, що усунуть ці слабкі сторони.

Сучасні напрямки розвитку – *Li-Fi*. Li-Fi (Light Fidelity) є інноваційною технологією безпроводного зв'язку, яка використовує видиме світло від світлодіодних ламп для передачі даних. Ця технологія є альтернативою Wi-Fi, який традиційно працює на основі радіочастот. Li-Fi використовує світлові хвилі, що модулюються для передачі інформації, забезпечуючи низку переваг, зокрема високу швидкість, безпеку та ефективне використання спектру (див. рис. 2.25).



Рисунок 2.26 – Логотип Li-Fi та складові процесу передачі даних

Система Li-Fi складається з декількох ключових компонентів: джерела світла (світлодіодної лампи), фотодетектора та контролера. Світлодіодна лампа, яка виступає передавачем, змінює інтенсивність світла для кодування даних. Такі коливання світла є непомітними для людського ока, але їх розпізнає фотодетектор, що перетворює світлові сигнали на електричні. Контролер відповідає за процес кодування та декодування даних (див. рис. 2.25) [43].

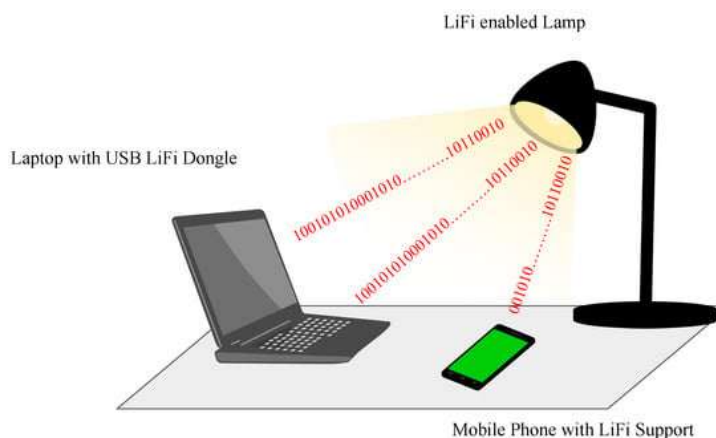


Рисунок 2.27 – Процес передачі даних за допомогою Li-Fi

Для передачі інформації використовуються різні методи модуляції, наприклад, ООК (On-Off Keying), широтно-імпульсна модуляція та вдосконалені методи, такі як ортогональне частотне мультиплексування, що дозволяє системам Li-Fi досягати високих швидкостей передачі даних (див. рис. 2.26) [44].

Переваги використання Li-Fi [43-44]:

- технологія Li-Fi може забезпечувати швидкість передачі даних понад 1 ГБ/с, що значно перевищує можливості традиційного Wi-Fi;
- світлові сигнали не проникають крізь стіни, що унеможливорює перехоплення сигналів сторонніми особами, на відміну від радіохвиль;
- видиме світло пропонує значно ширший спектр, порівняно з перевантаженим радіочастотним діапазоном, що є критично важливим у сучасних умовах;
- Li-Fi не створює електромагнітних перешкод і може працювати у середовищах, де використання радіочастот обмежене.

Сфери, де може бути застосований Li-Fi [43-44]:

1. Розумні будинки та офіси: багато сучасних офісів і будинків вже оснащені світлодіодним освітленням – ці лампи можна модифікувати для роботи з Li-Fi, що дозволить одночасно використовувати їх для освітлення та передачі даних.
2. Медичні заклади: у лікарнях, де радіочастоти можуть впливати на чутливе обладнання, Li-Fi забезпечує стабільний зв'язок без створення електромагнітних перешкод.
3. Підводний зв'язок: радіохвилі неефективні під водою, тоді як світлові хвилі можуть передавати дані, дозволяючи застосовувати Li-Fi для підводних комунікацій.
4. Авіація та промисловість: Li-Fi може використовуватись у літаках або на заводах, де є потреба у високошвидкісному зв'язку без створення радіоперешкод.

Недоліки використання Li-Fi [43-44]:

- для роботи Li-Fi необхідне постійно увімкнене світло, що обмежує використання технології у темряві;
- світлові сигнали не можуть проходити через перешкоди (стіни, предмети), що обмежує мобільність системи;
- природне світло або яскраве сонячне освітлення можуть створювати перешкоди, знижуючи ефективність передачі даних.

Незважаючи на обмеження, Li-Fi має значний потенціал – найбільш ймовірно, що у майбутньому ця технологія буде інтегрована у гібридні системи, які поєднуюватимуть можливості Li-Fi та Wi-Fi. Наприклад, маршрутизатори нового покоління можуть містити як радіочастотні модулі, так і фотодетектори для прийому світлових сигналів, що дозволить використовувати переваги обох технологій: у місцях з доступом до світла перевага надаватиметься Li-Fi, а у темних зонах або при перешкодах працюватиме Wi-Fi.

Сучасні напрямки розвитку – інтеграція з мережами 5G. Серед новітніх технологій, що розвиваються, на особливу увагу заслуговує 5G, яка вже активно впроваджується та має значні переваги порівняно з попередніми поколіннями мобільних мереж, такими як 2G, 3G та 4G. Основною особливістю 5G є забезпечення надзвичайно високих швидкостей передачі даних, мінімальної затримки сигналу та підтримка масового підключення пристроїв, що особливо актуально у густонаселених районах (див. рис. 2.27) [45-46].

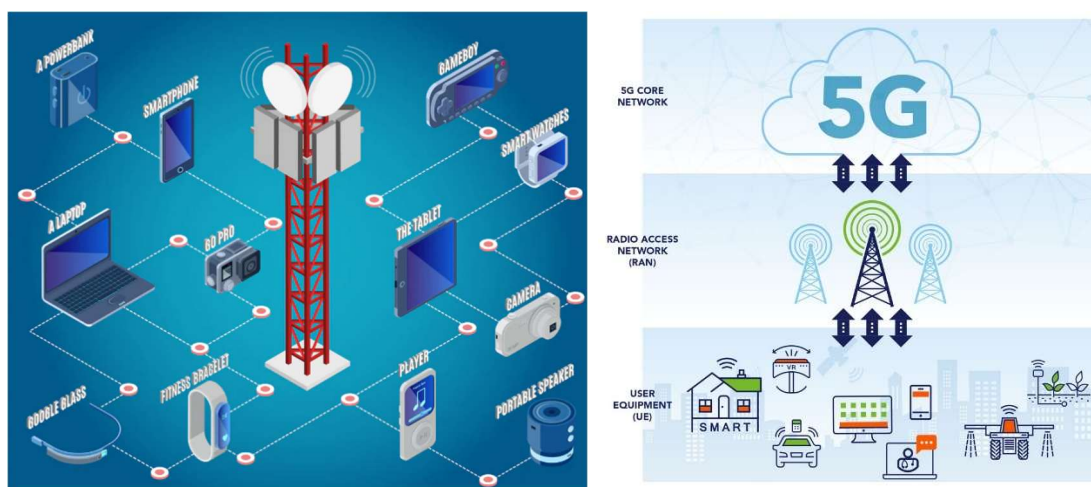


Рисунок 2.28 – Революція у світі мобільної мережі: 5G

Для досягнення таких можливостей технологія 5G активно використовує волоконно-оптичну інфраструктуру, що дозволяє забезпечити стабільну роботу мережі, навіть за значного навантаження, яке часто виникає під час відключень електроенергії. Проблема з 4G полягає у тому, що базові станції обмежені за ресурсами: при підключенні великої кількості користувачів їхня продуктивність

знижується, що призводить до падіння швидкості та затримок. У таких умовах 5G стає більш ефективною альтернативою завдяки інтеграції оптоволокна, яке забезпечує високі канали пропускної здатності (див. рис. 2.28) [47].

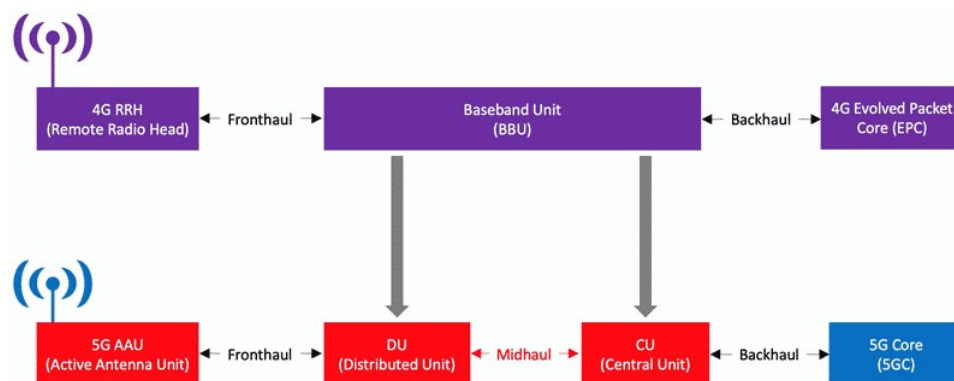


Рисунок 2.29 – Відмінності у з'єднанні між 4G та 5G базовими станціями

Однією з ключових особливостей 5G є використання технологій бекхол і фронтхол (див. рис. 2.28) [47]:

1. Бекхол забезпечує з'єднання основної мережі з віддаленими базовими станціями, що дозволяє уникнути втрат якості та швидкості завдяки використанню оптоволоконних каналів.

2. Фронтхол підключає блок обробки сигналів (BBU) до віддалених радіоголовок, забезпечуючи передачу даних з мінімальною затримкою та високою пропускною здатністю у сотових мережах.

Завдяки таким технічним рішенням 5G здатна підтримувати вимоги до високошвидкісного інтернету, наприклад, для потокового відео у форматі 4K, віртуальної реальності або дистанційних хірургічних операцій, де критично важлива низька затримка (див. рис. 2.29) [48].

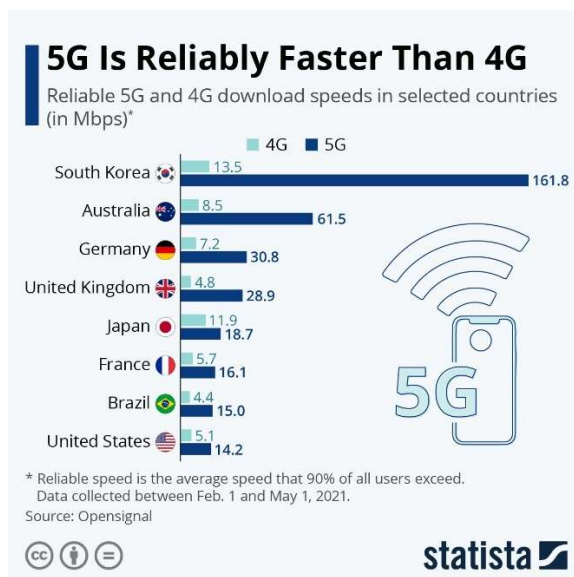


Рисунок 2.30 – Різниця у швидкості між 4G та 5G

Інтеграція 5G з оптоволоконними системами відкриває наступні можливості [45-48]:

1. Висока пропускна здатність — технологія щільного мультиплексування за довжиною хвилі (WDM) дозволяє передавати кілька потоків даних одночасно, максимізуючи ефективність використання оптоволокна.

2. Економічність — пасивні оптичні мережі (PON) забезпечують ефективне підключення у міських та приміських районах, а також активно використовуються у домівках для інтернет-доступу.

3. Гнучкість та доступність — оптика вільного простору (FSO) є альтернативою оптоволокну у віддалених регіонах або сільській місцевості, де прокладання кабелів є складним або недоцільним.

Попри те, що технологія 5G вже широко розвивається у світі, її впровадження в Україні поки що обмежене. Однак багато пристроїв вже підтримують 5G, і залишається питання лише в доступі до мережі. Важливою перевагою для України є енергоефективність 5G, що дозволяє базовим станціям працювати довше за умови відключення електроенергії.

Незважаючи на складність повної відмови від 2G та 3G (оскільки певні сервіси ще використовують ці технології), світовий тренд рухається у бік 5G. Завдяки інтеграції оптоволокна, ця технологія забезпечить значний крок уперед у

розвитку мобільного зв'язку, а також відкриє нові можливості для інноваційних послуг та застосунків.

Сучасні напрямки розвитку – космічний зв'язок. Космічний зв'язок є однією з перспективних технологій, яка забезпечує передачу даних між супутниками, космічними апаратами та наземними станціями. Ця технологія створена спеціально для використання в космічному просторі, де відсутні перешкоди, характерні для атмосфери Землі, як-от погодні умови або шумові завади. Зокрема, системи оптичного зв'язку на основі лазерів розглядаються як ефективна альтернатива традиційним радіочастотним системам (див. рис. 2.30) [49]



Рисунок 2.31 – Стрімкий розвиток FSO-систем у космічних масштабах

Лазерні системи забезпечують високу швидкість передачі даних та ефективність завдяки тому, що світло в вакуумі поширюється без суттєвих перешкод. Такі технології дозволяють мінімізувати втрати сигналу через вузький, сфокусований лазерний промінь, що знижує дисперсію та забезпечує високу ефективність передачі інформації на великі відстані. У порівнянні з радіочастотними системами, лазерні комунікації потребують менше енергії для передачі сигналів у космосі, а також забезпечують швидкість передачі даних у десятки гігабіт на секунду, що є особливо важливим для отримання зображень або відео у високій роздільній здатності з космічних місій [49].

Оптичні системи космічного зв'язку включають лазерні передавачі, оптичні телескопи та фотодетектори. Такі компоненти є компактними та легкими, що

дозволяє з легкістю інтегрувати їх у супутники та космічні апарати, зменшуючи витрати на запуск та експлуатацію (див. рис. 2.31) [50].

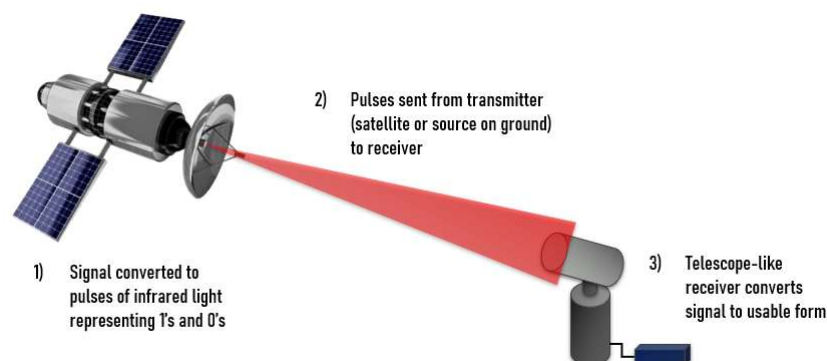


Рисунок 2.32 – Будова та принцип дії FSO-систем у космічних масштабах Сфери, де застосовується лазерний зв'язок [49-50]:

1. Міжсупутниковий зв'язок: лазерні системи забезпечують передачу даних між супутниками у космічних сузір'ях, що сприяє глобальному інтернет-покриттю та обміну інформацією в реальному часі, що особливо актуально для проєктів на кшталт StarLink, де супутники працюють у тісній координації, але все ж поки спілкуються на частотах 110 і 188 МГц.

2. Зв'язок «супутник-земля»: супутники передають дані на наземні станції, забезпечуючи швидку доставку інформації, необхідної для спостереження за Землею, моніторингу клімату та інших критично важливих завдань.

3. Глибокий космос: космічні агентства, як-от NASA, розробляють системи лазерного зв'язку для майбутніх місій на Марс та інші віддалені об'єкти, що дозволить забезпечити високошвидкісну передачу даних і дистанційне керування космічними апаратами в реальному часі.

Переваги використання лазерного зв'язку [49-50]:

- лазерні системи досягають швидкостей передачі даних у десятки гігабіт на секунду;
- лазери потребують менше енергії порівняно з радіочастотними системами;
- оптичні термінали значно менші та легші, що полегшує їх інтеграцію на космічні апарати.

Хоча космічний лазерний зв'язок має численні переваги, є певні виклики, особливо у зв'язку «супутник-земля», де атмосферні перешкоди можуть впливати на якість сигналу. У перспективі розробка глобальної мережі оптичних наземних станцій може забезпечити стабільний зв'язок для космічних місій.

РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТУВАННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ LI-FI У ГІБРИДНІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ

3.1 Огляд технології Li-Fi

Li-Fi (Light Fidelity) — це інноваційна технологія безпроводного зв'язку, яка використовує видиме світло, інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання для передачі даних. Ця технологія пропонує революційну альтернативу традиційним радіочастотним системам, таким як Wi-Fi, забезпечуючи високу швидкість передачі даних із мінімальною затримкою. Особливістю Li-Fi є можливість виконувати функції зв'язку та освітлення одночасно, що відкриває широкі перспективи її застосування.

Технологія працює завдяки модуляції інтенсивності світла, яке випромінюють світлодіоди (LED). Ці зміни надто швидкі, щоб бути помітними людському оку, однак їх може розпізнати фотодетектор, що перетворює світлові сигнали на цифрові дані. Система є двонаправленою, тобто здатна передавати й приймати дані, завдяки блокам модуляції та демодуляції, які забезпечують перетворення сигналів між аналоговим і цифровим форматами (див. рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – LED модуль (для передачі даних) та фотодіод (для прийому даних)

Основні компоненти Li-Fi :

1. Джерело світла — світлодіоди, які випромінюють модульоване світло.
2. Фотодетектор — пристрій, що приймає світлові сигнали й перетворює їх у цифрові дані.
3. Блок модуляції та демодуляції — забезпечує перетворення сигналів для обміну даними.

Li-Fi характеризується високою швидкістю передачі даних. У лабораторних умовах швидкість може досягати 224 Гбіт/с, а в реальних системах — близько 10 Гбіт/с, що робить технологію придатною для таких завдань, як потокове відео у форматі 4K, доповнена реальність, промислова автоматизація та інші додатки, які потребують високої пропускної здатності.

Ще однією важливою характеристикою є низька затримка, завдяки якій Li-Fi забезпечує швидку передачу даних у реальному часі, що дозволяє використовувати технологію для онлайн-ігор, віртуальної реальності та автономних систем.

Li-Fi також відзначається широким спектром пропускної здатності. Технологія використовує видиме світло, яке має у 10 разів ширший спектр порівняно з радіочастотами, що вирішує проблему перевантаження, характерну для традиційних систем, таких як Wi-Fi, але також

Додатковою перевагою є підвищена безпека. Світло не проходить крізь стіни або непрозорі бар'єри, що обмежує можливість несанкціонованого доступу до мережі, що особливо важливо для приміщень, де передача даних повинна бути локалізованою, наприклад, у офісах чи житлових будинках.

Li-Fi також демонструє високу енергоефективність завдяки використанню існуючих світлодіодних систем освітлення, що дозволяє поєднувати функції зв'язку та освітлення, зменшуючи загальне споживання енергії та відповідаючи цілям сталого розвитку.

Однак, попри численні переваги, широке впровадження Li-Fi вимагає заміни існуючої інфраструктури, що може бути складним і витратним процесом. Проте потенціал цієї технології є значним, і в майбутньому вона може стати важливим

елементом сучасних систем зв'язку, особливо в умовах перевантаження радіочастотних мереж.

Коли ми говоримо про Li-Fi, слід зазначити, що ця технологія вже існує. Вона розроблена, впроваджується в деяких місцях і навіть має практичні застосування. Проте є певні нюанси, через які її використання досі обмежене. Наприклад, існуючі рішення не завжди підходять для широкого впровадження або створення універсального стандарту. Попри те, що смартфони можна адаптувати для підтримки Li-Fi шляхом додавання спеціальних антен чи систем, ці заходи є складними, дорогими й часто непрактичними для пересічного користувача.

Однак Li-Fi має великий потенціал у вигляді гібридної системи зв'язку. У цьому випадку він не замінює наявні технології, як-от Wi-Fi або стільникові мережі, а доповнює їх, розширюючи функціонал і усуваючи певні обмеження. Наприклад, така система може інтегрувати кабельні або електромережеві технології для забезпечення зв'язку в автономних системах.

Li-Fi як елемент гібридної системи має кілька ключових переваг. По-перше, він може ефективно взаємодіяти з радіочастотними системами, балансує їхні сильні та слабкі сторони. Наприклад, Li-Fi забезпечує високу швидкість передачі даних у приміщеннях, тоді як Wi-Fi або 5G відповідають за широке покриття зовні.

По-друге, використання Li-Fi сприяє зменшенню радіочастотного перенавантаження. У зонах із високою концентрацією пристроїв, таких як аеропорти, стадіони чи густонаселені міські райони, Li-Fi допомагає розвантажити перевантажені радіочастотні канали (наприклад, 2,4 ГГц або 5 ГГц), що суттєво покращує продуктивність мереж і дозволяє уникати проблем із перешкодами.

Крім того, сучасні Wi-Fi маршрутизатори часто мають обмежений радіус дії, особливо в діапазоні 2,4 ГГц, що призводить до необхідності встановлення додаткових підсилювачів або репітерів, які подовжують сигнал. З Li-Fi таких проблем можна уникнути, оскільки він забезпечує локалізоване підключення. Навпаки, обмежений радіус дії Li-Fi може стати перевагою, знижуючи перешкоди між пристроями в суміжних приміщеннях та зберігаючи високу швидкість передачі даних (див. рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Powerline-адаптери TP-Link, що використовують існуючу електромережу у приміщенні замість патч-кордів Cat 5E

Інтеграція Li-Fi в існуючу інфраструктуру освітлення також є важливим фактором. Ця технологія дозволяє швидко розгортати мережі в офісах чи житлових приміщеннях без значних модифікацій. Водночас певні обмеження залишаються: для функціонування системи потрібні спеціальні адаптери, що підключаються до кожної лампи, а також проводове підключення між ними.

Ще однією значущою перевагою Li-Fi є його придатність для Інтернету речей (IoT). Низька затримка та високошвидкісні можливості роблять цю технологію ідеальною для додатків IoT, де потрібно швидко й надійно передавати великі обсяги даних.

Загалом, гібридні системи, які поєднують Li-Fi із традиційними технологіями зв'язку, здатні забезпечити безперебійне підключення в різних умовах і середовищах, розширюючи можливості сучасних комунікаційних систем

3.2 Гібридний маршрутизатор з можливостями Li-Fi

Сучасні розробки у сфері Li-Fi технологій стикаються з викликами, які обмежують їх популярність на споживчому ринку. Зокрема, окремі пристрої, що базуються на Li-Fi, є нішевими, дорогими та не завжди сумісними з існуючою

інфраструктурою. Основна проблема полягає у відсутності чітких стандартів, що потребує додаткових інвестицій на адаптацію пристроїв. Більшість виробників намагається створити окремі пристрої з підтримкою Li-Fi, проте такий підхід не знаходить масового попиту через високу вартість і обмежену функціональність.

Замість створення ізольованих рішень, ефективнішим є інтеграція Li-Fi у гібридний маршрутизатор, який доповнює вже наявні технології. Сьогодні, як і у випадку з 5G, пристрої поєднують підтримку попередніх стандартів зв'язку (4G, 3G, 2G), забезпечуючи зворотну сумісність і масштабну функціональність. Подібний підхід слід застосувати і для Li-Fi, де функціонал Li-Fi інтегрується у Wi-Fi маршрутизатори, що вже працюють у кількох діапазонах (2,4 ГГц, 5 ГГц та 6 ГГц).

Початкові рішення, ймовірно, будуть нішевими та дорожчими, однак при ширшому впровадженні технології Li-Fi її вартість знизиться, і вона зможе стати стандартною складовою масових пристроїв. Гібридний маршрутизатор із підтримкою Li-Fi дозволить пристроям вийти на споживчий ринок, а стандарти на кшталт 802.11bb стануть основою для розвитку нових рішень.

Таблиця 3.1 – Порівняння основних стандартів Wi-Fi та Li-Fi

Характеристика	802.11a/b/g/n/ac/ax/be (Wi-Fi)	802.11bb (Li-Fi)
Тип передачі	Радіочастотна (RF)	Оптична (інфрачервоне або видиме світло)
Діапазон частот	2.4 ГГц, 5 ГГц, 6 ГГц (Wi-Fi 6E і далі)	400–800 ТГц (видиме світло), інфрачервоний спектр
Максимальна швидкість	До 9.6 Гбіт/с (Wi-Fi 6E/7)	Теоретично до 224 Гбіт/с
Дальність	До 100 метрів в приміщенні	Обмежена лінією видимості (кілька десятків метрів)

Продовження таблиці 3.1 – Порівняння основних стандартів Wi-Fi та Li-Fi

Характеристика	802.11a/b/g/n/ac/ax/be (Wi-Fi)	802.11bb (Li-Fi)
Затримка (латентність)	Низька (1–10 мс)	Дуже низька (<1 мс)
Інтерференція	Чутливий до радіоперешкод	Не чутливий до радіоперешкод
Стійкість до перешкод	Знижується в умовах високої насиченості мереж	Відсутність перешкод у радіочастотному спектрі
Енергоефективність	Відносно висока (залежить від стандарту)	Дуже висока (освітлення і передача даних поєднані)
Пропускна здатність каналу	20, 40, 80, 160 МГц	Широкий спектр, залежить від джерела світла
Безпека	Вразливість до перехоплення сигналу через стіни	Більш безпечний, сигнал не проходить через стіни
Використання в умовах мобільності	Висока (вільне пересування)	Обмежена (потрібна лінія видимості)
Тип пристроїв	Роутери, точки доступу, ноутбуки, смартфони	Li-Fi лампи, адаптери, спеціалізовані приймачі
Сфери використання	Домашні мережі, офіси, публічні простори	Спеціальні сценарії: заводи, лікарні, підводні мережі
Сумісність	Широка підтримка пристроїв	Потребує спеціального обладнання
Застосування освітлення	Незалежне	Інтегроване з освітленням

Концепція гібридного маршрутизатора передбачає його доповнення інфрачервоними світлодіодами для передачі сигналу та фотодіодами для прийому зворотного сигналу. Крім маршрутизатора, ключову роль у системі відіграватимуть модифіковані світлодіодні лампи, які також оснащені фотодіодами та інфрачервоними світлодіодами. Схема роботи виглядає так (див. рис. 3.3):

1. Маршрутизатор передає інфрачервоний сигнал до світлодіодних ламп, які приймають його за допомогою фотодіодів.
2. Лампи, у свою чергу, передають дані назад маршрутизатору, використовуючи інфрачервоне випромінювання, що сприймається фотодіодом на маршрутизаторі.

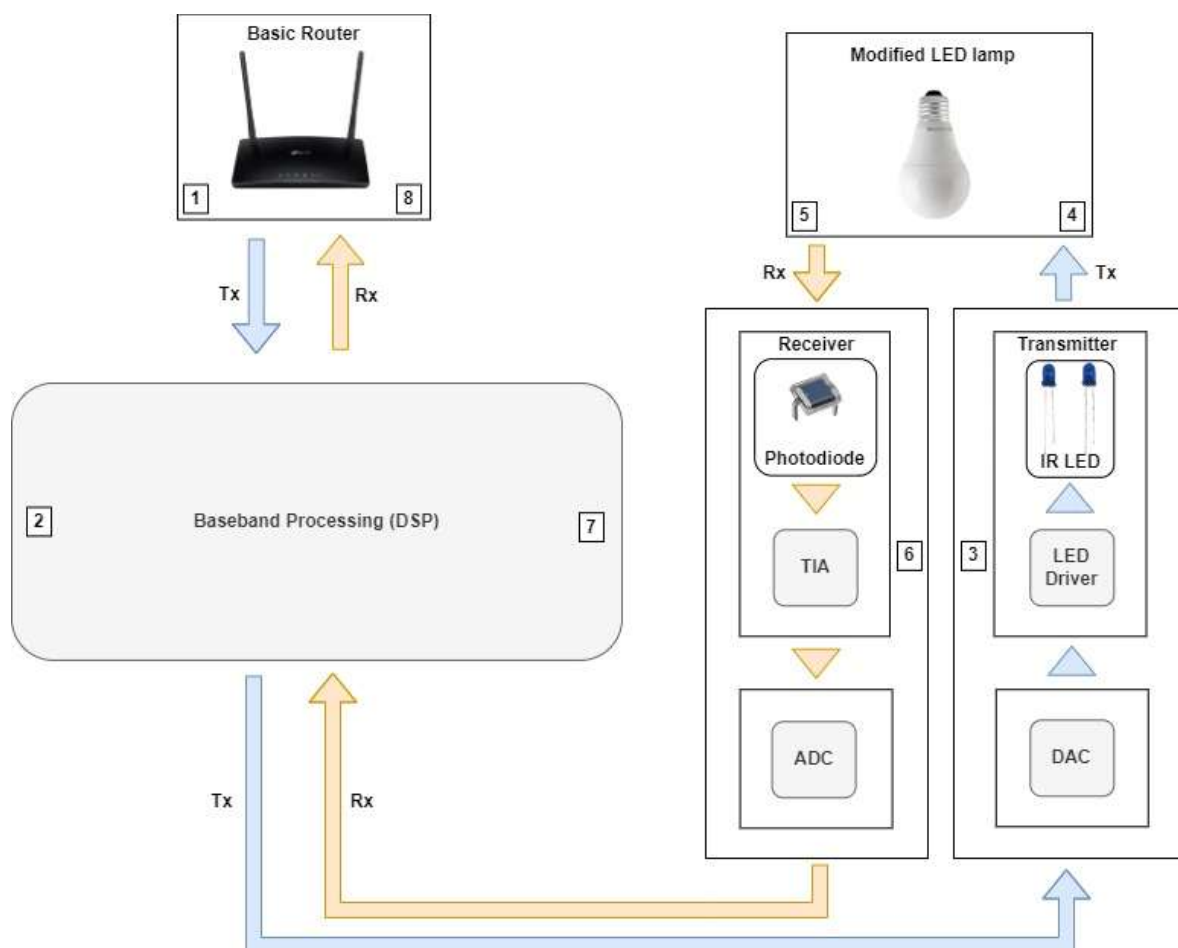


Рисунок 3.3 – Двонаправлена передача даних між інтегрованим блоком Li-Fi у гібридному маршрутизаторі

Такий підхід дозволяє мінімізувати потребу у зміні існуючої інфраструктури та забезпечує інтеграцію нової технології у звичне середовище. Гібридний маршрутизатор з підтримкою Li-Fi та модифіковані лампи дозволять користувачам отримати швидкий та стабільний інтернет у місцях, де традиційний Wi-Fi є недостатньо ефективним. При цьому немає потреби у прокладанні додаткових кабелів чи повній заміні обладнання, як у випадку з багатьма сучасними мережевими рішеннями.

Гібридний маршрутизатор, який поєднує традиційні мережеві технології з Li-Fi, складається з кількох ключових модулів, що взаємодіють між собою для забезпечення передачі та прийому даних через інфрачервоне випромінювання (див. рис. 3.4).

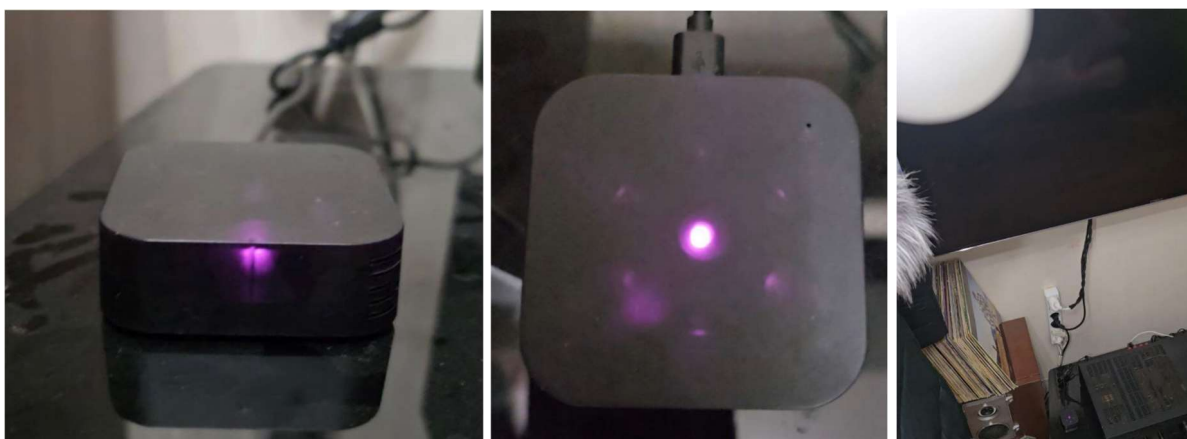


Рисунок 3.4 – Робота IR світлодіодів у поєднанні з видимим світлом

Функціональна діаграма ілюструє архітектуру пристрою, де кожен компонент виконує специфічні завдання в межах системи (див. рис. 3.3-3.5):

Базовий маршрутизатор – це стандартний маршрутизатор, який працює з традиційними технологіями передачі даних (Wi-Fi або Ethernet) і виконує основну функцію передачі цифрових даних. Маршрутизатор передає вихідний сигнал на модуль обробки сигналу (DSP) через послідовний інтерфейс. У зворотному напрямку, отримані дані від Li-Fi приймача повертаються до маршрутизатора для подальшого поширення в мережі.

Блок модуля обробки сигналів (DSP - Digital Signal Processing), центральний блок системи, який відповідає за базову обробку сигналів, їх модуляцію та демодуляцію. DSP приймає цифровий вихідний сигнал від маршрутизатора та обробляє його для передачі на модуль передавача Li-Fi. У зворотному напрямку, сигнали, отримані від приймача Li-Fi, перетворюються у цифровий формат і надсилаються маршрутизатору.

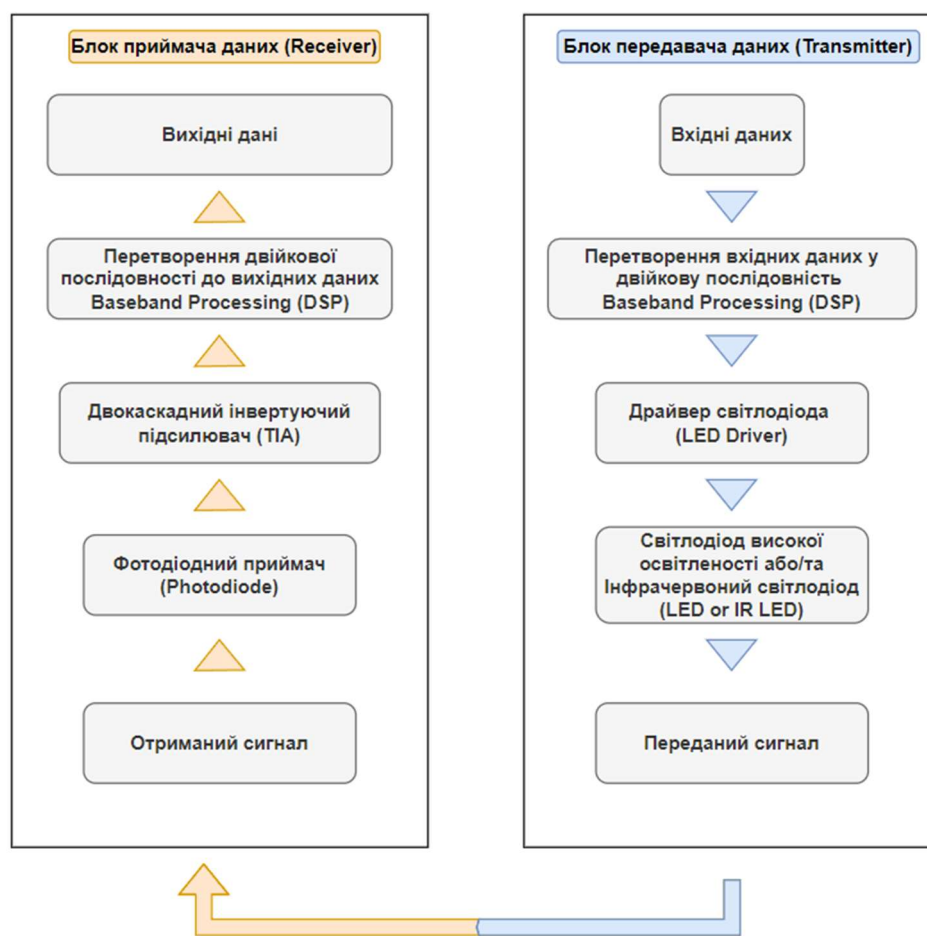


Рисунок 3.5 – Процес передачі даних Li-Fi (Light Fidelity)

Блок передавача Li-Fi (Transmitter) відповідає за генерацію світлових сигналів для передачі даних (див. рис. 3.5):

1. DAC (Цифро-аналоговий перетворювач) перетворює цифровий сигнал, отриманий від DSP, у аналоговий формат.
2. LED Driver (драйвер світлодіода) посилює сигнал і формує керуючі сигнали для інфрачервоного світлодіода (IR LED).

3. IR LED випромінює світлові імпульси на основі отриманих сигналів. Ці імпульси несуть закодовану інформацію для передачі до приймача.

Лампа виконує роль світлового середовища, яке може працювати як джерело освітлення та одночасно як частина інфраструктури Li-Fi, але не є частиною гібридного маршрутизатора, а є окремим пристроєм для здійснення передачі. Світлові сигнали, передані через інфрачервоний світлодіод, досягають приймача, який розташований в межах видимості.

Блок приймача Li-Fi (Receiver) – забезпечує прийом світлових сигналів та їх перетворення у цифровий формат (див. рис. 3.5):

1. Фотодіод (сенсор) фіксує світлові сигнали (випромінювання від IR LED) та перетворює їх у слабкі електричні сигнали.
2. TIA (Transimpedance Amplifier) підсилює сигнали, отримані від фотодіода, для подальшої обробки.
3. ADC (Аналого-цифровий перетворювач) конвертує аналоговий сигнал у цифровий формат, придатний для передачі на DSP.

Блоки передавача і приймача Li-Fi обмінюються даними в межах одного каналу передачі на основі інфрачервоного випромінювання. Важливим є забезпечення коректного відтворення та прийому сигналів, що залежить від стабільності модуляції, чутливості фотодіода та ефективності драйвера LED.

Сигнали, отримані від приймача Li-Fi, передаються назад у модуль DSP для обробки. На цьому етапі виконуються демодуляція та очищення сигналу від шумів. Відновлений цифровий сигнал передається до базового маршрутизатора для його подальшого поширення через традиційні мережеві канали.

Отриманий цифровий сигнал повертається до маршрутизатора, де він може бути переданий через Wi-Fi або Ethernet до кінцевих пристроїв, забезпечуючи доступ до мережі.

Система використовує Li-Fi як альтернативний канал передачі даних, що працює паралельно з традиційними технологіями. Основна перевага полягає у високій швидкості передачі даних на короткі дистанції та мінімізації впливу радіочастотних перешкод.

Інтеграція компонентів, використовуючи інтерфейс підключення UART та GPIO забезпечує універсальність і сумісність з апаратними платформами, такими як маршрутизатори середнього класу. Крім того, модульна архітектура дозволяє легко модернізувати систему, додаючи нові компоненти або адаптуючи існуючі для специфічних потреб спеціаліста, що розробляє прототип (див. рис. 3.6, табл.3.2).



Рисунок 3.6 – Розташування UART на базовому маршрутизаторі

Таблиця 3.2 – Схема підключення UART на базовому маршрутизаторі

Номер пін	Назва контакту	Функція	Деталі підключення
1	VCC	Живлення (зазвичай 3.3V)	Не використовується для живлення зовнішнього пристрою
2	TXD	Передача даних від маршрутизатора	Цей пін підключається до Rx (прийом даних)
3	RXD	Прийом даних до маршрутизатора	Цей пін підключається до Tx (передача даних)
4	GND	Загальний (заземлення)	Підключається до GND

3.3 Модифіковані лампи як вузли Li-Fi

Модифіковані лампи як вузли Li-Fi є ключовим елементом системи, що забезпечує двосторонній зв'язок за принципом гібридного маршрутизатора. Для побудови такої системи важливо врахувати додаткові пристрої, які дозволять передавати дані через існуючу електромережу, використовуючи технологію PLC (Powerline Communication). Дане рішення мінімізує необхідність прокладання додаткових кабелів і дає можливість реалізувати зв'язок не лише в одному приміщенні, а й у різних зонах будівлі (див. рис. 3.7).

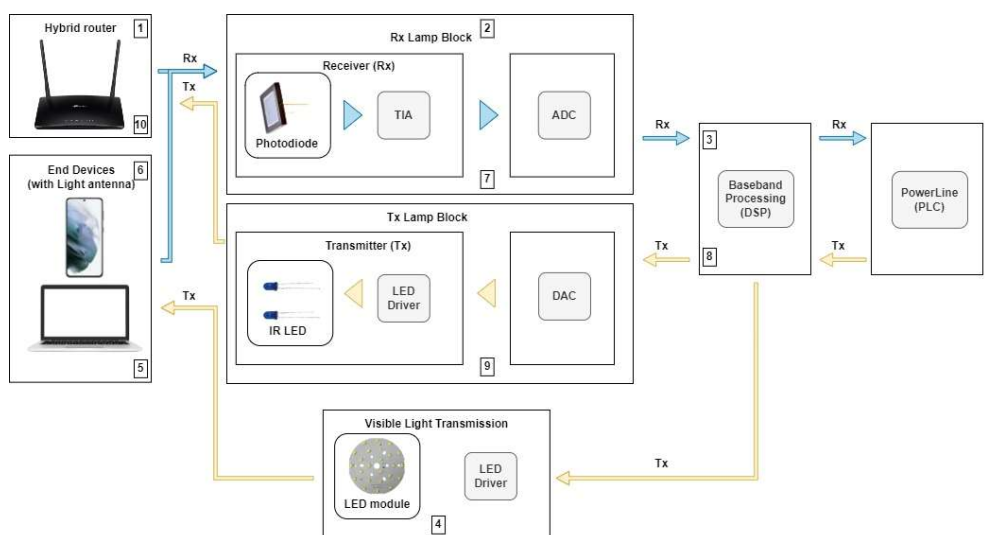


Рисунок 3.7 – Двонаправлена передача даних між інтегрованим блоком Li-Fi у модифікованій LED лампі з можливістю передачі даних по PLC

Система включає блок прийому даних, що працює через світловий канал. Оптичний сигнал приймається, підсилюється та перетворюється у цифровий формат для подальшої обробки. Спеціальний процесор забезпечує модуляцію, демодуляцію та обробку сигналів, що дозволяє керувати світлодіодами для передачі як видимого світла, так і інфрачервоного випромінювання. Вихідний аналоговий сигнал передається на світлодіодний модуль, який використовується для передачі даних у системі.

Після блоку обробки даних сигнал передається через блок передачі даних, який здійснює передачу до кінцевих пристроїв через видимий світловий канал. Додатково використовується інфрачервоний канал для синхронізації між лампами, розташованими в межах одного приміщення. Блок передачі включає LED-драйвер для керування світлодіодами та LED-модуль, що забезпечує модуляцію і передачу даних видимим світлом.

Передача даних відбувається двосторонньо: сигнали від маршрутизатора проходять обробку у блоці обробки сигналів, після чого передаються на кінцеві пристрої через блок передачі. У зворотному напрямку дані з кінцевих пристроїв приймаються через інфрачервоний канал, проходять обробку і передаються назад до маршрутизатора.

Для розширення можливостей системи на кілька приміщень використовується PLC-блок (Powerline Communication), що забезпечує передачу даних через існуючу електромережу. PLC-блок складається зі спеціального інтерфейсу та фільтра, який ізолює сигнали PLC та усуває перешкоди, забезпечуючи стабільну роботу каналу зв'язку. Додатково застосовується PLC-трансформатор для електричної ізоляції та передачі сигналу через мережу.

Для реалізації технології зв'язку на основі видимого світла (VLC), притаманної Li-Fi, виникає необхідність забезпечити передачу даних між приміщеннями, особливо коли гібридний маршрутизатор розташований у центральному місці, наприклад, у коридорі. Оскільки світловий сигнал не може безпосередньо проникати через стіни, для вирішення цієї проблеми застосовується технологія Powerline Communication (PLC). Ця технологія дозволяє передавати дані через вже існуючу електричну мережу без прокладання додаткових кабелів (див. рис. 3.8).

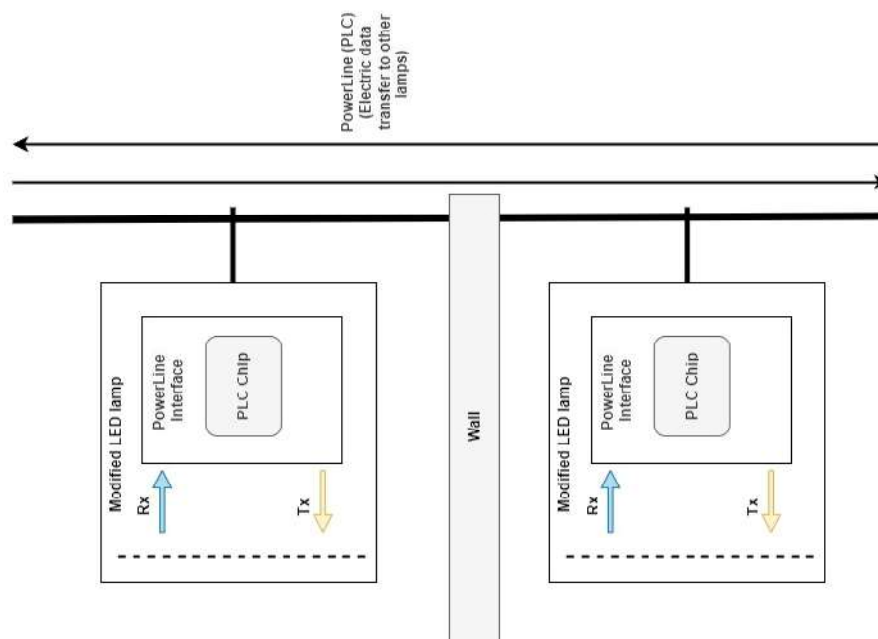


Рисунок 3.8 – Використанням PLC для ретрансляції сигналу на інші модифіковані LED-лампи в різних кімнатах

Суть концепту полягає у поєднанні VLC та PLC для створення гібридної системи зв'язку. Гібридний маршрутизатор, який є центральним вузлом системи, отримує дані від провайдера і передає їх через інфрачервоні світлодіоди. Модифіковані лампи приймають цей сигнал за допомогою фотодіодів, обробляють його та передають через PLC-інтерфейс у загальну електричну мережу, що дозволяє доставляти сигнал до інших приміщень, де знаходяться модифіковані світлодіодні лампи.

Модифіковані лампи забезпечують двосторонній зв'язок: вони можуть як приймати дані від PLC-мережі, так і передавати їх назад у мережу після обробки. Якщо лампи розташовані близько до маршрутизатора або одна до одної, вони передають сигнал за допомогою інфрачервоного випромінювання або видимого світла. У випадках, коли лампи знаходяться у різних приміщеннях, передача даних здійснюється через PLC-канал.

Така концепція створена для оптимального використання існуючої інфраструктури електричних мереж, щоб мінімізувати потребу в додаткових кабелях або обладнанні. Зокрема, технологія Powerline Communication (PLC) у поєднанні з Visible Light Communication (VLC) дозволяє вирішити низку обмежень,

притаманних традиційній передачі даних через видиме світло, особливо у випадках, коли необхідно передавати сигнал між різними кімнатами.

На відміну від типових реалізацій Li-Fi, де часто використовуються SDN-комутатори або інші мережеві компоненти для підключення кожної лампи окремо, цей підхід використовує інфрачервоне випромінювання для передачі даних між лампами та маршрутизатором навіть у темних приміщеннях, що вирішує проблему функціонування системи в умовах відсутності видимого світла, зберігаючи безперервність зв'язку.

Основні переваги цієї запропонованої ідеї:

1. Використання існуючої електричної інфраструктури: технологія PLC дозволяє передавати дані через наявну електричну проводку без додаткових витрат на кабельну інфраструктуру.
2. Подолання фізичних перешкод: оскільки сигнал видимого світла не може пройти через стіни, PLC виступає як міст для передачі даних між приміщеннями.
3. Гібридна передача даних: дані передаються через видиме світло до кінцевих пристроїв, тоді як інфрачервоне випромінювання забезпечує обмін даними між лампами та маршрутизатором.
4. Стабільна робота в умовах відсутності видимого світла: навіть якщо видиме світло вимкнено, система продовжує працювати завдяки інфрачервоному зв'язку.

Запропонована гібридна система не лише мінімізує складність встановлення нової інфраструктури, але й забезпечує надійний та безперебійний зв'язок у різних умовах експлуатації. Завдяки використанню PLC як «провідника» для сигналів, можна обійти обмеження видимого світла та стін, що дозволяє ефективно передавати дані у межах усієї будівлі.

Узагальнюючи, гібридна система передачі даних на основі технологій Powerline Communication (PLC) та Visible Light Communication (VLC) забезпечує ефективний зв'язок за допомогою існуючої електричної інфраструктури та інфрачервоного/видимого світла (див. рис. 3.9):

1. Гібридний маршрутизатор передає дані на модифіковані лампи через інфрачервоне випромінювання або видиме світло.
2. Лампа, отримавши сигнал, передає його далі по електричній мережі за допомогою PLC, що дозволяє уникнути фізичних перешкод, таких як стіни.
3. У свою чергу, інші лампи приймають дані через PLC-інтерфейс, обробляють їх і передають на кінцеві пристрої або синхронізуються між собою для обміну даними за допомогою інфрачервоного випромінювання, якщо вони знаходяться в одній кімнаті.

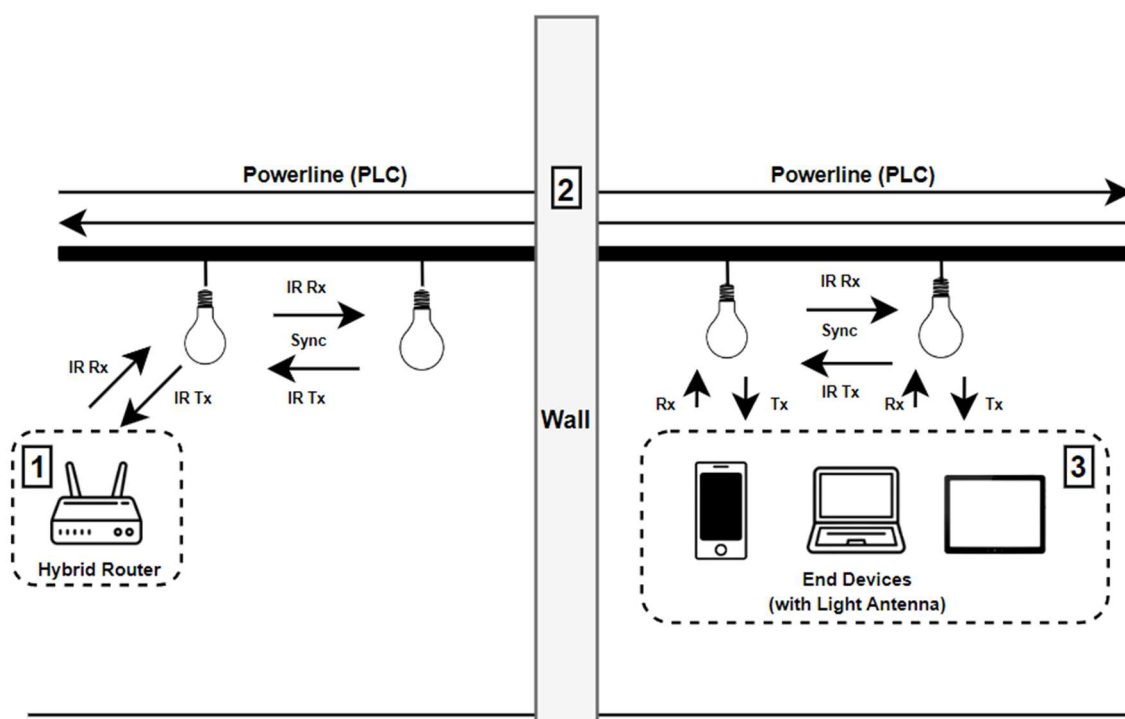


Рисунок 3.9 – Двонаправлена передача даних від гібридного маршрутизатора до модифікованої LED-лампи з використанням PLC для ретрансляції сигналу на інші LED-лампи в різних кімнатах та передачі на кінцеві пристрої

3.4 Зв'язок між кінцевими пристроями та лампами

Зв'язок між кінцевими пристроями та модифікованими лампами здійснюється за допомогою технології VLC (Visible Light Communication), яка використовує видиме світло для передачі даних. Основою такого процесу є модифіковані світлодіодні лампи, що виконують одночасно функції освітлення та передачі даних завдяки високочастотній модуляції світла. Інтенсивність світла змінюється з такою швидкістю, що людське око цього не помічає, але спеціальні приймачі, зокрема фотодіоди, вбудовані в кінцеві пристрої, такі як смартфони, ноутбуки чи планшети, здатні це вловлювати.

Лампи оснащені PLC (Powerline Communication) модулями, які дозволяють передавати дані між кімнатами через електричну мережу, оминаючи фізичні перешкоди, як-от стіни. Додатково, для передачі даних у темряві або як альтернативу видимому світлу, система може використовувати інфрачервоне випромінювання. Смартфони та інші пристрої, які підтримують інфрачервоні сенсори (наприклад, деякі моделі Samsung), здатні приймати такі сигнали (див. рис. 3.10).

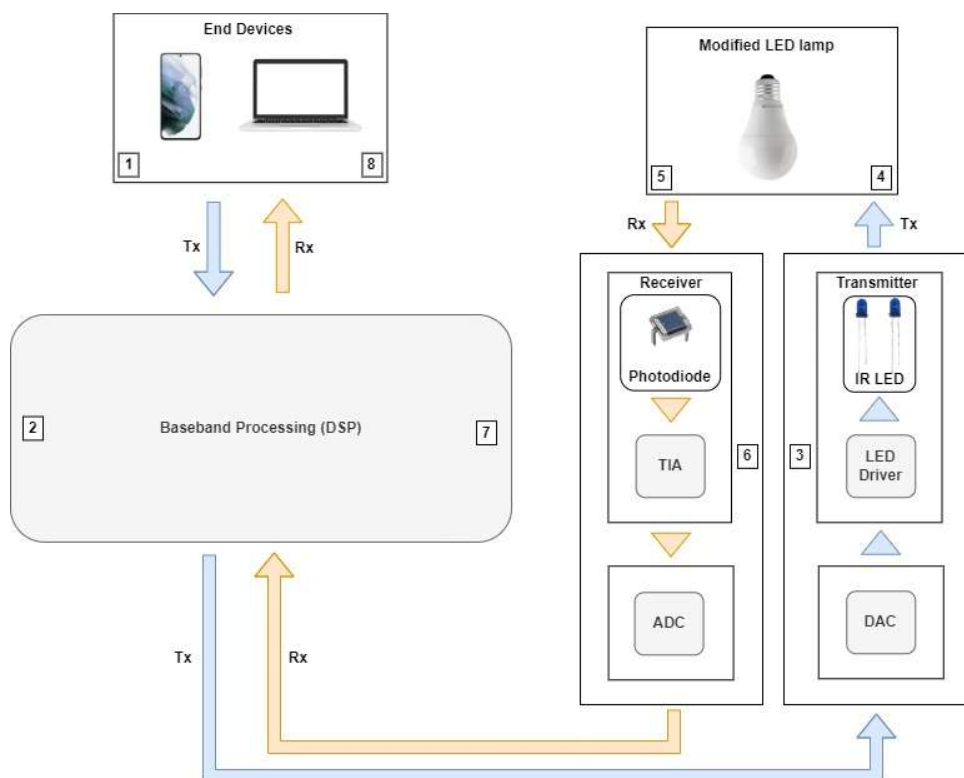


Рисунок 3.10 – Двонаправлена передача даних між інтегрованим блоком Li-Fi (антенною) у кінцевих пристроях та модифікованою LED-лампою

Усі процеси передачі та прийому даних у системі функціонують за схожою схемою як для гібридного маршрутизатора, так і для кінцевих пристроїв. Коли сигнал надходить від модифікованої лампи до маршрутизатора, він спочатку приймається фотодіодом, після чого передається у ТІА (трансімпедансний підсилювач), де сигнал підсилюється. Далі оброблений сигнал надходить на АЦП (аналогово-цифровий перетворювач), який конвертує його у цифровий формат. Наступний етап — обробка в Baseband Processing (DSP), після чого дані передаються кінцевим пристроям.

У випадку, коли кінцевий пристрій (наприклад, смартфон) хоче передати дані на маршрутизатор, процес відбувається у зворотному порядку. Спочатку дані проходять обробку у Baseband Processing (DSP), а потім надходять на ЦАП (цифрово-аналоговий перетворювач), який перетворює цифровий сигнал у аналоговий. Далі сигнал передається у LED-драйвер, що керує інфрачервоними світлодіодами. Ці світлодіоди випромінюють сигнал до модифікованих ламп, які, у

свою чергу, передають дані через PLC (Powerline Communication) через наявну електромережу.

Якщо лампи та гібридний маршрутизатор розташовані в одному приміщенні, між лампами відбувається синхронізація. Найближча до маршрутизатора лампа передає сигнал до нього за аналогічною схемою: блок прийому, обробка сигналу через ТІА, АЦП та Baseband Processing (DSP). У результаті забезпечується ефективна передача даних як між кінцевими пристроями, так і між лампами та маршрутизатором.

Для внесення коректив у реалізацію цього концепту можна розглянути розташування спеціальної світлової антени, яка буде вловлювати видиме світло та передавати дані. Така антена може бути реалізована як окремий модуль, розташований не всередині смартфона на платі, а в області датчиків освітленості та наближення. Цей модуль, який можна назвати світловою антеною, буде оснащений фотодіодом для прийому сигналів та інфрачервоним світлодіодом для передачі даних (див. рис. 3.11).

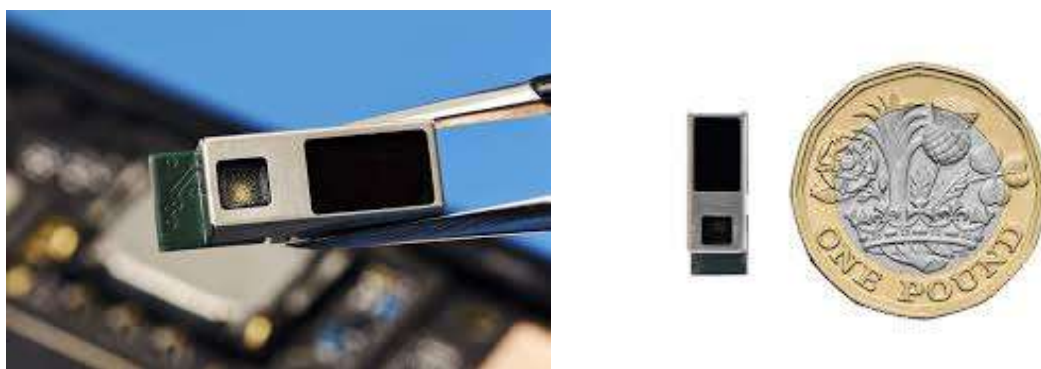


Рисунок 3.11 – Існуюча серійна Li-Fi антена від pureLi-Fi

Важливо врахувати можливість різного положення смартфона під час його використання. Оскільки користувач може тримати пристрій різними сторонами або покласти його так, що доступ до передачі даних буде обмежений, світлові антени слід розміщати з обох сторін пристрою. Зокрема, одну антену можна встановити у передній частині смартфона (біля екрана), а іншу — в задній частині, у блоці камер — це забезпечить безперервний зв'язок навіть при зміні положення смартфона.

Таблиця 3.3 – Розташування Li-Fi антен на кінцевих пристроях

Розташування	Пристрої	Сильні сторони	Слабкі сторони
Верх корпусу	Смартфони, ноутбуки	Пряма видимість до джерела світла	Затінення рукою
Задня частина корпусу	Смартфони, планшети	Добре для настільного використання	Затінення під час тримання
Рамка дисплея	Ноутбуки, планшети	Завжди видима під час роботи	Легко пошкодити в тонких корпусах
Поверхня екрану	Смартфони, планшети	Можливість інтеграції в сенсорні панелі	Технологічна складність інтеграції
Вбудована у камеру	Смартфони, ноутбуки	Пряма видимість, інтеграція з камерою	Обмежує роботу камери
Бічні грані	ІоТ-пристрої, планшети	Мінімум затінення	Не завжди зручно в ручному режимі

3.5 Порівняння запропонованої системи з існуючими

Запропонована система Li-Fi є перспективним гібридним рішенням, яке може вийти на споживчий ринок, вирішуючи деякі недоліки існуючих технологій безпроводного зв'язку. В основі її концепції лежить використання видимого та інфрачервоного світла для передачі даних, що забезпечує високу швидкість та мінімізує перешкоди, властиві традиційним радіочастотним каналам. На відміну від Wi-Fi, сигнал Li-Fi не поширюється за межі приміщення, що забезпечує додатковий рівень безпеки та зменшує взаємні перешкоди між сусідніми мережами, особливо в багатоквартирних будинках із високою щільністю маршрутизаторів (див. рис. 3.12) [53].

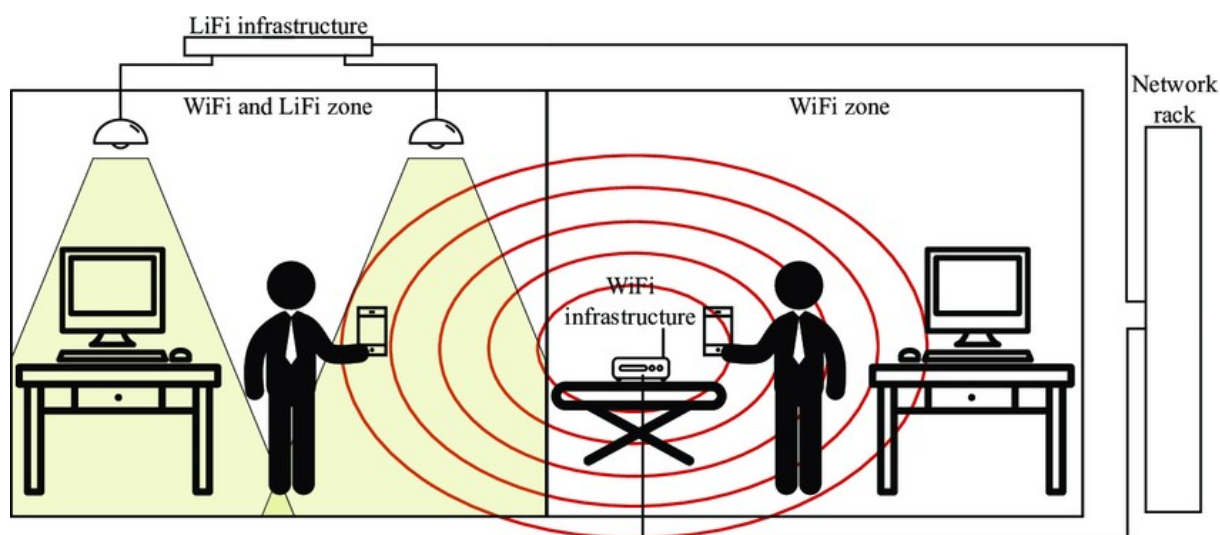


Рисунок 3.12 – Безпечність Li-Fi через дієздатність до проникнення через стіни

Система Li-Fi, запропонована в цьому дослідженні, має значний потенціал для швидкого розгортання без потреби у зміні існуючої інфраструктури. Дане рішення може бути застосоване в різних сценаріях: у багатоквартирних будинках, офісах, кампусах та інших приміщеннях, де можлива її реалізація (див. рис. 3.13).

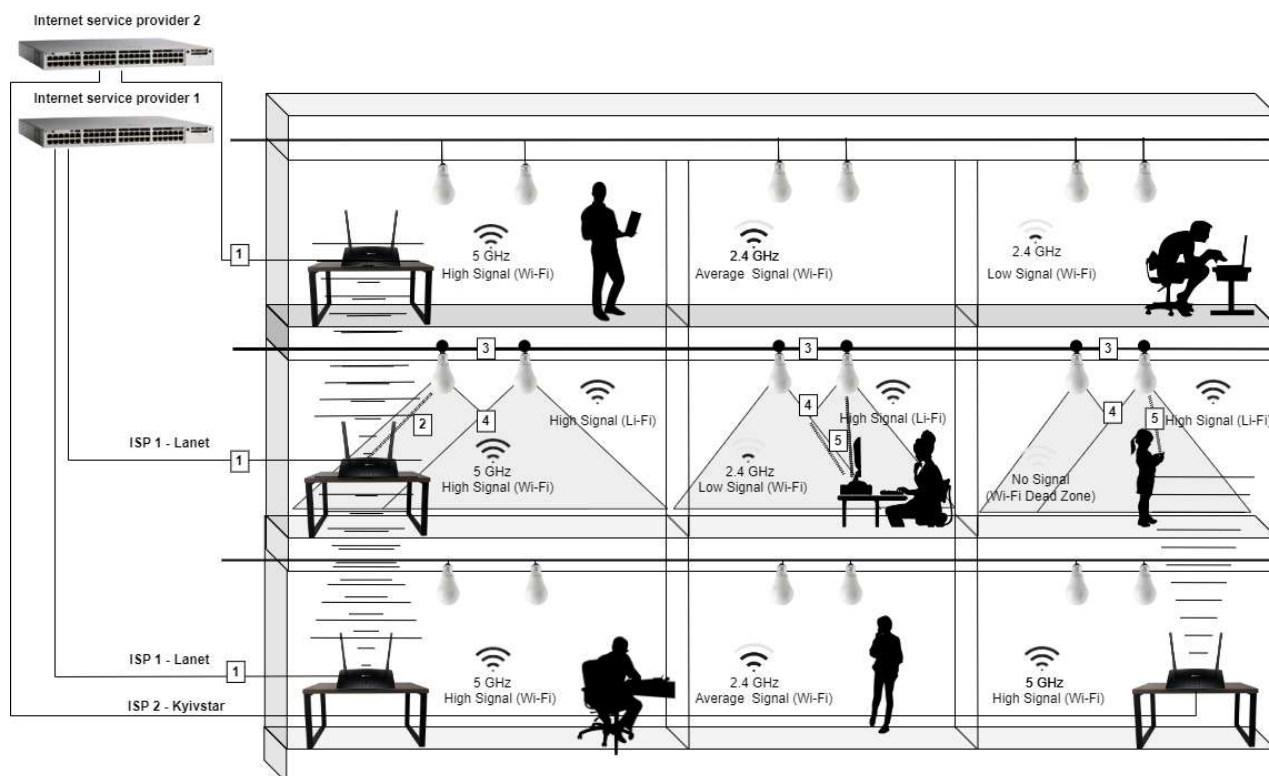


Рисунок 3.13 – Демонстрація перешкод та їх подолання за допомогою впровадження гібридного маршрутизатора

На відміну від багатьох поточних комерційних пропозицій, орієнтованих переважно на вузькоспеціалізовані ринки, запропонована система зосереджена на потребах споживчого ринку. Вона здатна забезпечити високу швидкість передачі даних і надійність навіть у складних умовах (табл. 3.3).

Таблиця 3.4 – Порівняння запропонованого між іншими Li-Fi рішеннями

Параметр	Запропоноване рішення (PLC + Li-Fi)	Trulifi 6002.1	Oledcomm LiFiMAX Kit
Швидкість	До 150 Мбіт/с + PLC	До 150 Мбіт/с	До 150 Мбіт/с
Діапазон	Розширений завдяки PLC	До 1,5 м	Поле зору до 90°
Користувачі	Більше завдяки PLC	До 16	До 16
Тип світла	Видиме (передача) + ІЧ (зворотний канал)	Інфрачервоне	Інфрачервоне

Продовження таблиці 3.4 – Порівняння запропонованого між іншими Li-Fi рішеннями

Параметр	Запропоноване рішення (PLC + Li-Fi)	Trulifi 6002.1	Oledcomm LiFiMAX Kit
Синхронізація	Через PLC + лампи	Автоматична	Автоматична
Безпека	Висока (обмеження доступу + PLC)	AES-128	Локальне світлове поле
Складність	Вища: налаштування PLC + Li-Fi	Готове рішення	Готове рішення
Вартість	\$60 – \$100 (до вартості маршрутизатора)	~ \$2000	\$2400
Масштабування	Гнучке (додавання ламп через PLC)	Обмежене	Обмежене

Головною перевагою цієї системи є її інтеграція з існуючою інфраструктурою електромережі через технологію PowerLine. Модифіковані лампи, які слугують точками доступу, вкручуються в стандартні патрони, що спрощує їхнє впровадження. Вони одночасно отримують і передають дані за допомогою вбудованих модулів, забезпечуючи двосторонній зв'язок без необхідності прокладати додаткові кабелі. У запропонованій системі передбачено об'єднання можливостей Li-Fi та традиційного Wi-Fi, що дозволяє використовувати переваги обох стандартів, зокрема високошвидкісну передачу даних Li-Fi та широку зону покриття Wi-Fi.

Trulifi: Trulifi від компанії Signify (раніше Philips Lighting) є одним із найбільш поширених комерційних рішень на основі Li-Fi. Ця система пропонує швидкість передачі даних до 250 Мбіт/с для окремих точок доступу та фокусується на надійності сигналу в локалізованих просторах. Однак впровадження Trulifi вимагає встановлення спеціальних світильників із вбудованими передавачами, що збільшує вартість і потребує значних змін в інфраструктурі. У запропонованій системі враховано ці обмеження: вона використовує вже існуючу електромережу

та стандартні лампи, які легко інтегруються без значних фінансових витрат. Також Trulifi здебільшого використовує видиме світло для передачі даних, тоді як запропонована система поєднує видиме та інфрачервоне світло, розширюючи можливості її застосування (див. рис. 3.14) [51].



Рисунок 3.14 – Набір для реалізації Li-Fi Trulifi 6002.1 Starter Kit System

LiFiMAX: LiFiMAX від компанії Oledcomm забезпечує швидкість передачі даних до 1 Гбіт/с, що робить його привабливим для корпоративного сегмента. Проте, подібно до Trulifi, його впровадження потребує використання спеціалізованих пристроїв для передачі та прийому сигналу, що обмежує його доступність для масового споживача. У порівнянні з цим, запропонована система надає значно ширші можливості інтеграції завдяки використанню стандартної електромережі та ламп. Крім того, запропонована система орієнтована на спрощення користування для кінцевого споживача, дозволяючи їй бути економічно вигіднішою (див. рис. 3.15) [52].



Рисунок 3.15 – Набір для реалізації Li-Fi Oledcomm LIFIMax Kit

На відміну від існуючих рішень, таких як Trulifi та LiFiMAX, запропонована система забезпечує комбіновану роботу з іншими стандартами, такими як Wi-Fi і PowerLine, створюючи гібридний маршрутизатор, що дозволяє покривати ширший спектр потреб користувачів, забезпечуючи високу швидкість передачі даних (до 10 Гбіт/с у теорії та до 2 Гбіт/с у реальних умовах), більшу надійність та менші витрати на впровадження.

Подібно до сучасних гібридних рішень, таких як маршрутизатори з підтримкою Wi-Fi і 4G/5G, система може працювати в комбінованому режимі. Наприклад, вона дозволяє одночасно використовувати Li-Fi для високошвидкісного обміну даними в умовах радіочастотних перешкод і Wi-Fi для загального покриття – це створює універсальне рішення, здатне задовольнити широкий спектр потреб.

Проте розробка і впровадження такої системи стикаються з певними викликами. Наприклад, інтеграція технологій powerline і Li-Fi може ускладнюватися через завади в мережі powerline, які впливають на якість сигналу. Дане питання може бути вирішене шляхом застосування спеціальних фільтрів і налаштованого програмного забезпечення. Іншою проблемою є затримки під час передачі даних між лампами або синхронізації їх роботи, особливо в багатоповерхових чи розділених приміщеннях. Для мінімізації цих затримок необхідна оптимізація протоколів маршрутизації та вдосконалення апаратного забезпечення.

Розробка такої системи також потребує створення спеціалізованого програмного забезпечення, яке б керувало процесами передачі даних через видиме та інфрачервоне світло. Для прототипів можна використовувати існуючі відкриті операційні системи такі як OpenWrt, але для масового впровадження буде потрібна унікальна, спеціалізована платформа. Вартість реалізації таких рішень може залишатися помірною завдяки використанню доступних комплектуючих, що робить систему перспективною для споживчого ринку (див. рис. 3.16) [54].

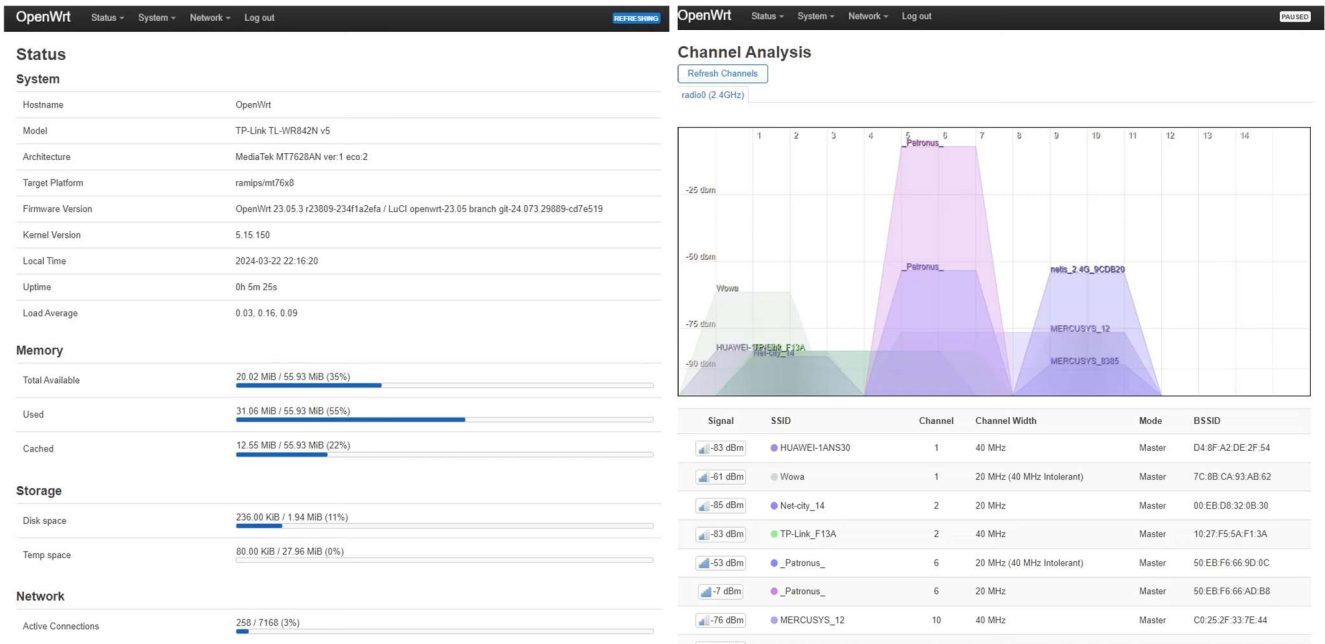


Рисунок 3.16 – Стороння операційна система OpenWrt для маршрутизаторів

Таким чином, запропонована система Li-Fi демонструє значний потенціал для виходу на споживчий ринок. Завдяки інноваційному підходу до інтеграції з існуючою інфраструктурою, використанню комбінованих технологій і врахуванню недоліків існуючих систем, таких як Trulifi та LiFiMAX, вона може стати масовим рішенням, що забезпечує ефективний, безпечний і високошвидкісний безпроводний зв’язок. До дослідження додано орієнтовна вартість комплектуючих, які можуть бути використані для побудови прототипу гібридного маршрутизатора та модифікованої LED лампи (Додаток Б).

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження демонструє значний потенціал систем зв'язку на основі світла як трансформаційного рішення для сучасних мереж. Аналізуючи їх принципи, технічні характеристики та стратегії інтеграції, стає зрозуміло, що ці системи пропонують високу швидкість передачі даних, енергоефективність і підвищену безпеку. Використання видимого світла та інфрачервоного випромінювання та його інтеграція з існуючими технологіями забезпечує інноваційні способи подолання обмежень традиційних радіочастотних мереж.

Інтеграція Li-Fi у гібридні мережі, зокрема через гібридні маршрутизатори та модифіковані лампи як вузли, представляє масштабований та ефективний підхід до підключення. Використання видимого світла для низхідної лінії зв'язку та інфрачервоного зв'язку для висхідної лінії зв'язку забезпечує безперебійний двонаправлений обмін даними. Включення зв'язку по лінії електропередач як магістралі покращує масштабованість, забезпечуючи легкий розподіл між кімнатами без значних змін інфраструктури.

Також було визначено та оцінено ключові проблеми, включаючи складність інтеграції, потенційну затримку та високі початкові витрати. Незважаючи на ці перешкоди, переваги гібридних систем Li-Fi, такі як зменшення радіочастотного перевантаження, покращена безпека та функціональність подвійного призначення, підкреслюють їх довгострокову цінність. Прогрес у апаратному забезпеченні, програмному забезпеченні та стандартизації може ще більше прискорити їх впровадження.

У підсумку ця робота забезпечує детальну структуру для розуміння та розробки гібридних комунікаційних мереж на основі світла. Запропонований підхід, зосереджений на інтеграції Li-Fi як гібридне рішення, пропонує надійне, масштабоване та безпечне рішення, застосовне в різних галузях промисловості, що робить його критично важливою технологією для майбутнього впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. GeeksforGeeks. Amplitude modulation - definition, types, expression - geeksforgeeks. GeeksforGeeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/amplitude-modulation-definition-types-expression/> (дата звернення: 10.10.2024).
2. Admin. Frequency modulation - definition, equation, applications, advantages,. BYJUS. URL: <https://byjus.com/jee/frequency-modulation/> (дата звернення: 10.10.2024).
3. Admin. Pulse modulation - definition, types, block diagrams, pulse modulation width. BYJUS. URL: <https://byjus.com/jee/pulse-modulation/> (дата звернення: 10.10.2024).
4. Kitz - Fibre Optic Cables . kitz.co.uk - DSL Broadband Information. URL: <https://kitz.co.uk/adsl/fibre-optic-cables.htm> (date of access: 12.10.2024).
5. Vats A. Free space optical communication: laser sources, modulation schemes and detection techniques. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/326847437_Free_Space_Optical_Communication_Laser_Sources_Modulation_Schemes_and_Detection_Techniques (дата звернення: 12.10.2024).
6. A combined fibre/free-space-optical communication system for long-haul wireline/wireless transmission at millimetre-wave/sub-THz frequencies - Communications Engineering. Nature. URL: <https://www.nature.com/articles/s44172-023-00068-1> (дата звернення: 12.10.2024).
7. The FOA reference for fiber optics - fiber optic data links -. Home -The Fiber Optic Association. URL: <https://www.thefoa.org/tech/ref/appln/datalink.html> (дата звернення: 13.10.2024).
8. Photodetectors — MOBEL. URL: <https://faculty.iisertvm.ac.in/manoj/photodetectors/> (дата звернення: 13.10.2024).
9. Gifany D. LOGIC CODES GENERATION AND TRANSMISSION USING AN ENCODING-DECODING SYSTEM. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/235724156_LOGIC_CODES_GENERATION_AND_TRANSMISSION_USING_AN_ENCODING-DECODING_SYSTEM?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYXVWdlIjojX2RpcmVjdCJ9fQ (дата звернення: 15.10.2024).
10. Optical data processing. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/optical-data-processing> (дата звернення: 15.10.2024).
11. Canon : canon technology | canon science lab | optical fibers. Canon Global. URL: https://global.canon/en/technology/s_lab/light/003/08.html (дата звернення: 15.10.2024).
12. Optical Communication Using LEDs Alone. Hackaday. URL: <https://hackaday.com/2019/12/22/optical-communication-using-leds-alone/> (дата звернення: 17.10.2024).

13. Photodetectors - Tech-FAQ. Tech-FAQ -. URL: <https://www.tech-faq.com/photodetector.html> (дата звернення: 17.10.2024).

14. Photodiode : working and how to use in circuits - gadgetronicx. Gadgetronicx. URL: <https://www.gadgetronicx.com/working-photodiode-applications/> (дата звернення: 17.10.2024).

15. Avalanche photodiodes. RP Photonics AG – the Company. URL: https://www.rp-photonics.com/avalanche_photodiodes.html (дата звернення: 19.10.2024).

16. Photoresistors. Physical Computing. URL: <https://makeabilitylab.github.io/physcomp/sensors/photoresistors.html> (дата звернення: 19.10.2024).

17. Optical sensors. TE Connectivity (TE). URL: <https://www.te.com/en/products/sensors/optical-sensors.html?tab=pgp-story> (дата звернення: 21.10.2024).

18. What is an optical fiber? Definition, structure, propagation, modes, advantages and disadvantages of an optical fiber - circuit globe. Circuit Globe. URL: <https://circuitglobe.com/optical-fiber.html> (дата звернення: 21.10.2024).

19. What are fiber optics and how do they work? | coherent. Global Leader in Materials, Networking, and Lasers | Coherent. URL: <https://www.coherent.com/news/glossary/optical-fibers> (дата звернення: 21.10.2024).

20. Free space optics (FSO) - cablefree. CableFree. URL: <https://www.cablefree.net/cablefree-free-space-optics-fso/#jp-carousel-1879> (дата звернення: 21.10.2024).

21. A space division multiplexed free-space-optical communication system that can auto-locate and fully self align with a remote transceiver - Scientific Reports. Nature. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-55670-1> (дата звернення: 22.10.2024).

22. Juila wilson. Semiconductor lasers : an overview of commercial devices. LinkedIn: Log In or Sign Up. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/semiconductor-lasers-overview-commercial-devices-juila-wilson/> (дата звернення: 22.10.2024).

23. Solid-State laser system - Laser technology news, Newest Laser Product news. Laser technology news, Newest Laser Product news. URL: <https://www.civillaser.com/news/solid-state-laser-system/> (дата звернення: 22.10.2024).

24. Gas lasers: a comprehensive guide. FindLight Blog. URL: <https://www.findlight.net/blog/gas-lasers-a-comprehensive-guide/> (дата звернення: 24.10.2024).

25. LED wavelength, light color & application - kinglight - leading optoelectronic semiconductor manufacturer - shenzhen kinglight co., LTD. Kinglight - Leading Optoelectronic Semiconductor Manufacturer - Shenzhen Kinglight Co., LTD. URL: <https://en.kinglight.com/blog/led-wavelength-and-light-color.html> (дата звернення: 28.10.2024).

26. Pulse amplitude modulation (PAM) : working, types & its applications. ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students. URL: <https://www.elprocus.com/pulse-amplitude-modulation/> (дата звернення: 28.10.2024).

27. Fiber optic receivers | how it works, application & advantages. Electricity - Magnetism. URL: <https://www.electricity-magnetism.org/fiber-optic-receivers/> (дата звернення: 28.10.2024).

28. What is a feedback control system? Types & advantages. Inst Tools. URL: <https://instrumentationtools.com/feedback-control-system/> (дата звернення: 30.10.2024).

29. Noori R. Fiber optic cable range: how far will it go?. The Network Installers. URL: <https://thenetworkinstallers.com/blog/fiber-optic-cable-range/#:~:text=Although%20the%20maximum%20distance%20of,some%20application%20require%20longer%20distances.> (дата звернення: 30.10.2024).

30. How the Internet Travels Across Oceans (Published 2019) / A. Satariano та ін. The New York Times. URL: <https://www.nytimes.com/interactive/2019/03/10/technology/internet-cables-oceans.html> (дата звернення: 30.10.2024).

31. Explorez la technologie LiFi : LiFi Blogs | Oledcomm. Oledcomm. URL: <https://www.oledcomm.net/blog/fundamentals-of-visible-light-communication/> (дата звернення: 05.11.2024).

32. Macquarie University. Team sets new speed record for industry standard optical fiber. Tech Xplore - Technology and Engineering news. URL: <https://techxplore.com/news/2023-05-team-industry-standard-optical-fiber.html> (дата звернення: 05.11.2024).

33. Team D. C. The impact of fiber optic cables on data center energy efficiency and cost savings. Hexatronic Data Center. URL: <https://hexatronicdatacenter.com/en/knowledge/the-impact-of-fiber-optic-cables-on-data-center-energy-efficiency-and-cost-savings#:~:text=Fiber%20optic%20cables%20are%20more,signals%20used%20in%20copper%20cables.> (дата звернення: 05.11.2024).

34. Passive optical network tutorial | FS community. Knowledge. URL: <https://community.fs.com/article/passive-optical-network-tutorial.html> (дата звернення: 07.11.2024).

35. Nazir Pottoo S. DESIGN AND ANALYSIS OF M-ARY MODULATION DRIVEN FREE SPACE OPTICAL TRANSCEIVER USING COHERENT DETECTION AND DSP ALGORITHMS. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/350020960_DESIGN_AND_ANALYSIS_OF_M-ARY_MODULATION_DRIVEN_FREE_SPACE_OPTICAL_TRANSCEIVER_USING_COHERENT_DETECTION_AND_DSP_ALGORITHMS (дата звернення: 07.11.2024).

36. An Experimental Study of FSO Link Performance in Desert Environment. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/304611997_An_Experimental_Study_of_FSO_Link_Performance_in_Desert_Environment (дата звернення: 07.11.2024).

37. Ren W. Sensitivity Deterioration of Free-Space Optical Coherent/Non-Coherent OOK Modulation Receiver by Ambient Light Noise. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/368565342_Sensitivity_Deterioration_of_Free

-Space_Optical_CoherentNon

Coherent_OOK_Modulation_Receiver_by_Ambient_Light_Noise (дата звернення: 14.11.2024).

38. Demonstration of a 4 gb/s wavelength division multiplexing based li-fi network. IEEE Xplore. URL:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9641183/authors#authors> (дата звернення:

14.11.2024).A comprehensive road map of modern communication through free-space optics. ResearchGate. URL:

https://www.researchgate.net/publication/347857891_A_comprehensive_road_map_of_modern_communication_through_free-space_optics (дата звернення: 14.11.2024).

39. Errachid Adardour H. Performance Analysis of Free Space Optical Networks Using the Beta-Average Recursive Estimator. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/342092003_Performance_Analysis_of_Free_Space_Optical_Networks_Using_the_Beta-Average_Recursive_Estimator (дата звернення: 14.11.2024).

40. Fauzan Talib M. Analysis of geometrical effect in free space optical communication system using DDM technique. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/312326055_Analysis_of_geometrical_effect_in_free_space_optical_communication_system_using_DDM_technique (дата звернення: 14.11.2024).

41. Fiber optic installation: challenges and solutions to know. Trenchlesspedia. URL: <https://trenchlesspedia.com/fiber-optic-installation-challenges-and-solutions-to-know/2/4682> (дата звернення: 18.11.2024).

42. Li-Fi: Great in principle, maybe not so much in practice - EDN Asia. EDN Asia. URL: <https://www.ednasia.com/li-fi-great-in-principle-maybe-not-so-much-in-practice/> (дата звернення: 18.11.2024).

43. An optical camera communication using novel hybrid frequency shift and pulse width modulation technique for li-fi. MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2079-3197/10/7/110> (дата звернення: 18.11.2024).

44. Tull R. W. Learn why fiber optics is used in 5G networks | versitron. Versitron. URL: <https://www.versitron.com/blogs/post/learn-why-fiber-optics-is-used-in-5g-networks> (дата звернення: 18.11.2024).

45. 5G is software. BSA Foundation. URL: <https://software.org/reports/5g-is-software/> (дата звернення: 21.11.2024).

46. What is difference in 5G between fronthaul, midhaul and backhaul ?. 5G Training and 5G Certification. URL: <https://www.5gworldpro.com/blog/2022/05/15/what-is-difference-in-5g-between-fronthaul-midhaul-and-backhaul/> (дата звернення: 24.11.2024).

47. Infographic: 5G Is Reliably Faster Than 4G. Statista Daily Data. URL: <https://www.statista.com/chart/25146/reliable-5g-and-4g-download-speeds/> (дата звернення: 24.11.2024).

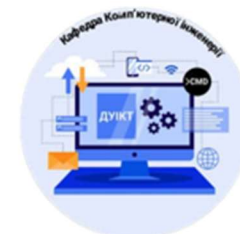
48. All systems go for free space optics. SPIE, the international society for optics and photonics. URL: <https://spie.org/news/all-systems-go-for-free-space-optics> (дата звернення: 26.11.2024).

49. Free-Space optical communication. edmundoptics. URL: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/trending-in-optics/free-space-optical-communication/> (дата звернення: 26.11.2024).
50. Burgess M. The most vulnerable place on the internet. WIRED. URL: <https://www.wired.com/story/submarine-internet-cables-egypt/> (дата звернення: 08.12.2024). The Role of LiFi Technology in Smart City Development. LiFi. URL: <https://lifi.co/lifi-blog/the-role-of-lifi-technology-in-smart-city-development/> (дата звернення: 26.11.2024).
51. Trulifi 6002.1 system review – lifi tech news upgrade. LiFi Tech News Upgrade. URL: <https://www.lifitn2.com/trulifi-60021-system-review> (дата звернення: 26.11.2024).
52. Explorez la technologie LiFi : LiFi Blogs | Oledcomm. Oledcomm. URL: <https://www.oledcomm.net/blog/oledcomm-lifimax-compact/> (дата звернення: 05.12.2024).
53. Martinek R., Danys L., Jaros R. Adaptive software defined equalization techniques for indoor visible light communication. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/figure/Pure-WiFi-environment-vs-WiFi-and-light-fidelity-LiFi-zone-WiFi-signals-pass-through_fig3_340007882 (дата звернення: 05.12.2024).
54. Documentation. OpenWrt. URL: <https://openwrt.org/docs/start> (дата звернення: 06.12.2024).
55. Бутусов М.А., Волохін В.В. Система передачі інформації за допомогою світлових сигналів. «Проблеми комп'ютерної інженерії» : Науково-практ. конф., м.Київ, 3 грудня 2024 р. С.151-154
56. Бутусов М.А., Волохін В.В. Оптиковолоконні технології: основа високошвидкісної, масштабованої та надійної телекомунікаційної інфраструктури ХХІ століття. «Проблеми комп'ютерної інженерії» : Науково-практ. конф., м.Київ, 3 грудня 2024 р. С.155-158

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ



ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра комп'ютерної інженерії



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістра
НА ТЕМУ: «СИСТЕМА ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ
СВІТЛОВИХ СИГНАЛІВ»

Виконав студент групи КСДМ-62

Бутусов Максим Анатолійович

Керівник дипломної роботи:

Волохін Віталій Васильович,

канд,техн.наук, доцент

Київ – 2025

Мета, об'єкт, предмет дослідження

Мета роботи – аналіз, розробка та оцінка систем передачі інформації за допомогою світлових сигналів у рамках гібридної комунікаційної мережі з акцентом на інтеграцію технології Li-Fi для високошвидкісної, безпечної та енергоефективної передачі даних

Об'єкт дослідження – гібридні системи зв'язку, які поєднують світлові технології, такі як Li-Fi, з традиційними методами зв'язку, включаючи зв'язок по лінії електропередач і радіочастотні системи

Предмет дослідження – конструкція, компоненти та принципи роботи світлових систем зв'язку, зосереджені на їх інтеграції в гібридні мережі з використанням Li-Fi-сумісних маршрутизаторів і модифікованих ламп як вузлів мережі

Актуальність роботи

Ця робота досліджує можливості та обмеження систем зв'язку на основі світла, зосереджуючись на їх інтеграції в гібридні мережі зв'язку. Дослідження включає аналіз принципів світлових технологій, оцінку їхніх технічних характеристик і проектування гібридної системи з використанням маршрутизаторів із підтримкою Li-Fi та модифікованих ламп.

Запропонована система використовує видиме світло та інфрачервоний зв'язок для двонаправленої передачі даних і включає зв'язок по лінії електропередач (PLC) для масштабованості. Дослідження підкреслює перевагу запропонованої системи, що включає високу швидкість, енергоефективність і підвищену безпеку, одночасно вирішуючи такі проблеми, як складність інтеграції та витрати на впровадження.

Проблематика сучасних технологій передачі даних

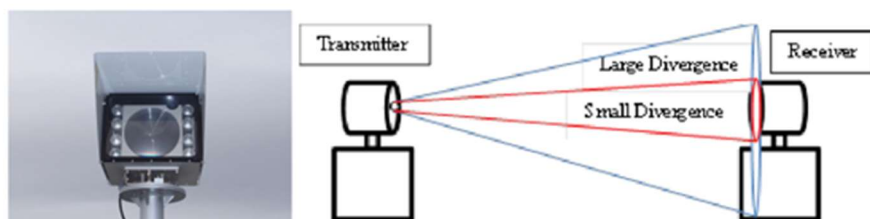


Рис. 2.22 – Проблеми використання FSO: вирівнювання світла

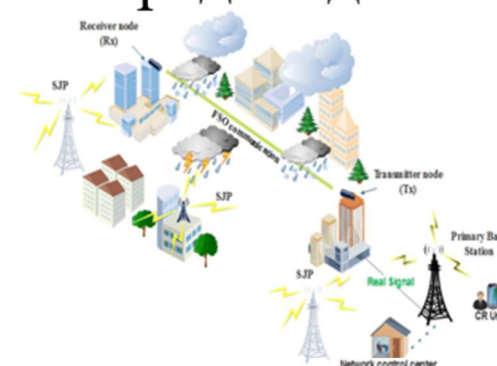


Рис. 2.21 – Проблеми використання FSO: атмосферні та штучні перешкоди

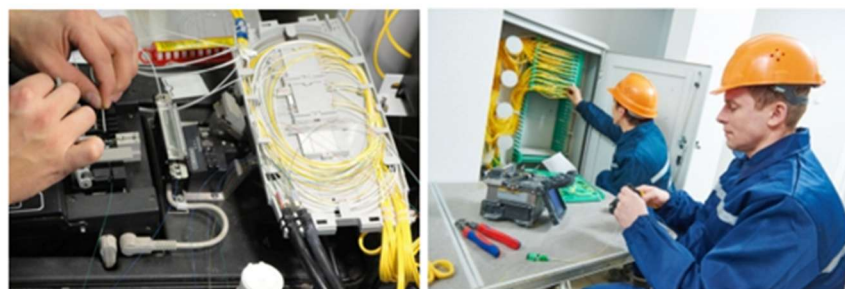


Рис. 2.23 – Проблеми використання оптоволокна: висока вартість із-за складності впровадження



Рис. 2.24 – Проблеми використання оптоволокна: недостатньо розвинена та віддалена інфраструктура

Обмеженість використання волоконно-оптичного зв'язку

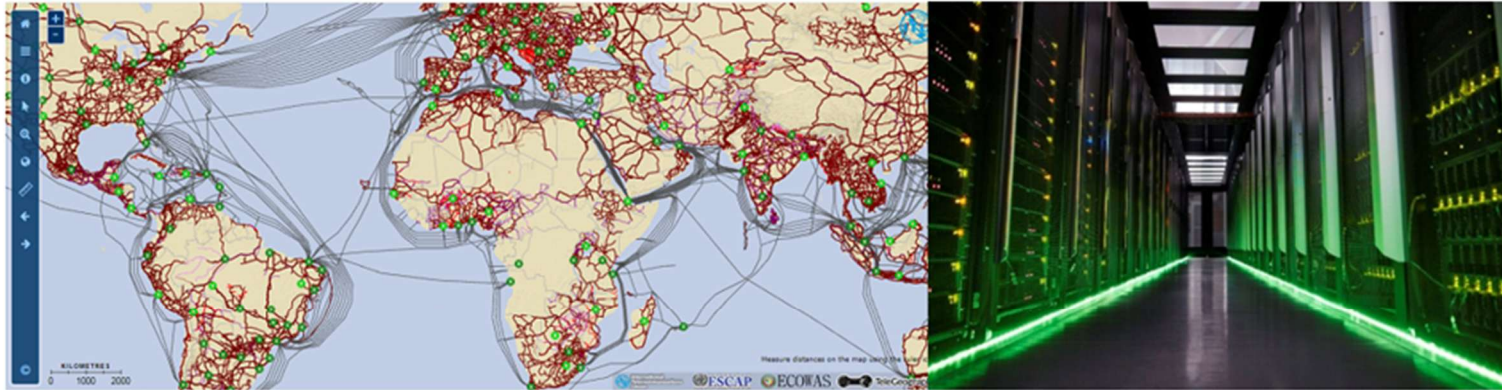


Рис. 2.19 – Сфери використання волоконно-оптичного зв'язку: дата центри та інтернет-провайдери

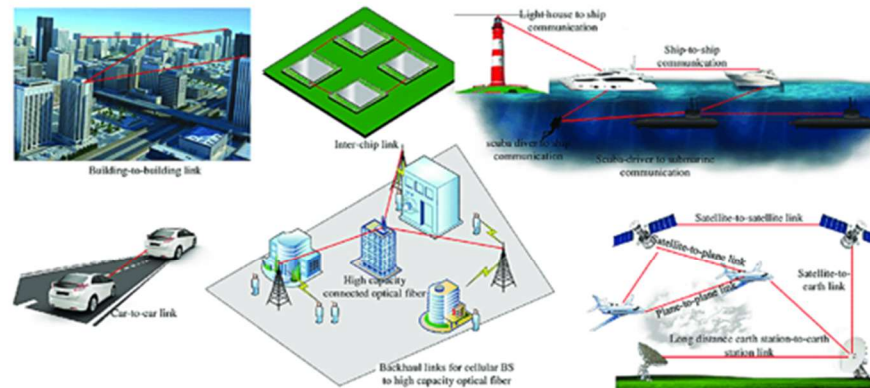


Рис. 2.20 – Сфери використання волоконно-оптичного зв'язку: оптичний зв'язок у вільному просторі

Створення доступного рішення для масового ринку

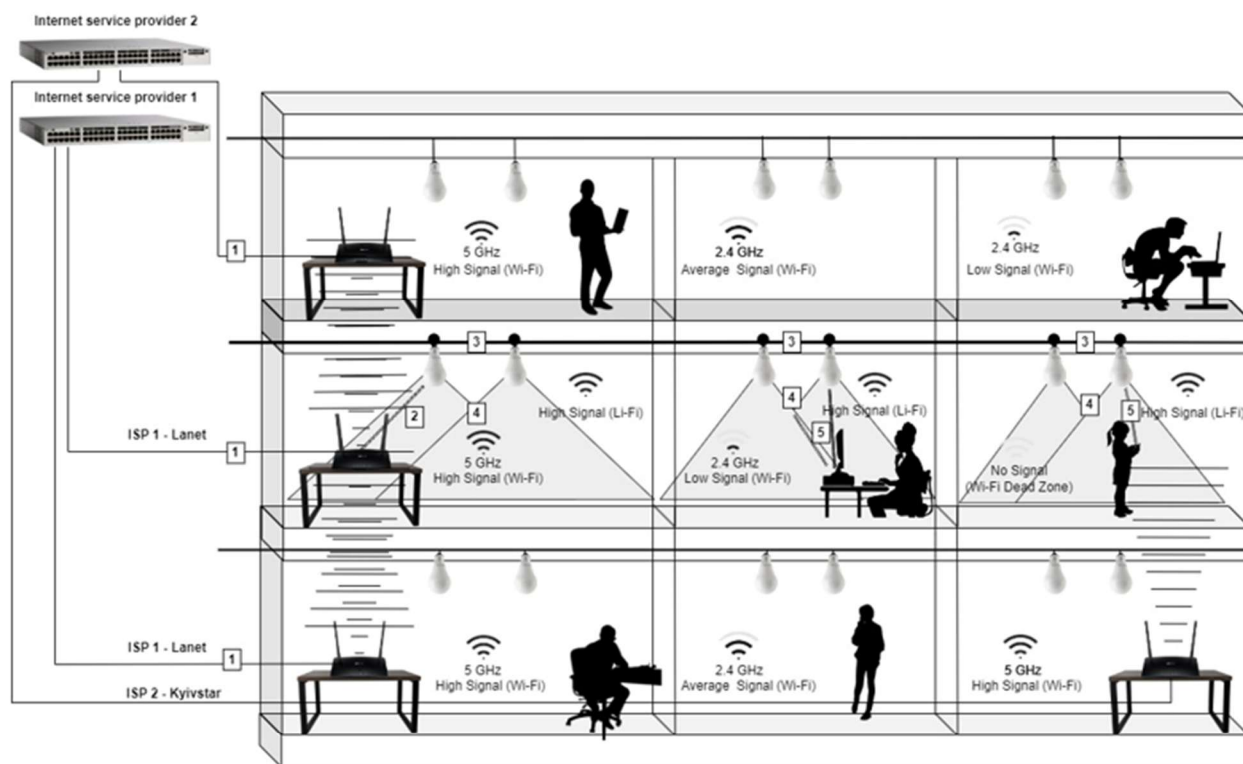


Рис. 3.13 – Демонстрація перешкод та їх подолання за допомогою впровадження гібридного маршрутизатора

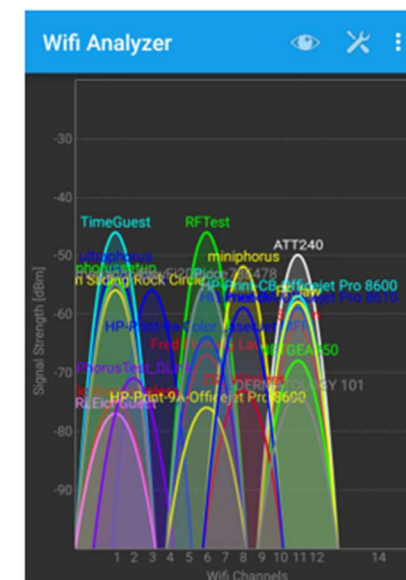


Рис. 2.25 – Перевантаження радіочастотного діапазону та вплив інтерференції на якість Wi-Fi-зв'язку

Концепція гібридного маршрутизатора з підтримкою Li-Fi

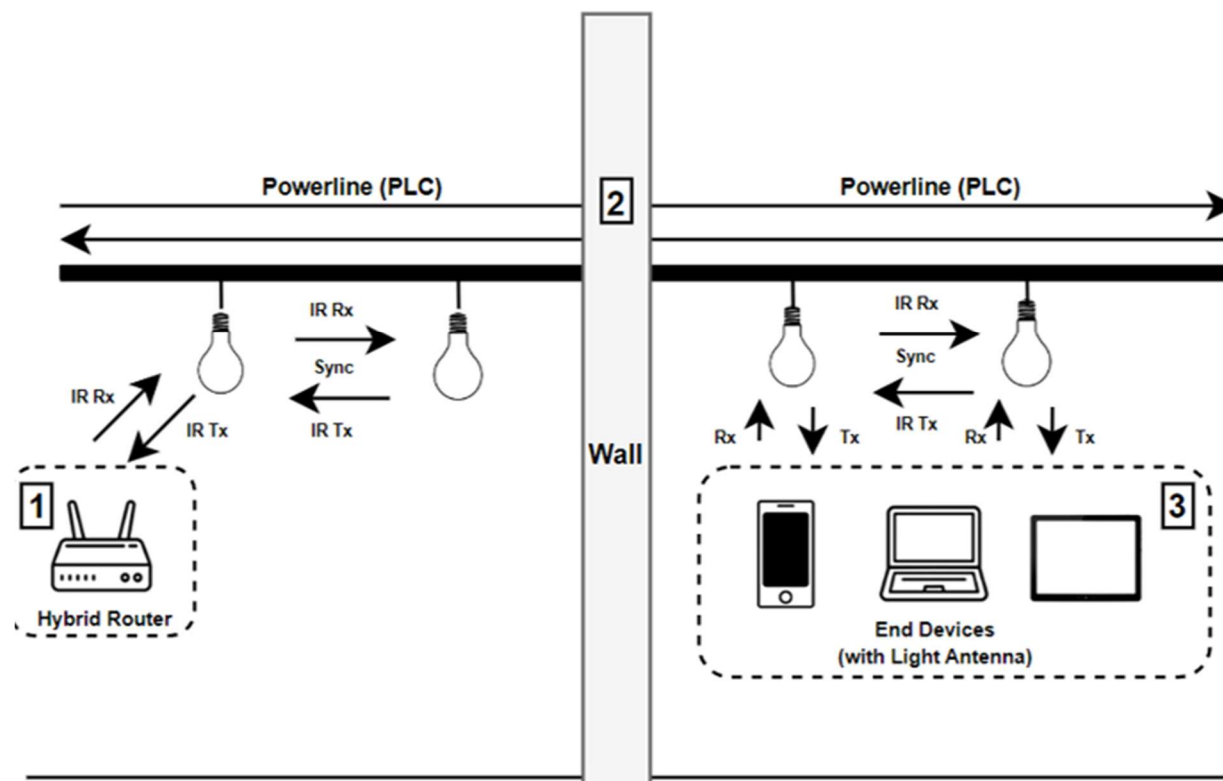


Рис. 3.9 – Двонаправлена передача даних від гібридного маршрутизатора до модифікованої LED-лампи з використанням PLC для ретрансляції сигналу на інші LED-лампи в різних кімнатах та передачі на кінцеві пристрої

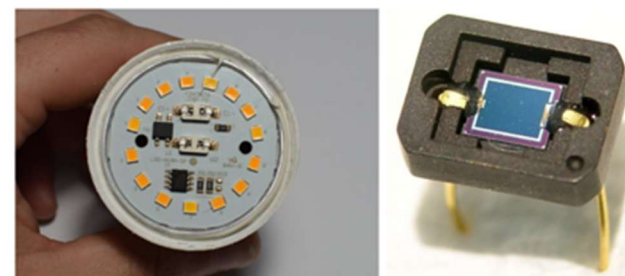


Рис. 3.1 – LED модуль (для передачі даних) та фотодіод (для прийому даних)



Рис. 3.2 – Powerline-адаптери TP-Link, що використовують існуючу електромережу у приміщенні замість патч-кордів Cat 5E

Принцип роботи гібридного маршрутизатора

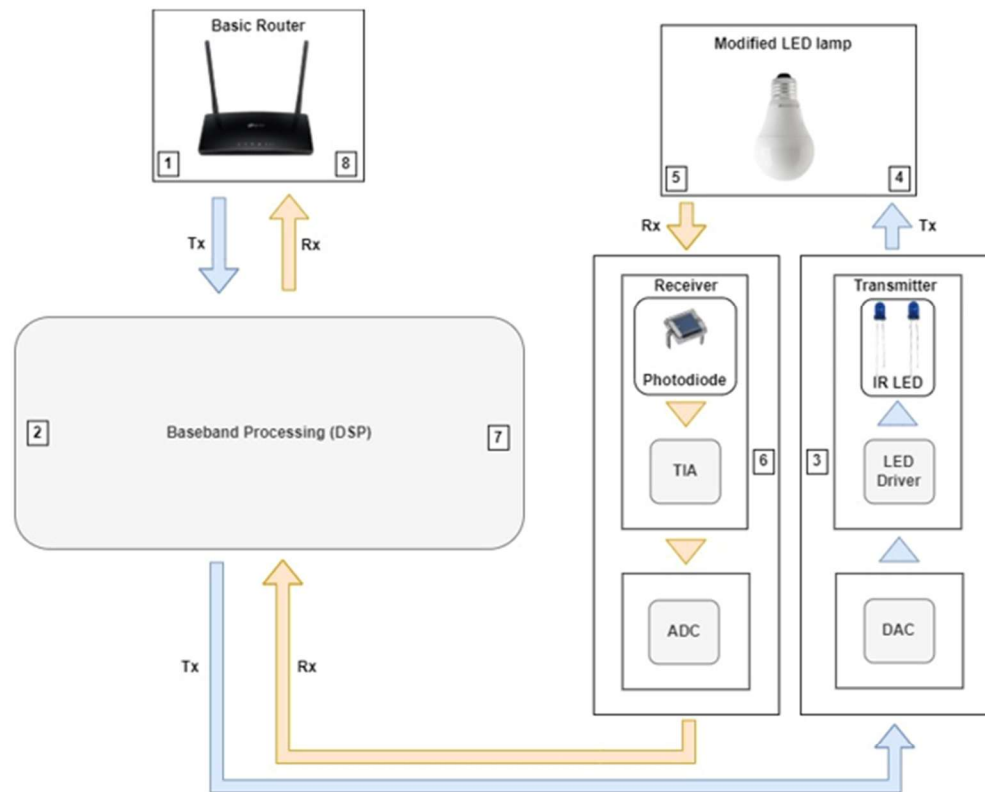


Рис. 3.3 – Двонаправлена передача даних між інтегрованим блоком Li-Fi у гібридному маршрутизаторі

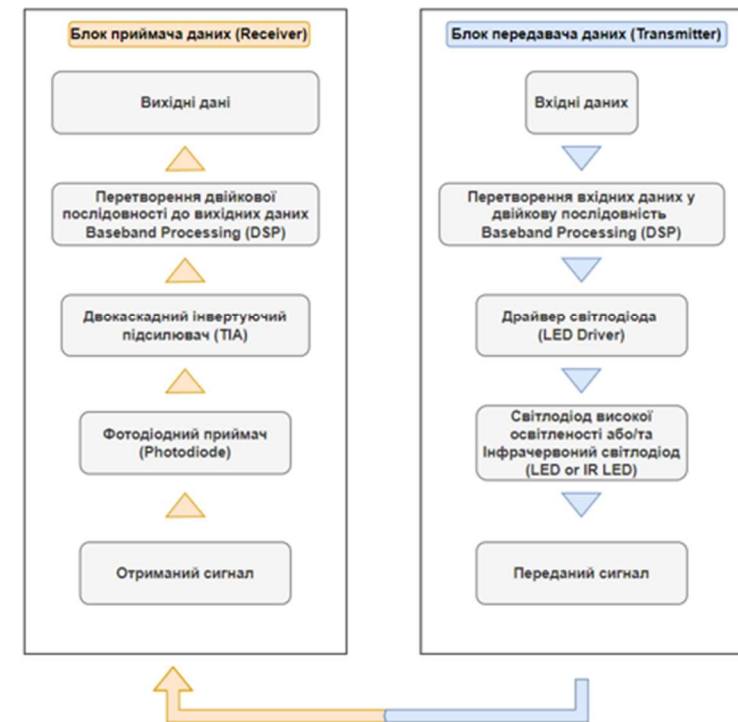


Рис. 3.5 – Процес передачі даних Li-Fi (Light Fidelity)

Принцип роботи модифікованих ламп

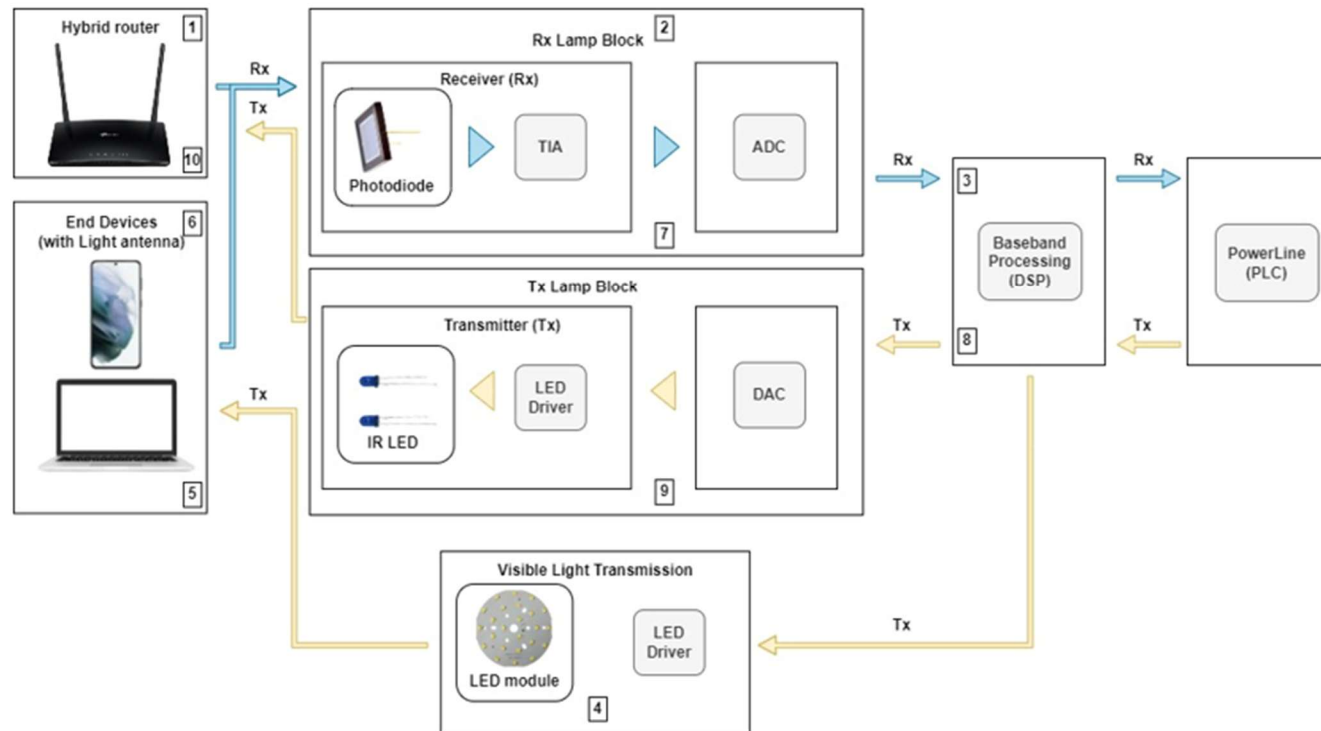


Рис. 3.7 – Двонаправлена передача даних між інтегрованим блоком Li-Fi у модифікованій LED лампі з можливістю передачі даних по PLC

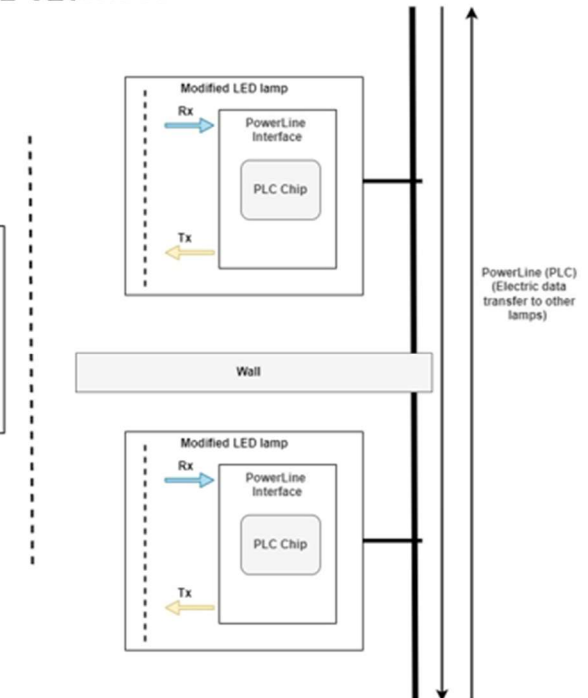


Рис. 3.8 – Використанням PLC для ретрансляції сигналу на інші модифіковані LED-лампи в різних кімнатах

Принцип роботи у кінцевих пристроях



Рис. 3.11 – Існуюча серійна Li-Fi антена від pureLi-Fi

Розташування	Пристрої	Сильні сторони	Слабкі сторони
Верх корпусу	Смартфони, ноутбуки	Пряма видимість до джерела світла	Затінення рукою
Задня частина корпусу	Смартфони, планшети	Добре для настільного використання	Затінення під час тримання
Рамка дисплея	Ноутбуки, планшети	Завжди видима під час роботи	Легко пошкодити в тонких корпусах
Поверхня екрану	Смартфони, планшети	Можливість інтеграції в сенсорні панелі	Технологічна складність інтеграції
Вбудована у камеру	Смартфони, ноутбуки	Пряма видимість, інтеграція з камерою	Обмежує роботу камери
Бічні грані	ІюТ-пристрої, планшети	Мінімум затінення	Не завжди зручно в ручному режимі

Табл. 3.3 – Розташування Li-Fi антен на кінцевих пристроях

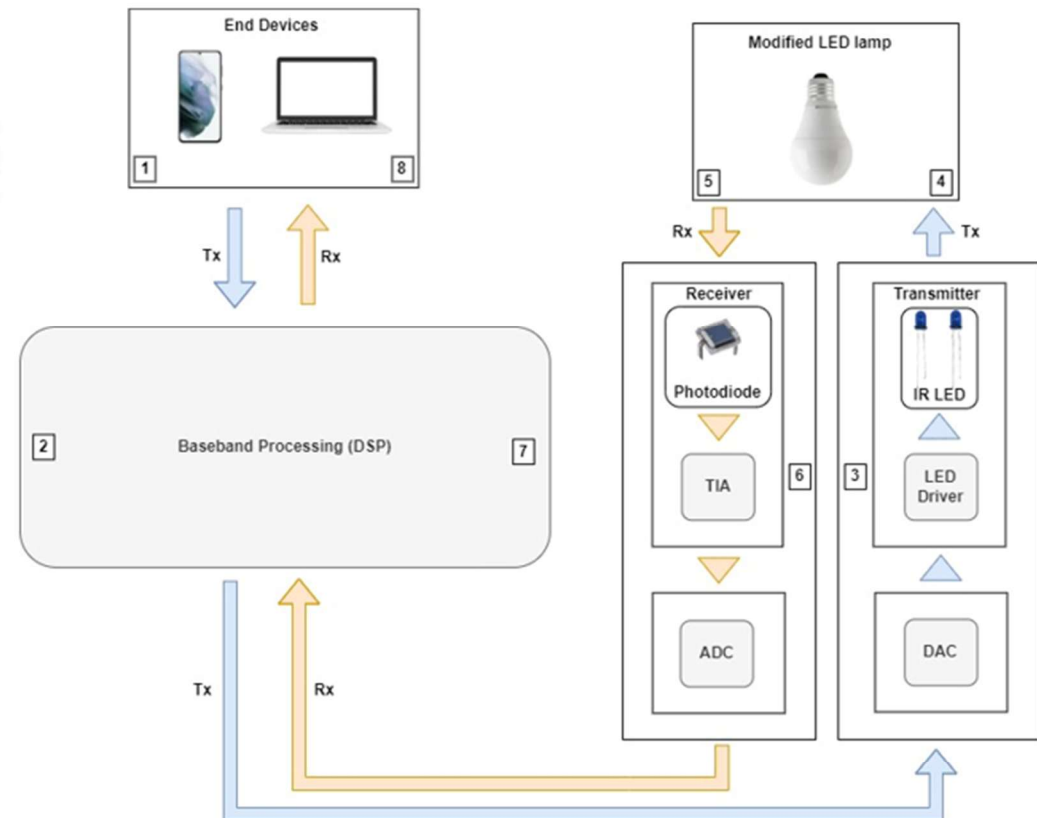


Рис. 3.10 – Двонаправлена передача даних між інтегрованим блоком Li-Fi (антенною) у кінцевих пристроях та модифікованою LED-лампою

Інтеграція запропонованого рішення у базовий маршрутизатор

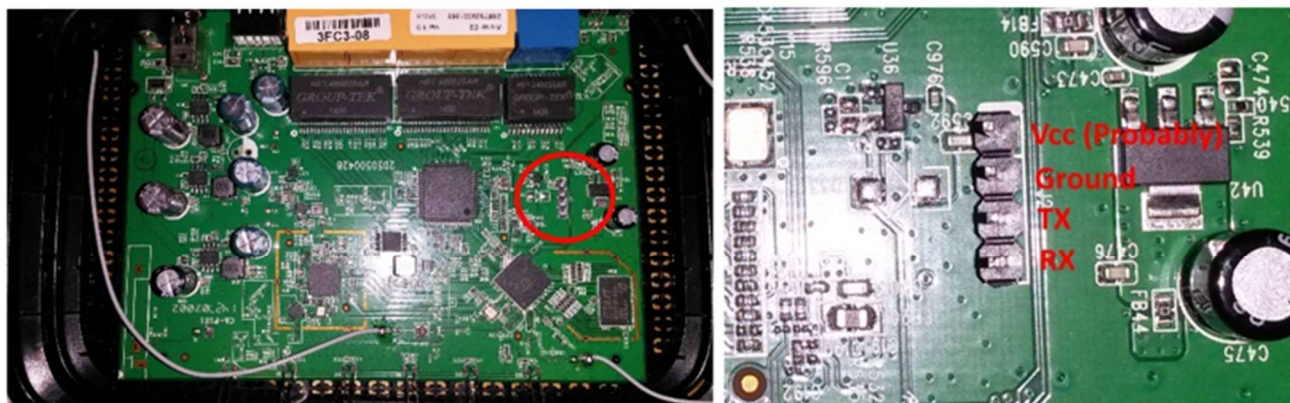


Рис. 3.6 – Розташування UART на базовому маршрутизаторі

Номер пін	Назва контакту	Функція	Деталі підключення
1	VCC	Живлення (зазвичай 3.3V)	Не використовується для живлення зовнішнього пристрою
2	TXD	Передача даних від маршрутизатора	Цей пін підключається до Rx (прийм даних)
3	RXD	Прийом даних до маршрутизатора	Цей пін підключається до Tx (передача даних)
4	GND	Загальний (заземлення)	Підключається до GND

Табл. 3.2 – Схема підключення UART на базовому маршрутизаторі

Майбутній потенціал та перспективи впровадження

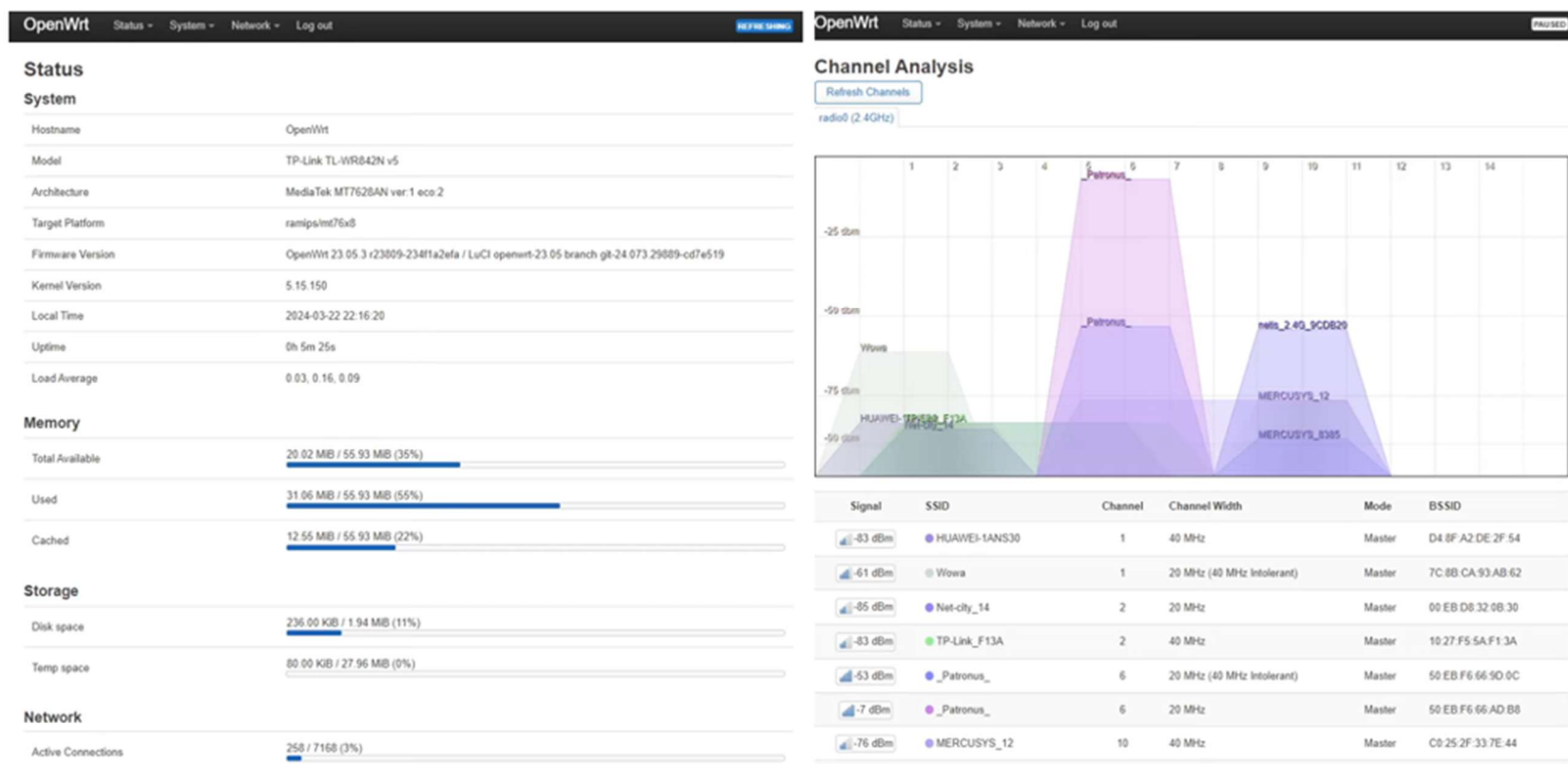


Рис. 3.16 – Стороння операційна система OpenWrt для маршрутизаторів

Порівняння існуючих рішень та запропонованого концепту

Параметр	Запропоноване рішення (PLC + Li-Fi)	Trulifi 6002.1	Oledcomm LiFiMAX Kit
Швидкість	До 150 Мбіт/с + PLC	До 150 Мбіт/с	До 150 Мбіт/с
Діапазон	Розширений завдяки PLC	До 1,5 м	Поле зору до 90°
Користувачі	Більше завдяки PLC	До 16	До 16
Тип світла	Видиме (передача) + ІЧ (зворотний канал)	Інфрачервоне	Інфрачервоне
Синхронізація	Через PLC + лампи	Автоматична	Автоматична
Безпека	Висока (обмеження доступу + PLC)	AES-128	Локальне світлове поле
Складність	Вища: налаштування PLC + Li-Fi	Готове рішення	Готове рішення
Вартість	\$60 – \$100 (до вартості маршрутизатора)	~ \$2000	\$2400
Масштабування	Гнучке (додавання ламп через PLC)	Обмежене	Обмежене

Табл. 3.4 – Порівняння запропонованого між іншими Li-Fi рішеннями



Рис. 3.14 – Набір для реалізації Li-Fi
Trulifi 6002.1 Starter Kit System



Рис. 3.15 – Набір для реалізації Li-Fi
Oledcomm LiFiMAX Kit

Висновки

Проведене дослідження демонструє значний потенціал систем зв'язку на основі світла як трансформаційного рішення для сучасних мереж. Аналізуючи їх принципи, технічні характеристики та стратегії інтеграції, стає зрозуміло, що ці системи пропонують високу швидкість передачі даних, енергоефективність і підвищену безпеку. Використання видимого світла та інфрачервоного випромінювання та його інтеграція з існуючими технологіями забезпечує інноваційні способи подолання обмежень традиційних радіочастотних мереж.

Інтеграція Li-Fi у гібридні мережі, зокрема через гібридні маршрутизатори та модифіковані лампи як вузли, представляє масштабований та ефективний підхід до підключення. Використання видимого світла для низхідної лінії зв'язку та інфрачервоного зв'язку для висхідної лінії зв'язку забезпечує безперебійний двонаправлений обмін даними. Включення зв'язку по лінії електропередач як магістралі покращує масштабованість, забезпечуючи легкий розподіл між кімнатами без значних змін інфраструктури.

Продовження висновків

Також було визначено та оцінено ключові проблеми, включаючи складність інтеграції, потенційну затримку та високі початкові витрати. Незважаючи на ці перешкоди, переваги гібридних систем Li-Fi, такі як зменшення радіочастотного перевантаження, покращена безпека та функціональність подвійного призначення, підкреслюють їх довгострокову цінність. Прогрес у апаратному забезпеченні, програмному забезпеченні та стандартизації може ще більше прискорити їх впровадження.

У підсумку ця робота забезпечує детальну структуру для розуміння та розробки гібридних комунікаційних мереж на основі світла. Запропонований підхід, зосереджений на інтеграції Li-Fi як гібридне рішення, пропонує надійне, масштабоване та безпечне рішення, застосовне в різних галузях промисловості, що робить його критично важливою технологією для майбутнього впровадження.

Публікації та апробація роботи

1. Бутусов М.А., Волохін В.В. Система передачі інформації за допомогою світлових сигналів. «Проблеми комп'ютерної інженерії» : Науково-практ. конф., м.Київ, 3 грудня 2024 р. С.151-154
2. Бутусов М.А., Волохін В.В. Оптиковолоконні технології: основа високошвидкісної, масштабованої та надійної телекомунікаційної інфраструктури ХХІ століття. «Проблеми комп'ютерної інженерії» : Науково-практ. конф., м.Київ, 3 грудня 2024 р. С.155-158