ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Оцінка продуктивності та надійності корпоративних мереж на основі технології Li-Fi»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

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

_____ Владислав ЧЕКАНОВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-62
Владислав ЧЕКАНОВ

Керівник: СІМЧЕНКО

Рецензент: _____

Київ – 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра	Мобільних та відеоінформаційних технологій
Ступінь вищої освіти	Магістр
Спеціальність	172 Електронні комунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма	Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія ГАЛАГАН
« » _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Чеканову Владиславу Ігоровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Оцінка продуктивності та надійності корпоративних мереж на основі технології Li-Fi»,
керівник кваліфікаційної роботи СІМЧЕНКО, к.т.н., доцент,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 30.10.2025 р. № 467.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Технологія Li-Fi і загальні властивості.
   2. Мережа Li-Fi.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Концептуальні аспекти технології Li-Fi.
   2. Дослідження продуктивності мереж на основі технології Li-Fi.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.
6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	27.10.25	Викон.
2.	Порівняння технології Li-Fi з іншими технологіям.	30.10.25	Викон.
3.	Дослідження мережі Li-Fi та принципу передачі інформації в ній.	02.11.25	Викон.
4.	Практична реалізація та застосування мережі Li-Fi.	05.11.25	Викон.
5.	Висновки, реферат, вступ	11.12.25	Викон.
6.	Розробка презентації	19.12.25	Викон.

Здобувач вищої освіти Владислав ЧЕКАНОВ

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи СІМЧЕНКО

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Чеканов Владислав Ігорович

на тему: «Оцінка продуктивності та надійності корпоративних мереж на основі технології Li-Fi»

Актуальність:

Зростаючі потреби людства в швидкості та доступності інтернету завжди актуальні. Технологія Li-Fi розглядається нині як необхідність. Разом з тим подальше вивчення та впровадження цієї технології наближає сучасне людство до майбутнього з більш доступним та якісним інтернетом.

Тому, тема магістерської роботи, є актуальною. Запропонована тема має практичне значення та є доцільною і своєчасною.

Позитивні сторони:

1. Зміст магістерської роботи відповідає завданню. Її автор, показав високий рівень знань і ступінь підготовленості до майбутньої роботи за фахом.
2. Текст викладений грамотно, ясно, послідовно. Графічний матеріал оформлений якісно. Широко використовується сучасна науково-технічна література, включаючи англомовні видання.

Недоліки:

1. В роботі не приділено високу увагу впровадженим мережам Li-Fi.
2. В роботі не висвітлено можливість використання водойм як середовище для розгортання Li-Fi мережі.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «добре», а здобувач Чеканов Владислав Ігорович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Рецензент:

(науковий ступінь, вчене звання) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Чеканов В. І. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Оцінка продуктивності та надійності корпоративних мереж на основі технології Li-Fi

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Чеканов Владислав Ігорович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з програмно-апаратними засобами мобільного зв'язку, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Чеканова Владислава Ігоровича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ СІМЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2025 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Чеканов В. І.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувачка кафедрою
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія ГАЛАГАН
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2025 року

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 72 стор., 40 рис., 5 табл., 22 дж.

Мета роботи – дослідження продуктивності та надійності корпоративних мереж на основі технології Li-Fi.

Об'єкт дослідження – Li-Fi мережі та їхні компоненти.

Предмет дослідження – доцільність використання Li-Fi мереж порівняно з іншими технологіями.

Короткий зміст роботи: В магістерській роботі досягнуто наступних результатів:

1. У першому розділі розглянуто як працює система Li-Fi та її плюси, проведено порівняльний огляд Li-Fi з іншими технологіями бездротового доступу Wi-Fi. Визначені перспективні сфери застосування.

2. У другому розділі розглянуто точку доступу Li-Fi (AP), складено принцип передавання та трансляції сигналів через тракт мережі Li-Fi. Визначено вплив оптичних Front-End компонентів та світла у відкритому просторі всередині приміщення на VLC та Li-Fi канали. Винайдено методи усунення перешкод.

3. У третьому розділі підібране програмне забезпечення для емуляції Li-Fi, змодульовані моделі Li-Fi систем у Simulink. Розглянуто комбіновані мережі Li-Fi/Wi-Fi і вбудовано LiFi в гібридне програмне забезпечення Li-Fi/Wi-Fi. Протестований стільниковий стенд мережі Li-Fi та полегшено навантаження мережі у класі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: LI-FI, WI-FI, LED ЛАМПА, СИГНАЛ, ПЕРЕДАЧА ДАННИХ, СВІТЛО, ТРАНСЛЯЦІЯ, ПОШИРЕННЯ В ПРОСТОРІ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, ПЕРЕШКОДИ.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 72 pages, 40 pictures, 5 table, 22 sources.

The purpose of the work - research on the performance and reliability of corporate networks based on Li-Fi technology.

Object of research – Li-Fi networks and their components.

Subject of research – feasibility of using Li-Fi networks compared to other technologies.

Summary of the work: The following results were achieved in the master's thesis:

1. The first section discusses how the Li-Fi system works and its advantages, a comparative review of Li-Fi with other Wi-Fi wireless access technologies is conducted. Promising areas of application are identified.

2. The second section discusses the Li-Fi access point (AP), the principle of signal transmission and broadcasting through the Li-Fi network path is developed. The influence of optical Front-End components and light in open space indoors on VLC and Li-Fi channels is determined. Methods for eliminating interference are invented.

3. The third section selects software for Li-Fi emulation, models of Li-Fi systems are modeled in Simulink. Combined Li-Fi/Wi-Fi networks are considered and LiFi is embedded in the Li-Fi/Wi-Fi hybrid software. A cellular Li-Fi network stand is tested and the network load in the classroom is relieved.

KEYWORDS: KEYWORDS: LI-FI, WI-FI, LED LAMP, SIGNAL, DATA TRANSMISSION, LIGHT, TRANSMISSION, SPACE PROPAGATION, BANDWIDTH, OBSTACLES.

ЗМІСТ

ВСТУП..... **Ошибка! Закладка не определена.**

1 LI-FI ТЕХНОЛОГІЯ – ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ОБЛАСТІ ВИКОРИСТАННЯ..... 12

1.1 Як працює система Li-Fi..... 12

1.2 Сфера застосування..... 15

1.3 Порівняльний огляд Li-Fi з іншими технологіями бездротового доступу WI-FI. Плюси технології Li-Fi...... 20

1.4 Порівняння технологічних підходів..... 22

1.5 Обмеження технології Li-Fi..... 24

2 БУДОВА МЕРЕЖ LI-FI. СПИСОК КОМПОНЕНТІВ, ЇХНІ ЦІЛІ ТА РОЛІ. ПУНКТИ ПІДКЛЮЧЕННЯ..... 27

2.1 Li-Fi мережа..... 27

2.2 Точка доступу Li-Fi (AP)..... 33

2.3 Принцип передавання сигналів у мережі LI-FI. Трансляція сигналу через тракт мережі Li-Fi..... 34

2.4 Вплив оптичних Front-End компонентів та світла у відкритому просторі всередині приміщення на VLC та Li-Fi канали..... 40

2.5 Методи усунення перешкод..... 44

3 НАПРЯМКИ ПРАКТИЧНОГО ВИКОНАННЯ МЕРЕЖІ LI-FI СТВОРЕННЯ ОПТИЧНОЇ ЛОКАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ, СТІЙКОЇ ДО ЗАВАД..... 51

3.1 Програмне забезпечення для емуляції Li-Fi..... 51

3.2 Моделі Li-Fi систем у Simulink..... 54

3.3 Комбіновані мережі Li-Fi і Wi-Fi..... 61

3.4 Вбудовування LiFi в гібридне програмне забезпечення Li-Fi/Wi-Fi. Тестовий стенд мережі..... **Ошибка! Закладка не определена.**

3.5 Ємність стільникових мереж Li-Fi..... 69

3.6 Приклади використання LiFi: полегшення навантаження мережі у класі..... 75

ВИСНОВКИ..... 82

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... 83

ВСТУП

Сучасна епоха — це ера технологій. В даний період, спілкування стало поширеним у всіх сферах існування. Це вплинуло на наш спосіб життя.

Технічний прогрес зробив обмін інформацією більш продуктивним завдяки передачі більш великих та швидких сигналів. Засоби передачі відіграють суттєву роль у ефективній комунікації, тому у технологіях комунікації застосовуються передові кабельні та бездротові рішення.

Необхідність у підвищенні пропускної здатності цих технологій зростає, коли потрібно передавати відео у режимі потоковості на будь-якому пристрої кінцевого користувача. Такі завдання можуть охоплювати спектр від медичної допомоги до забезпечення щоденних послуг. Метою даного дослідження є надати докладний огляд технології Li-Fi, яка може стати майбутньою системою передачі даних завдяки стабільно високій пропускній здатності в приміщенні та кращій зв’язності, при мінімальному або відсутньому впливі на здоров’я через радіаційне випромінювання.

Хоча Wi-Fi не зникне повністю, у майбутньому Li-Fi може стати більш доступною, швидкою, безпечною та ефективною технологією передачі даних. Покращення цієї системи дозволить кожному вуличному ліхтарю працювати як точка доступу Wi-Fi для обміну інформацією. Це може стати технологією, яка дасть можливість користуватися зв’язком під водою, на суші чи в літаку, де радіочастотні перешкоди заважали підключенню. Отже, можна сказати, що незабаром світло буде використовуватись не лише для освітлення будинків, а Li-Fi застосує його для розвитку області передачі даних.

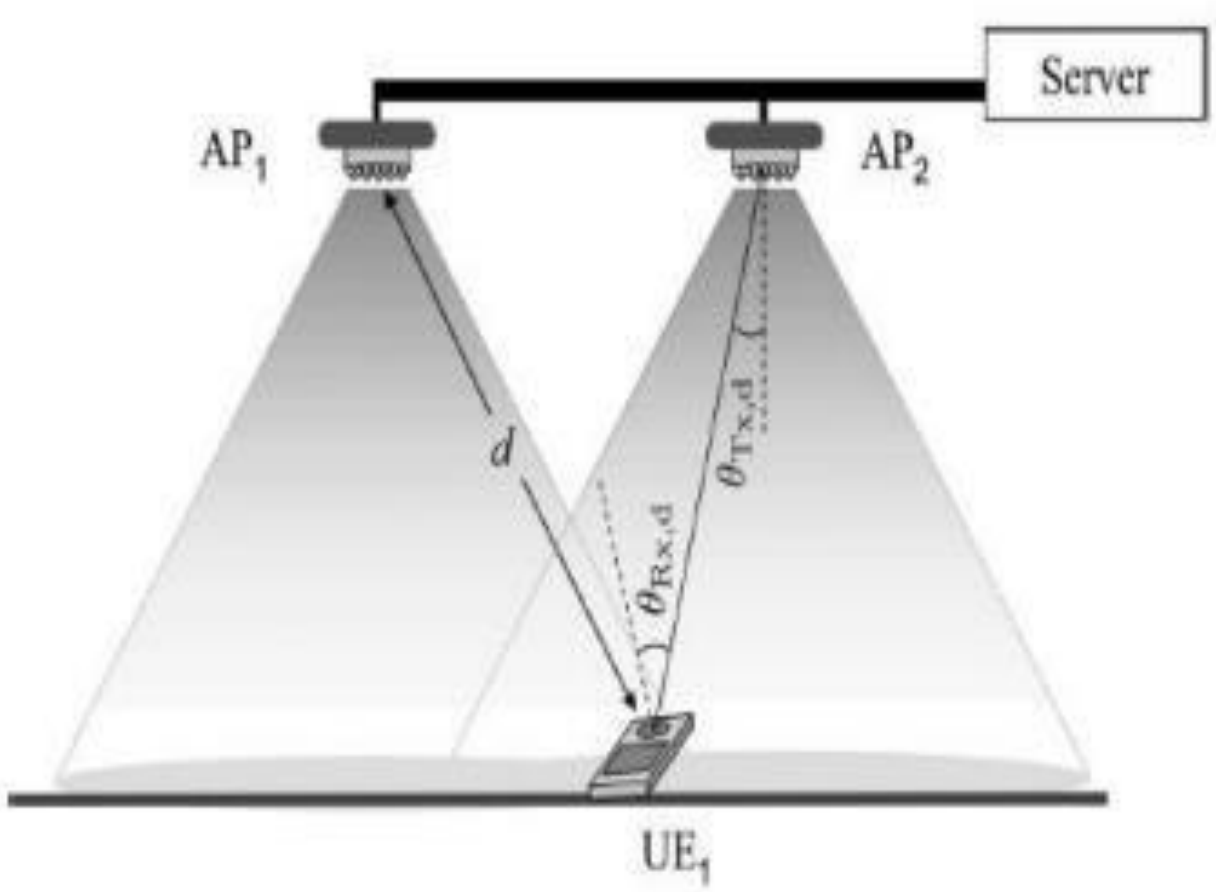


Рис. 1 Зображення завад у оптичній бездротовій мережі

Вище на Рис. 1 зображено сценарій завад в оптичній бездротовій мережі. Тут AP1 — передавач, призначений для UE1, а AP2 слугує перешкодою передавача, який обслуговує інший UE.

Li-Fi — це одна з передових бездротових технологій, що застосовує світлодіоди для передачі інформації. Технологію Li-Fi створила команда дослідників під керівництвом професора Гаральда Хасса та інших у Единбурзькому університеті. Назву Li-Fi вигадав професор Гаральд Хасс, вона розшифровується як Світло-Вірність. Хоча ця технологія не замінить Wi-Fi повністю, її можна розглядати як безкоштовний Wi-Fi. Li-Fi функціонує за принципом перемикання світлодіодів, тобто передає бінарні 1 і 0 шляхом швидкого вмикання-вимикання діодів. Через надзвичайно швидкі зміни стану світла швидкість передачі даних значно зростає. Li-Fi працює у видимій ділянці електромагнітного спектра, що менш шкідливе для живих організмів порівняно з

радіохвилями, і забезпечує величезну пропускну здатність. Таким чином, Li-Fi гарантує безпечніше використання та вирішує питання великих навантажень і високих швидкостей.

1 LI-FI ТЕХНОЛОГІЯ – ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ОБЛАСТІ ВИКОРИСТАННЯ

1.1 Як працює система Li-Fi

Li-Fi (Light Fidelity) – це метод бездротового обміну інформацією, який спирається на інфрачервоне та видиме світло як засіб зв’язку для надшвидкого передавання даних. Ця система підтримує двосторонній зв’язок і, на відміну від радіочастот, придатна для роботи під водою. Li-Fi належить до технологій зв’язку за допомогою видимого світла (VLC – Visible Light Communication). Розроблена професором Хаасом, ця технологія забезпечує повністю бездротове підключення мережі як у портативних, так і в стаціонарних пристроях. Вона також підтримує багатокористувацьке підключення до мережі.

Основою роботи системи є передача даних через оптичний канал — будь-то у вигляді видимого світла або інфрачервоної радіації. Загалом зв’язок організовується між передавачем (джерелом світла або випромінювання) і фотодетектором. Швидкість передачі інформації повністю визначається використаною технологією освітлення та цифровою модуляцією сигналу. Серед технологій освітлення переважають світлодіоди (LED-лампи), RGB-лазери та інфрачервоні діоди (RGB-діоди).

В якості основних LED ламп використовуються сині діоди з фосфорним напиленням, галій-нітридні мікросвітлодіоди та RGB кольорові LED лампи. Під кольоровими лазерами розуміються лазерні випромінювачі, оптоелектронні компоненти, які включають напівпровідникові лазерні діоди і лазерні модулі з вбудованими схемами управління.

Щодо інфрачервоного випромінювання, основний принцип функціонування залишається майже незмінним. У нас і надалі є передавач, приймач і система кодування даних. Традиційним способом обміну даними вважається

використання інфрачервоного порту — набору стандартів, який визначає фізичні та логічні протоколи передачі даних за допомогою інфрачервоного випромінювання (IrDA). Проте це не єдина можливість. Загальновідомо, що управління телевізором за допомогою пульта здійснюється інфрачервоним сигналом. Такий метод передачі даних є зручним для дистанційного управління пристроєм у просторі, зокрема у випадку керування НПА. Втім, цей підхід виявиться неефективним на великих відстанях через фізичні й оптичні властивості води і самого інфрачервоного випромінювання.

Блакитні LED-лампи включають яскравий синій світлодіод з фосфорною оболонкою, що змінює синє випромінювання на жовте. При суміщенні синього і жовтого випромінювання діод світиться білим. Сьогодні це найрентабельніший метод отримання білого світла, проте люмінофорний матеріал, що змінює колір, зменшує частотну реакцію, тому високі частоти значно ослаблюються. Тому діапазон пропускання таких діодів обмежений приблизно 2 МГц. Попри це, навіть подібна методика фільтрації світла дозволяє досягти швидкості передачі даних до 1 Гбіт/с. Сучасні RGB-світлодіоди (червоний, зелений, синій) дозволяють передавати дані зі швидкістю до 5 Гбіт/с, адже біле світло утворюється шляхом змішування первинних кольорів, а не хімічного перетворення. Продемонстровано передачу даних зі швидкістю 8 Гбіт/с за допомогою одного мікросвітлодіоду, і доведено, що 100 Гбіт/с можна досягти з використанням лазерного джерела.

З огляду на особливості цієї технології, існує чимало неправильних уявлень про Li-Fi системи. Перш за все, у більшості випадків виникає питання про ефективність цієї технології за сонячного освітлення.

Сонячне випромінювання виступає як незмінний інтерференційний сигнал поза смугою пропускання, який застосовується для модуляції інформації. Технологія Li-Fi функціонує на частотах, які, як правило, вище 1 МГц. Отже, стабільне сонячне випромінювання можна усунути за допомогою електронних фільтрів. Ще один наслідок сонячного випромінювання – зростання світлового шуму, який важко знизити оптичними фільтрами. У дослідженні, присвяченому

впливу дробового шуму, виявлено, що швидкість передачі даних падає на 1,5 % та 4,5 % відповідно для детекторів площадкою 0,19 мм² і 2 мм². Перенасичення можна запобігти, застосовуючи алгоритми автоматичного регулювання підсилення спільно з оптичними фільтрами. В реальності сонячне випромінювання дуже корисне, бо воно дає можливість приймачам Li-Fi функціонувати від сонячних панелей, де фотоелемент слугує як приймач даних і одночасно забезпечує енергією.

По-друге, занепокоєння викликає те, що світловий сигнал, начебто, може бути затемнений. Однак це теж не так. Світлові сигнали не можуть бути затемнені: існують удосконалені методи модуляції, такі як eU-OFDM, які дозволяють працювати Li-Fi близько до включеної напруги (ToV) світлодіода, що означає, що лампи можуть функціонувати при дуже низькому світловому виході, зберігаючи при цьому високі швидкості передачі даних.

Третім питанням є занепокоєння щодо можливого зниження ефективності під час мерехтіння світлового потоку. Проте найнижча частота модуляції світлових сигналів становить приблизно 1 МГц. Оновлення екрану комп'ютера відбувається з частотою близько 100 Гц. Це свідчить про те, що швидкість мерехтіння Li-Fi лампи в 10000 разів вища за частоту оновлення комп'ютерного екрану. Отже, мерехтіння не має впливу на роботу сигналу.

Четвертим занепокоєнням є припущення, що канал комунікації може бути лише однонаправленим, так що в один момент працює лише вхідний або вихідний сигнал, проте це не так, оскільки два одночасних світлових потоки не перетинаються і напрямок потоку даних залишиться незмінним. Більше того, можна застосовувати комбіновану схему, коли в нисхідному каналі використовується світлодіодне освітлення, а в висхідному – інфрачервоне випромінювання.

Цей тип зв’язку значно розширює потенціал передачі інформації. Сьогодні активно вивчається можливість використання технології Li-Fi у підводних галузях

людської діяльності. На превеликий жаль, більшість експериментів залишаються закритими, і майже немає доступу до їхніх результатів. На підставі даних відкритих джерел було зроблено висновок, що ця технологія найефективніше могла б впроваджуватись в океанології при розробці автономних систем, зокрема автономних підводних апаратів для океанологічних і океанографічних досліджень.

1.2 Сфера застосування

Li-Fi — це технологія, яка у більшості випадків може замінити Wi-Fi та інші радіочастотні способи передачі даних. У певних випадках використання Li-Fi стане безпечнішою альтернативою, а в інших — єдиним високошвидкісним способом зв’язку. Отже, Li-Fi можна застосовувати у таких ситуаціях і середовищах:

- В лікарні:

Оскільки Li-Fi не створює завад для пристроїв, що працюють у радіочастотному діапазоні, його можна безпечно експлуатувати в медичних закладах. Наприклад, у коридорах, зонах очікування, пацієнтських палатах та операційних, технологія Li-Fi дозволить побудувати комунікаційну мережу, яка усуне електромагнітні перешкоди, спричинені смартфонами при використанні Wi-Fi у лікарнях. Li-Fi також може служити для моніторингу в режимі реального часу переміщення пацієнтів і життєвих показників без необхідності підключення кабелів.

- У аеропортах:

Використання системи в аеропортах теж виявляється надзвичайно успішним. За тією ж причиною, що й у лікарнях, система не перешкоджає роботі радіочастотних приладів, отже не буде заважати роботі головних засобів зв’язку з

літаками та метеорологічними станціями, що дозволяє аеропорту працювати без перебоїв.

- На борту літаків:

Wi-Fi у літаках використовується надзвичайно рідко, з різних причин, оскільки електромагнітні хвилі роутерів заважають роботі обладнання та зв’язку з диспетчерами. Застосування Li-FI у цьому випадку буде максимально ефективним.

- У офісних приміщеннях і навчальних закладах:

Li-Fi система забезпечує найвищий рівень захищеного підключення з огляду на інформаційну безпеку порівняно з усіма іншими доступними сьогодні технологіями. Окрім освітлення, вона може передавати інтернет-з’єднання, яке не проникає через стіни, отже й підключення до локальної мережі стає надзвичайно безпечним.

- У проектах наукових досліджень:

Застосування телекерованих пристроїв для отримання даних у режимі реального часу наразі є найбільш часто використовуваним методом. Однак системи з таким типом зв’язку не є мобільними і не можуть застосовуватися у важкодоступних місцях. Альтернативою їм є автономні апарати, що працюють за заздалегідь визначеною програмою. Але такі апарати в більшості випадків не використовуються як мобільні пристрої – їх основна робота виконується в стаціонарному комплексі, а зв’язок з дослідником вони запроваджують за допомогою штучних супутників Землі. Цей підхід спеціальних океанологічних досліджень широко застосовується у всьому Світовому океані, а ключовим елементом становлять буї «АРГО» – мережа плаваючих-пірнаючих буїв для здійснення океанографічних досліджень верхнього шару океану в режимі реального часу. Система функціонує разом із супутниковими спостереженнями, формуючи оперативну океанологічну мережу, подібну до глобальної системи

моніторингу атмосфери. Буй «АРГО», випущений на поверхню, спускається до глибини 2000 метрів і дрейфує разом з течією на цій глибині протягом 10 днів, після чого піднімається, вимірюючи профіль температури та солоності. На поверхні буй передає радіосигналом дані вимірювань і своє місцезнаходження до орбітального супутника, а потім знову занурюється для продовження циклу. Буї сконструйовані на виконання 150 подібних циклів. Термін їх експлуатації оцінюється в 4-5 років. У випадку втрати буїв дослідники не зазнають значних фінансових збитків – виготовлення системи є відносно недорогим. Головна мета розробки такого пристрою – зменшення або усунення потреби у телекерованих системах, а також вирішення питання отримання даних з апаратів, втрата яких може призвести до суттєвих наукових, а не лише фінансових, втрат. Такий спосіб збору інформації допоможе в умовах, коли інші методи передачі недоступні з різних причин. Використання нижченаведених технологій може значно підвищити якість проведених досліджень, підвищивши технічні характеристики самих автономних некерованих підводних апаратів. Якщо врахувати можливість виключення з конструкції кабелю для передачі даних та керування пристроєм, застосування цього підходу суттєво покращить маневреність апарату, роблячи його більш мобільним.

Як зазначалося вище, головним напрямком застосування є океанологічні та океанографічні дослідницькі комплекси, що містять автономні безпілотні підводні пристрої, використання яких пов’язане з дослідженням важкодоступних територій, зокрема підлідних ділянок, або вивченням областей зі складним рельєфом, де використання телекеруємих апаратів було б ускладненим.

Перевагами даної системи можна назвати вже згадане підвищення мобільності автономних апаратів. Крім того, до переліку переваг слід включити здатність отримувати інформацію, не піднімаючи апарат на поверхню, що дозволяє у разі потреби отримати дані з пристрою, доступ до якого ускладнений з різних причин, наприклад, через пошкодження його рухового механізму або коли він опинився в ділянці, звідки його не можна витягнути без допомоги водолазів.

Австралійська компанія nextLiFi розробляє власну підводну комунікаційну систему, яка буде застосовуватись для зв’язку між аквалангістами. (рис. 1.1).

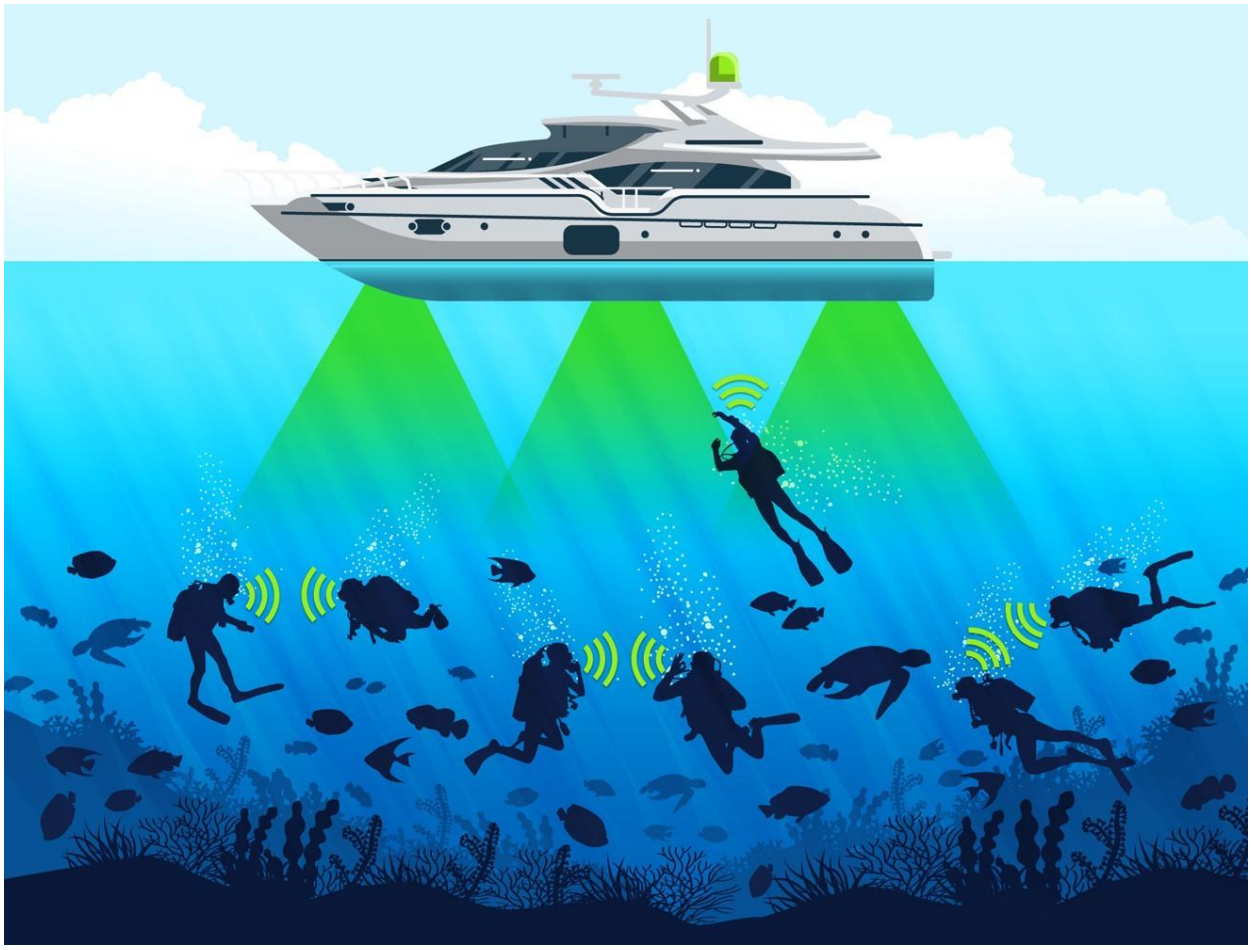


Рис. 1.1 Візуальна презентація проекту nextLiFi.

Аналогічно, така система зв’язку через оптичний канал може бути використана:

- На субмаринах – інформація може передаватися між двома субмаринами, а перешкоду на маршруті можна виявити;
- Для захисту приватних і комерційних рибальських суден, окрім радіозв’язку, у випадку коли таке судно виявляє якусь проблему в морі, воно може передати повідомлення іншому кораблю або центральному органу;
- Рятувальні дії на воді – коли спасальна операція проводиться в морі, дані можуть передаватися між суднами;

- Під час патрулювання — коли в морі виявляється невідомий корабель, патрульне судно також передає дані центральному органу;
- Для віддаленого бездротового управління підводними пристроями;
- Як спосіб комунікації між підводними апаратами та байковими станціями.

У публікації фірми RDL Technologies Pvt Ltd розглядається технологія, яка функціонує разом із радіохвильовим зв’язком, взаємно підсилюючи та розширюючи їхні можливості. Запропонована ними система спирається на припущення, що акустичні засоби комунікації мають недоліки, попри те, що вони залишаються одним із головних методів підводного зв’язку. Акустичні мережі можуть передавати сигнали на великі відстані, проте їх обмежують низька швидкість передачі інформації та велика затримка (викликана швидкістю звуку в воді). Вони розробляють оптичний канал зв’язку, який підтримує вже існуючі акустичні мережі та відкриває нові можливості для автономних підводних пристроїв, усуваючи потребу у кабельному підключенні для передачі даних. Цей підхід спростить роботу з підводними дронами і, ймовірно, знизить витрати, завдяки застосуванню легких та менш оснащених надводних платформ. Крім того, підвищиться швидкість реагування на інциденти, а обслуговування і ремонт розвиваютьсяї інфраструктури океанічних обсерваторій стане економічно вигіднішим. Такий канал зв’язку також забезпечить передачу великих наборів даних з постійних сенсорів за допомогою АНПА як методу збору, потокове відео у реальному часі з мобільних транспортних засобів для огляду, ідентифікації та суміжних дій. Крім того, можна розгорнути мережу підводних сенсорів (на діапазоні глибин, придатному для їх функціонування), що слугуватиме заміною підводних кабелів. За словами компанії, безпілотний засіб, що працює від будь-яких доступних акумуляторів і підключений до такого підводного вузла, можна буде управляти через цей канал зв’язку. Поєднання акустичного та оптичного каналів стане цінним ресурсом як для наукових досліджень, так і для комерційного використання.

Тим самим способом можна створити мережу буйкових станцій, між якими будуть переміщатися автономні або дистанційно керовані безпілотники – суть такої системи полягає в тому, що АНПА, рухаючись за заздалегідь заданою траєкторією або під керуванням оператора, здійснюватиме вимірювання та передаватиме їх за допомогою Li-Fi до буйкових станцій, які, у свою чергу, ретранслюють дані через супутниковий або радіоканал. При заміні літій-іонних елементів на графенові можна позбутись буїв у такій конфігурації – підводний апарат зможе зберігати більше енергії і самостійно передавати інформацію. Графен – сучасний матеріал, його унікальні електронні властивості та можливість хімічної модифікації роблять його перспективним для багатьох напрямків мікроелектроніки, зокрема як елемент живлення. Питома ємність графенових акумуляторів у п’ять разів перевищує показник літій-іонних батарей. Крім того, варто зазначити, що графен-полімерні батареї безпечніші і не схильні до займання чи вибуху, на відміну від літій-іонних. Також важливо підкреслити, що графен-полімерні акумулятори здатні подовжити час роботи пристрою принаймні в три рази.

1.3 Порівняльний огляд Li-Fi з іншими технологіями бездротового доступу WI-FI. Плюси технології Li-Fi.

Визнаючи технологічний вибір, ми враховуємо переваги даної технології над іншими. Працюючи з Li-Fi, ми отримуємо безліч удосконалених, вражаючих і корисних ідей у нашій свідомості. Нижче наведено кілька цікавих аспектів, які можна виділити, оцінюючи переваги Li-Fi:

Доступність:

Li-Fi використовує світлодіоди як носій для передачі даних, що дозволяє вам користуватися простими лампочками, які можуть освітлювати наші приміщення, а також надає можливість надсилати й отримувати інформацію. Це

дає вам свободу передачі, просто перебуваючи під будь-яким світлом. Оскільки підключення здійснюється у присутності світла, вам більше не потрібно перебувати в регіоні з підтримкою Wi-Fi. Ця проста доступність точок доступу зменшить вартість користування Інтернетом, і навіть можна уявити світ з безкоштовними інтернет-послугами.

Об'єм:

Діапазон, який можна використовувати для зв’язку, здатен підвищити як швидкість, так і кількість користувачів у комунікаційній системі. Доступний радіочастотний діапазон 10 ГГц бездротового зв’язку можна замінити спектром видимого світла, у 10000 разів ширшим, який забезпечується будь-яким простим світлодіодним джерелом. Це може бути вуличне освітлення або настільна світлодіодна лампа.

Менше труднощів:

Ви відчуватимете менше перешкод під час передачі світла, бо воно легко проникає. Це може бути океан або будь-яка густо населена ділянка, схожа на ліси, де майже неможливо облаштувати Wi-Fi-мережу.

Захист:

Коли ви передаєте дані за допомогою Li-Fi, безпеку можна забезпечити, просто блокуючи світло, що спрощує впровадження захисту і робить спосіб передачі даних безпечнішим.

Загроза здоров'ю:

Хоча наукових доказів немає, вважається, що радіочастотні сигнали є канцерогенними та можуть загрожувати здоров'ю людини, тоді як видиме світло безпечне для вашого існування.

Наявна інфраструктура:

Для Li-Fi можна застосовувати вже наявні світлодіодні лампи як точки доступу, що дозволяє скоротити витрати на будівництво інфраструктури.

Енергозбереження і ефективність:

У сучасних бездротових мережах значна частина енергії споживається інфраструктурою та її обслуговуванням, а не передачею даних; наприклад, багато енергії витрачається на охолодження базових станцій, тоді як достатньо 60-ватної простої світлодіодної лампи, яка може виконувати роль точки доступу.

1.4 Порівняння технологічних підходів

У таблиці 1.1 представлено порівняння швидкості і густини даних різних бездротових технологій.

Таблиця 1.1

Technology	Speed	Data Density
Wi-Fi	150 Mbps	*
Bluetooth	3 Mbps	*
IrDA	4 Mbps	***
Li-Fi	>1Gbps	***

Порівняння різних технологій за швидкістю та інтенсивністю даних

У таблиці 1.2 наведено порівняння Li-Fi та Wi-Fi технологій за різними аспектами з метою оцінки продуктивності пристроїв кінцевих користувачів у контексті бездротового зв’язку.

Таблиця 1.2

Порівняльна характеристика Li-Fi та Wi-Fi

Критерій	Li-Fi	Wi-Fi
Безпека	Більше захищений, не може потрапити під кібератаку	Менш захищений, можна зламати без зусиль
Середовище розповсюдження	Світло	Радіочастоти
Діапазон розповсюдження	Відстань обмежена 10 метрами	Великий діапазон, до 100 метрів
Вартість	Менше, бо використовується світло	Більше, використовується діапазон радіохвиль
Топологія	Точка-точка	Одна точка — кілька точок
Щільність даних	Щільність даних надзвичайно підвищена	Щільність даних відносно вкрай мала
Передача даних	Трансфер даних здійснюється безпосередньо використовуючи біти	Трансфер інформації виконується за засобом випромінювання радіохвиль
Перешкода втручання	Надзвичайно висока	Дуже невелика, або цілком відсутня
Доступність	Практично доступний скрізь, там де є освітлення	Рівень доступності низький

Наступна таблиця 1.3 – порівняльний аналіз Li-Fi і Bluetooth, демонструє головні розбіжності цих технологій.

Таблиця 1.3

Порівняння Li-Fi і Bluetooth

Критерій	Li-Fi	Bluetooth
Періодичність	Світлу не необхідна частота	2,4 GHz
Діапазон	Працює на основі LED	10 метрів

Легкість доступу	Там, де є світло	Wireless Personal Area Network
Транслювання даних	більше 1Гбіт/с	800 кілобіт/с

Продовження таблиці 1.3

Порівняння Li-Fi і Bluetooth

Критерій	Li-Fi	Bluetooth
Вживання енергії	Середня	Низька
Вартість	Низька	Низька
Захист	Високий рівень безпеки	Низька захищеність
Використання	Будь-де, де є світло	Дозволено застосовувати на місці будь-якого іншого Bluetooth
Робочий діапазон	Функціонує у зоні світла	Працює у діапазоні 2,5 МГц
Розвиток	Робота над проектом розпочалася в 2011 році	Робота розпочалася в 1998 році

1.5 Обмеження технології Li-Fi

Головна вада Li-Fi полягає у тому, що світло не проникає через об’єкти; тому, якщо між передавачем і приймачем є який-небудь предмет чи стіна, сигнал буде перерваний. Вплив зовнішніх джерел освітлення, таких як сонячне світло, лампи та непрозорі матеріали, призведе до порушень у проходженні світла. Wi-Fi і радіочастотний зв’язок залишаться необхідними у віддалених районах, де дерева й стіни створюють перешкоди. Система VLC передбачає значні інвестиції на старті, однак після впровадження у великому масштабі її загальна вартість може знизитися завдяки нижчим експлуатаційним витратам, зокрема меншій оплаті за електроенергію, зменшеним витратам на технічне обслуговування і меншій потребі в оперативному персоналі. Лінія зору є обов’язковою для системи VLC,

бо світло не проходить через тверді поверхні, отже передавач і приймач мають «бачити» один одного, щоб налагодити зв’язок між ними.

- Присутність освітлення потрібна для ініціації з’єднання.
- Збудувати повністю нову інфраструктуру для Li-Fi надзвичайно складно.

Враховуючи актуальні тренди в технологіях, зростаючу залежність людей від підключення гаджетів та вимоги до надшвидкої передачі даних, можна стверджувати, що Li-Fi стане провідною технологією найближчого майбутнього, слугуватиме головною артерією інфраструктури розумних міст і забезпечуватиме інтелектуальні послуги кінцевим споживачам забезпечуючи надвисоку швидкість і без шкоди для здоров'я користувачів. Виробники планують виготовляти всі майбутні пристрої з Li-Fi інтерфейсами для підключення до Li-Fi мережі, так само як сьогодні майже кожен електронний пристрій оснащений Bluetooth і Wi-Fi.

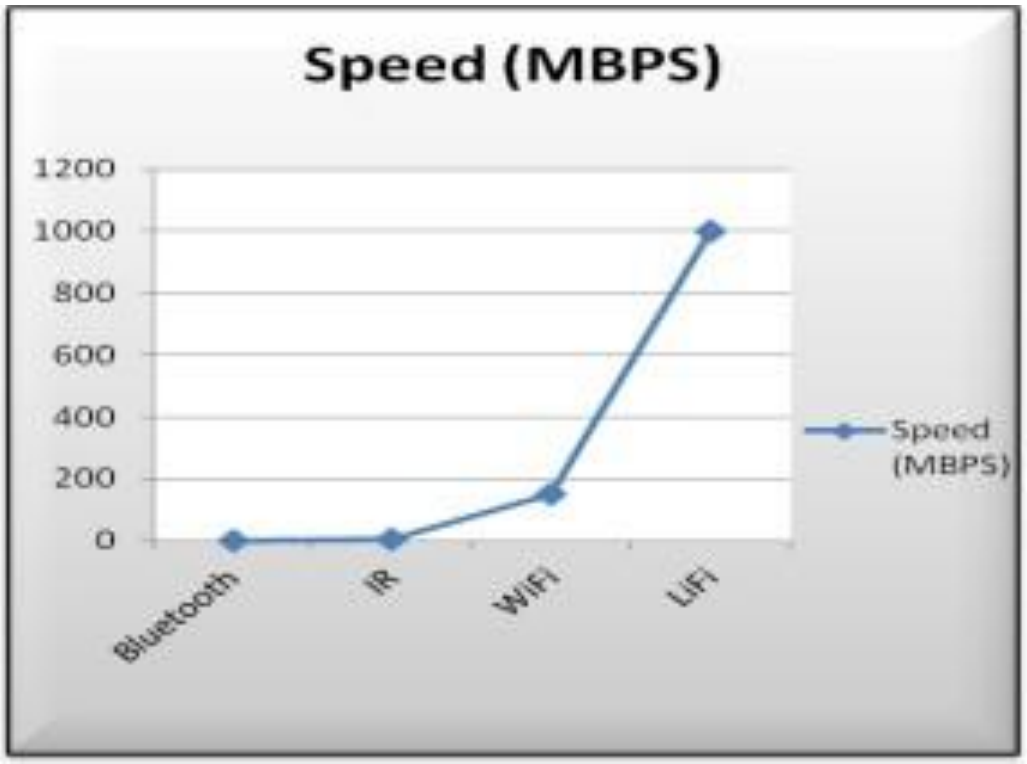


Рис. 1.2 Діаграма швидкості і технологій

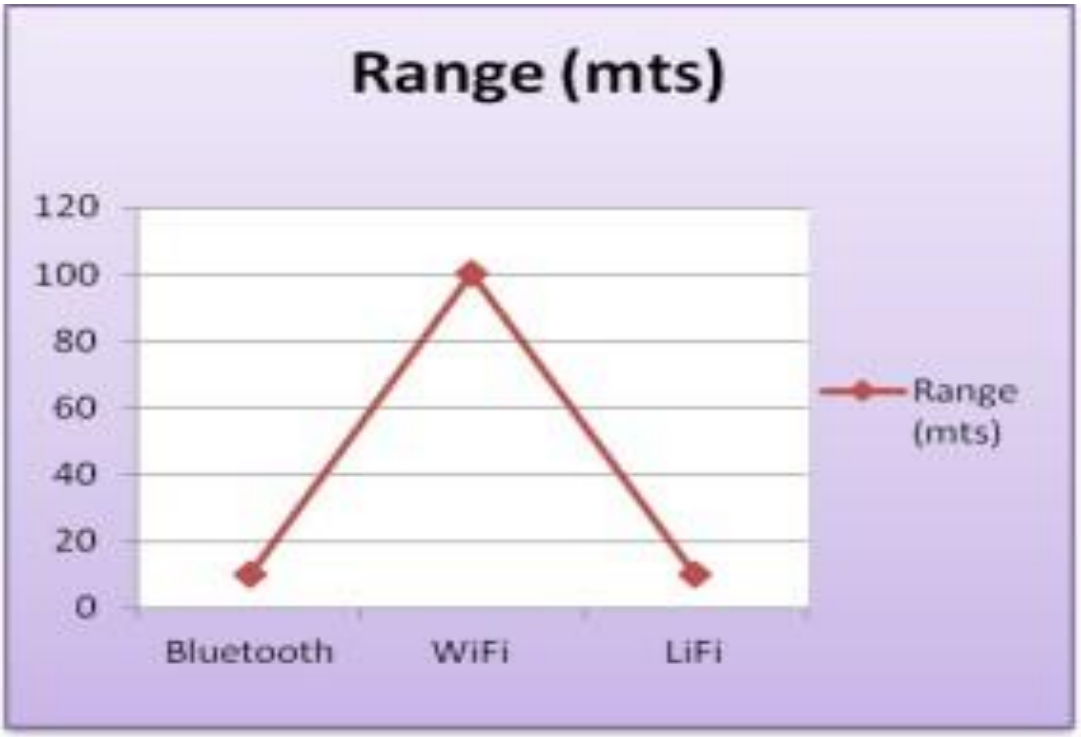


Рис. 1.3 Діаграма залежності між дальністю та технологією.

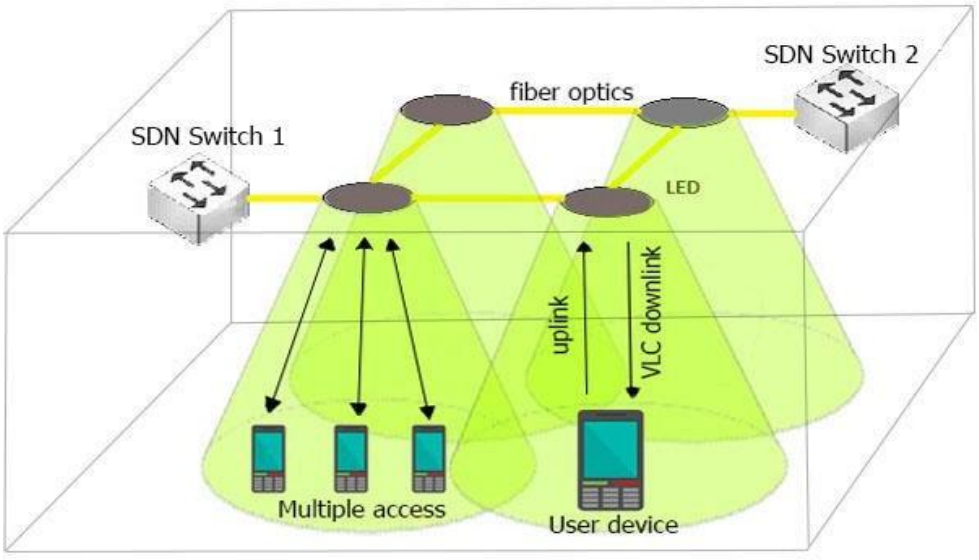
Як зазначалося, у технології Li-Fi існують певні плюси. Серед них: легкодоступність, пропускна здатність, безпека, енергоощадність, наявна інфраструктура. Недоліки включають легке розривання зв’язку через непрозорі предмети та подібні перешкоди; потребу в застосуванні Wi-Fi, коли стіни блокують передачу даних; перешкоди від інших джерел освітлення тощо. У порівнянні з іншими технологіями, вона забезпечує значно вищу швидкість передачі (до 1 Гбіт/с), низькі експлуатаційні витрати, проте початкові інвестиції досить високі. Вона працює не у частотному спектрі, як інші рішення, а в діапазоні видимого світла.

2 БУДОВА МЕРЕЖ LI-FI. СПИСОК КОМПОНЕНТІВ, ЇХНІ ЦІЛІ ТА РОЛІ. ПУНКТИ ПІДКЛЮЧЕННЯ

2.1 Li-Fi мережа

Li-Fi спирається на концепцію VLC (комунікації видимого світла). Багато досліджень VLC зосереджені на зв’язку між точками. Крім того, більшість досліджень VLC передбачають використання спектру видимого світла як для висхідного, так і для низхідного каналу. Натомість Li-Fi охоплює ширші мережеві системи, включаючи багатокористувацькі, двосторонні, багатоадресні чи трансляційні зв’язки. Хоча ці мережі застосовують спектр видимого світла для низхідного каналу, Li-Fi використовує інфрачервоний спектр для висхідного каналу. Мережі Li-Fi спочатку розроблялися для безперешкодної взаємодії з радіочастотними бездротовими мережами, наприклад Wi-Fi, з метою ефективного балансування навантаження та підвищення пропускної здатності в гетерогенних мережах.

На схематичному зображенні 2.1 показаний варіант створення кампусної



мережі LI-FI

Рис. 2.1 Версія кампусної мережі LI-FI

Li-Fi мережа містить декілька точок доступу, які забезпечують підключення до висхідних, низхідних і зворотних каналів зв’язку. Крім того, система виконує функції передачі й прийому даних, підтримує мобільність користувачів та дозволяє гнучко користуватись ресурсами. У мережі передбачені такі компоненти:

LED лампа, яка забезпечує бездротову передачу даних за допомогою VLC.

Fiber optics – лінії, які з’єднують комутатори, LED лампи, та інше.

SDN Switch, що організує створення каналу передачі між точками доступу.

User device - пристрій користувача, що підключається до точки доступу і отримує можливість передавати дані.

Uplink. Вихідна лінія зв’язку для надсилання даних з телефона до мережі, підтверджень передачі, інформації про стан каналу (CSI).

VLC downlink. Нижчий канал зв’язку для отримання даних з мережі.

Reverse transferring – взаємозв’язок між точками доступу та мережевим комутатором.

Точки доступу (AP) створюють надмалі стільникові мережі, які забезпечують бездротовий зв’язок з високою інтенсивністю даних для мобільних користувачів, які обслуговуються одночасно. Застосовуються терміни «мобільні користувачі» та «користувацьке обладнання» (UE), які є синонімами. Li-Fi мережа має підтримувати передачу даних, коли користувачі переміщуються між різними ділянками світлового покриття.

У мережі Li-Fi створюється двостороннє сполучення між AP і UE, завдяки чому AP може обслуговувати одночасно кількох користувачів. Окрім цього, зворотні канали між точками доступу та мережевим шлюзом відіграють ключову роль у координації дій точок доступу і у підключенні до зовнішньої мережі. Такі зворотні зв’язки можуть бути здійснені за допомогою оптичного волокна, мережі Power-over-Ethernet або живильної лінії зв’язку. Нисхідний шлях Li-Fi використовує існуючі системи світлодіодного освітлення. Це пояснюється

зростаючою популярністю LED-освітлення і тим, що вже доведено можливість передачі кількох гігабіт/сек через діоди. У мережі Li-Fi підключення до висхідного каналу необхідне для відправки підтверджень передачі, даних про стан каналу (CSI), передачі файлів, а також для організації голосових і відео-дзвінків.

Принцип роботи мережі такий: користувач підключається до конкретної LiFi-точки так само, як до WiFi-точки доступу. Це дозволяє йому отримати доступ до мережі. Він може скачати файл по низхідному каналу або, навпаки, передати дані по висхідному каналу. Під час переміщення користувач переходить на іншу точку доступу. Перемикання виконується автоматично без переривання зв’язку. Зв’язок між елементами мережі здійснюється оптоволоконним кабелем або через мережу живлення. Для з’єднання точок доступу, розташованих у різних кімнатах, застосовуються комутатори SDN Switch.

Оскільки застосування видимого світла в підйомному сегменті зв’язку може відволікати мобільного користувача, використання інфрачервоного спектра вважається найоптимальнішим для цього виду передачі. Це ще одна перевага, бо підйомна і спускна лінії зв'язку не заважають один одному, і одночасне спілкування також можливе.

Хоча вже проведено кілька первинних досліджень інфрачервоної висхідної лінії зв'язку, подальші всебічні вивчення у цьому напрямку залишаються необхідними. Додатково, у сфері радіочастотних комунікацій можна розглядати такі рішення, як Bluetooth, ZigBee чи Wi-Fi. Вони широко доступні, проте можуть створювати інтерференцію для вже існуючих радіочастотних бездротових мереж. Проте, за даними, гібридна система RF/VLC, що використовує VLC лише для нисхідного каналу, може значно зменшити навантаження на дані і при цьому забезпечує низьку затримку.

Робота мережі є досить складною. Користувачі переміщуються всередині простору, і в результаті змінюються кути передачі та приймання сигналів, відстані між компонентами системи, а також ділянки, які обслуговують LED. При цьому треба гарантувати дотримання вимог до інтенсивності освітлення у кожній точці

простору. Тому для вирішення зазначених задач рекомендується застосовувати контролер SDN.

Консорціум ONF, в теперішній час, розробляє платформи з відкритим вихідним кодом. Отже в якості централізованого пристрою управління мережею LiFi можна рекомендувати контролер SDN. За основу можливо взяти контролер, розроблений для управління ЦОД. Тоді структура мережі LI-FI матиме вигляд, представлений на рис.2.2.

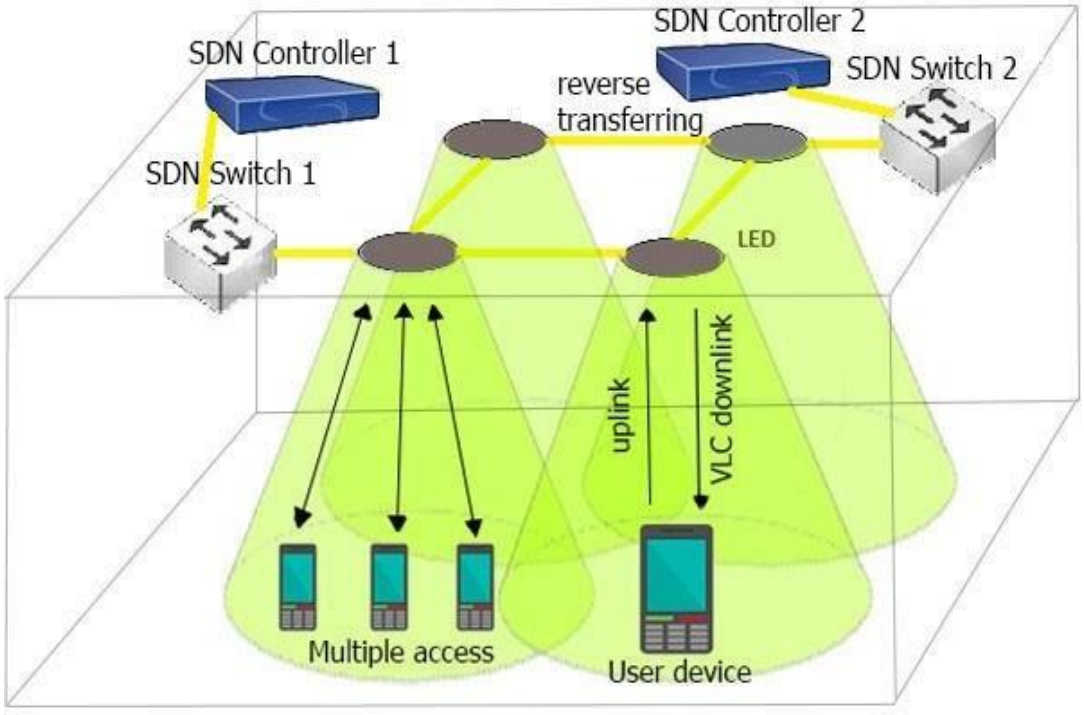


Рис. 2.2 Мережа LIFI на кампусі з використанням контролерів SDN

Остаточна мережа LiFi включає багатокористувацький доступ і координацію перешкод спільного каналу (CCI). Виділяються два види передачі: вертикальна і горизонтальна. Горизонтальна передача стосується переходу точки доступу яка обслуговується в рамках однієї й тієї ж технології радіодоступу (RAT). Вертикальна передача передбачає зміну обслуговуючої AP, що перебуває в іншій RAT. Наприклад, мобільних абонентів можуть перенаправити з Li-Fi-точки доступу на Wi-Fi-точку, якщо жодна Li-Fi-точка не забезпечує стабільне з’єднання або швидкість користувача надто велика, що робить

тривалість перебування в клітинці занадто короткою для формування якісного зв’язку. Якщо користувач уповільнює рух і потрапляє під дію трохи завантаженої Li-Fi-точки доступу, оптимальним може бути перемикання її на менш навантажену Wi-Fi-мережу задля підвищення ефективності (наприклад, зменшення кількості колізій пакетів). Завдяки меншому розміру зон обслуговування та низьким проблемам блокування в мережах Li-Fi, швидкість передачі значно посилюється. Тому необхідно впровадити схеми м’якого чи пропускного передавання. Пропускна передача належить до методів, які забезпечують обмін між сусідніми точками доступу, виключаючи вузли, що генерують зайві передавання. Щоб підвищити надійність Li-Fi, пропонуються схеми швидкого перемикання каналів, засновані на попередньому скануванні та прогнозуванні рівня сигналу (RSS). Через зростаючі вимоги до пропускної здатності бездротових мереж, повторне використання каналів у щільних просторах стає неминучим. Бездротові зв’язки, які користуються одним і тим же ресурсом, будуть створювати взаємні перешкоди. По-перше, користувачі в клітинках поряд, можуть спільно використовувати один канал даних. У такій ситуації з’являються інтерференції, відомі як CCI. Іноді той самий канал повторно використовується користувачами однієї клітинки. Перешкоди між користувачами в межах однієї клітини називаються внутрішньоклітинною інтерференцією. Зазвичай внутрішньоклітинні інтерференції усуваються за допомогою техніки ортогонального мультиплексування. CCI зменшується за рахунок відповідних методів координації інтерференції.

Нещодавно запропонували використати клітинно-орієнтовану архітектуру для створення багаторівневої різнорідної мережі, що підтримує надзвичайно щільні клітини. Клітинно-орієнтований підхід динамічно коригує топологію мережі згідно з попитом користувачів. Наприклад, якщо в зоні покриття точки доступу Li-Fi відсутні користувачі, ця точка може вимкнути зв’язок і працювати лише як звичайна лампа. Це дозволило б уникнути впливу на сусідні клітини. Мотивація клітинно-центричного підходу в Li-Fi випливає з радикально малих

розмірів комірок, що варіюються від 1 до 2 м у радіусі. Тому навантаження на точку доступу суттєво коливається в цих системах. На підставі орієнтованої на користувача архітектури початкові комірки з центром у точках доступу перетворюються у віртуальні комірки, центр яких розташований у головних кластерах користувачів. Це можна реалізувати шляхом дезагрегації клітин і динамічного злиття. Щоб впровадити цю користувацько-орієнтовану архітектуру, необхідно знати місце розташування користувача. Крім поліпшення комунікаційних властивостей, забезпечується підвищена енергоефективність.

Для подальшого збільшення швидкості передачі Li-Fi в низхідному каналі деякі наукові колективи розглядали оптичні бездротові рішення, які застосовують однонапрямкову когерентну передачу сигналу разом із дуже обмеженим рульовим переміщенням. Дослідження повідомляє про потенційну пропускну здатність понад 400 Гбіт/с. В іншому дослідженні використовується лазерний випромінювач з оптичним дифузором, що забезпечує одночасне освітлення і бездротовий зв’язок. Ще в одному варіанті, централізовано оброблені когерентні оптичні сигнали передаються оптичним волокном до системи керування променем, яка додатково спрямовує когерентний потік через нерухомі класифікаційні структури до кінцевого користувача в бездротовій мережі. Висхідний канал (uplink) реалізується за допомогою радіочастотної системи. Декілька дослідницьких колективів вивчали такі альтернативні архітектури з використанням колімованого рульового керування для забезпечення покриття, відмінного від Li-Fi, шляхом застосування розсіяної хвилі. Методи рульового управління справді можуть підвищити ефективність повторного використання простору в мережах Li-Fi. Проте це вимагає додаткових зусиль для подолання практичних обмежень. Наприклад, відстеження користувачів з низькою складністю та високою надійністю, створює труднощі, особливо при перериванні лінії прямої видимості (LoS). Крім того, для оптичних волоконних з’єднань потрібні швидкі зворотні з’єднання, що підвищує складність монтажу та її

вартість. Також рівномірне освітлення не є добре підтримуваним цими системними конструкціями.

2.2 Точка доступу Li-Fi (AP)

Для створення Li-Fi потрібні такі пристрої, як світлодіодна лампа, драйвер лампи, та бездротові пристрої (ПК, мобільні телефони, ноутбуки та інші). Ці бездротові пристрої будуть оброблятись фотодетектором, який приймає та підсилює дані. Драйвер лампи підключається безпосередньо до інтернету та світлодіодної лампи завдяки оптичному волокну. Будь-яка світлодіодна лампа може функціонувати як Li-Fi, якщо в ній встановлений мікрочіп. Світлодіодна лампа на основі Li-Fi складається з чотирьох компонентів, таких, як:

- PA (силовий підсилювач)
- PCB (друкована плата)
- Лампа
- Корпус

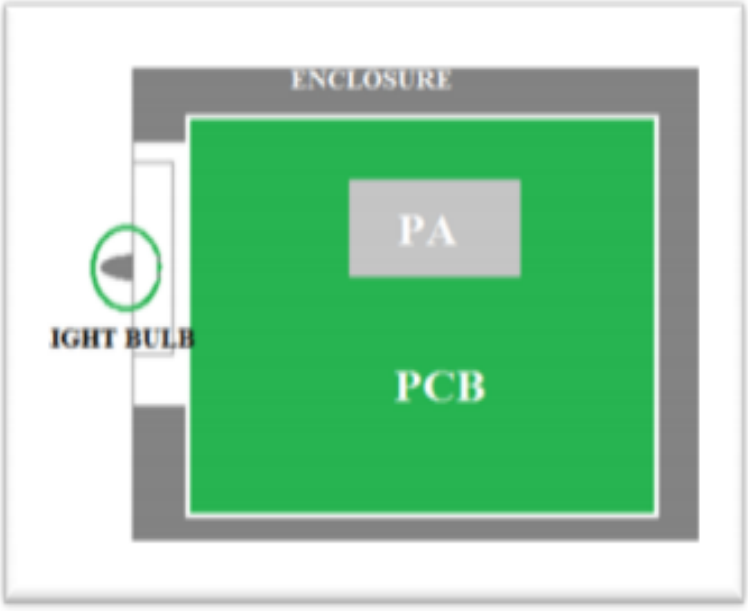


Рис. 2.3 Основна схема Li-Fi

Світлодіодна лампа Li-Fi включає алюмінієвий корпус, в якому розміщені всі складові. Лампа обладнана оболонкою, що слугує джерелом світла (середовищем для передачі даних). Друкована плата здійснює контроль над лампою та керування електричними сигналами. РЧ-підсилювач потужності (PA) забезпечує створення радіочастот, які керуються електричним полем навколо лампи.

Змодельована мережа Li-Fi включає такі складові – AP (точка доступу), UE (пристрій користувача), SDN Switch (комутатор SDN для формування маршруту передачі даних), Fiber-optic (оптичне волокно для з'єднання елементів мережі), uplink (висхідна лінія зв'язку для передачі даних у мережу), VLC downlink (нижчий канал зв'язку для отримання даних з мережі, застосовується видиме світло). Також пропонується використання контролерів SDN, які безпосередньо під'єднуються до комутаторів, для зручного управління мережею та забезпечення потрібного рівня освітлення у зоні покриття. Підключення до мережі Li-Fi здійснюється подібно до підключення до мережі Wi-Fi. У ролі точки доступу слугує звичайна LED-лампа, обладнана мікросхемою, до якої підключається драйвер лампи (Lamp Driver).

2.3 Принцип передавання сигналів у мережі LI-FI. Трансляція сигналу через тракт мережі Li-Fi

Як відомо, робота Li-Fi спирається на VLC (видиме світлове спілкування), де світло слугує середовищем передачі інформації. Джерелом цього середовища (тобто світла) у технології Li-Fi є світлодіодна лампа, керована драйвером лампи (Lamp Driver), який, у свою чергу, підключений до інтернету або сервера через SDN-комутатор. Lamp Driver регулює частоту мерехтіння світлодіодів і здійснює модуляцію. Мерехтіння передає цифрові дані (0 та 1). Інформація закодована у

світлі, що випромінюється світлодіодом, і приймається світлочутливим пристроєм – фотодетектором, який обробляє та підсилює сигнал. Обробка передбачає перетворення світлових сигналів у цифрові, забезпечуючи процес комунікації. Тракт передачі сигналів показано на рис. 2.4.

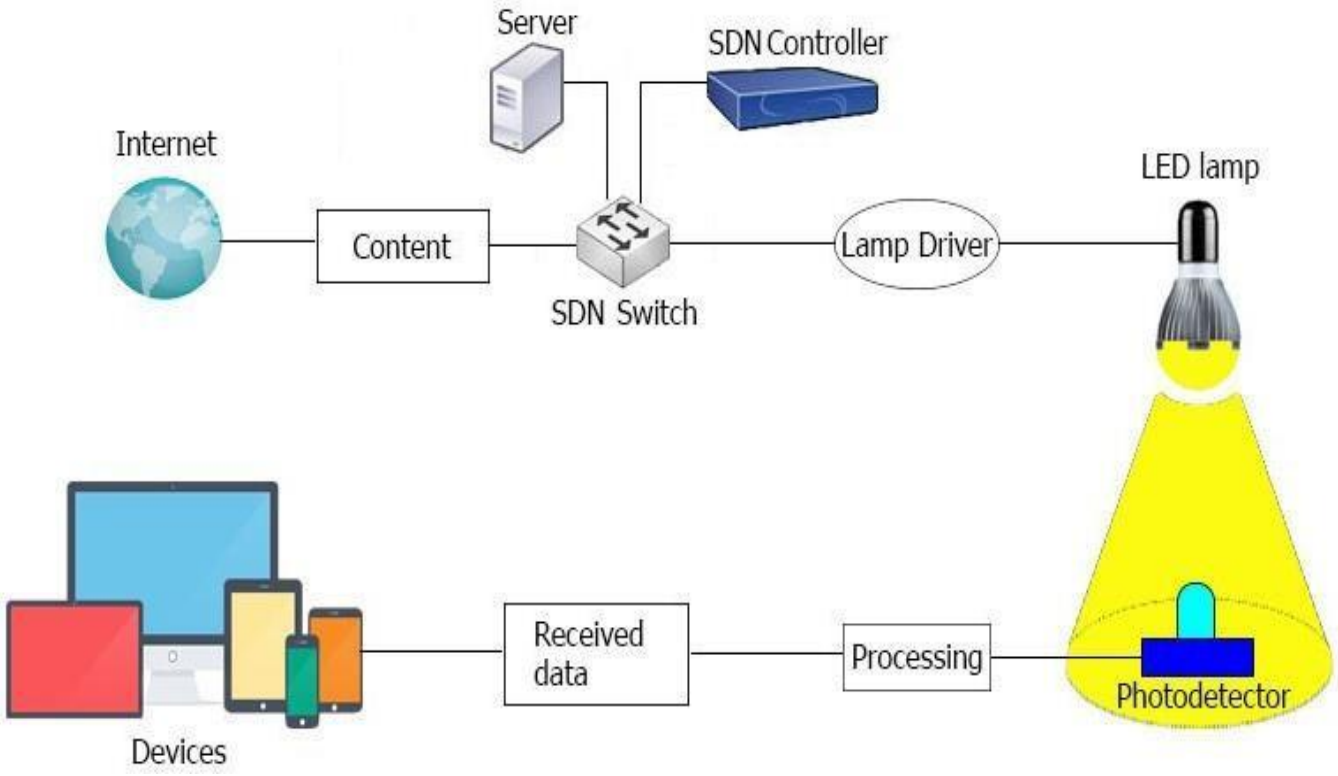


Рис. 2.4 Схема передачі сигналів у Li-Fi

Li-Fi здатний надати одночасний доступ до мережі великій кількості користувачів, оскільки це широкосмугова бездротова технологія. У Li-Fi можливо впровадити схему оптичного множинного доступу зі просторовим розділенням (Space Division Multiple Access, SDMA), коли застосовуються передавачі з кутовою спрямованістю. Порівняно з оптичним множинним доступом за часом (TDMA), SDMA здатний підвищити пропускну спроможність мережі Li-Fi у десять разів. Застосування OFDM пропонує простіший спосіб множинного доступу — OFDMA (множинний доступ з розподілом по ортогональних частотах), в якому користувачі обслуговуються та розподіляються серед великої кількості ортогональних піднесучих.

Продуктивність мережі Li-Fi можна підвищити, застосувавши неортогональний множинний доступ NOMA. На відміну від широко використовуваних технологій OFDMA, NOMA здатний обслуговувати більшу кількість користувачів шляхом розподілу неортогональних частотних ресурсів.

На рис. 2.5 показані доступні способи модуляції технології Li-Fi.

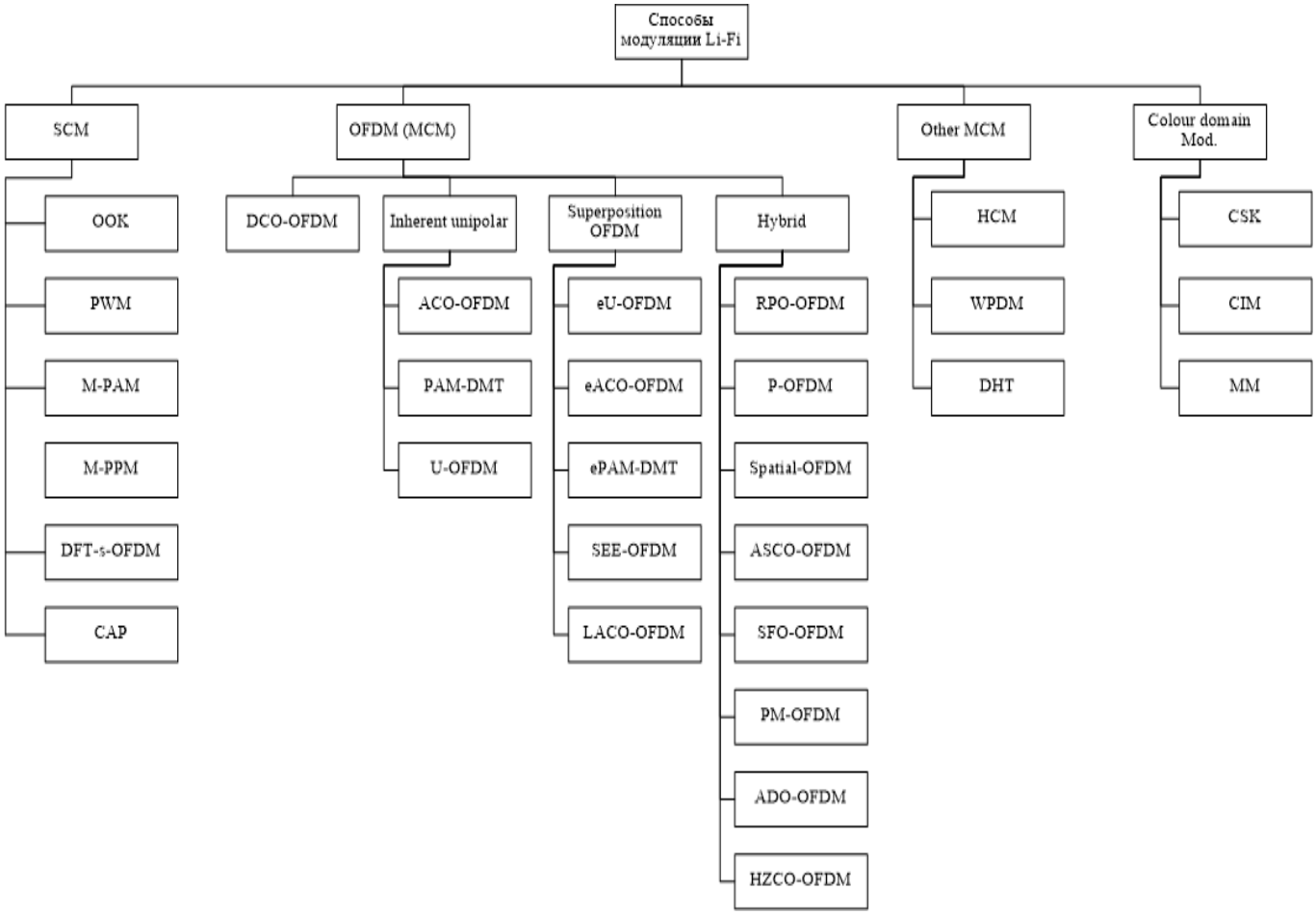


Рис. 2.5 Поділ методів модуляції Li-Fi

OFDM – ортогональна модуляція за частотою

ACO-OFDM – асиметрично відрізаний оптичний OFDM

ADO-OFDM - оптичний OFDM, асиметрично обрізаний і працює з постійним струмом

ASCO-OFDM – оптичний OFDM з симетричним та асиметричним обрізанням

CAP – модуляція амплітуди без несучої

CIM – модуляція інтенсивності світла

CSK – управління кольором

DCO-OFDM – оптичний OFDM з неперервним струмом

DFT-s-OFDM – дискретне Фур'є перетворення OFDM

DHT – дискретне перетворення Хартлі

eACO-OFDM – вдосконалений ACO-OFDM

ePAM-DMT – оптимізований PAM-DMT

eU-OFDM – покращений уніполярний OFDM

HACO-OFDM — комбінований асиметрично усічений оптичний OFDM

HCM — модуляція з кодуванням Адамара

LACO-OFDM – багаторівневий ACO-OFDM

MCM – багатопроменева модуляція

MM – метаметрична модуляція

M-PAM – M-змінна за амплітудою імпульсна модуляція

M-PPM – M-імпульсна модуляція позиції

OOK – включення-виключення ключа

PAM-DMT – імпульсна амплітудна дискретна багатотонна модуляція

PM-OFDM – позиційна модуляція OFDM

P-OFDM – полярний OFDM

PWM – модуляція широтно-імпульсна

RPO-OFDM – оптичний OFDM з інвертованою полярністю

SCM – модуляція з одиничною несучою

SEE-OFDM – спектрально-енергетично ефективний OFDM

SFO-OFDM – спектрально-розкладений оптичний OFDM

WPDM – мультиплексування з розподілом вайвлет-пакетів

При одноканальній модуляції (Single-Carrier Modulation, SCM) часто застосовуються схеми, такі як амплітудна маніпуляція (On-Off Keying, OOK), фазово-імпульсна модуляція (Pulse Position Modulation, PPM) та амплітудно-імпульсна модуляція (Pulse-Amplitude Modulation, PAM). OOK – це одна з найпростіших методик модуляції, яка забезпечує баланс між ефективністю системи та складністю її впровадження. OOK передає інформацію, послідовно перемикаючи LED у стан включення і вимикання, при цьому система може підтримувати зниження інтенсивності світла (диммінг). Завдяки регулюванню рівнів включення-вимкнення LED, диммінг дозволяє утримувати таку ж швидкість передачі, проте при низькій яскравості зменшуються діапазон та надійність зв'язку. Оскільки найвища швидкість передачі досягається при зниженні інтенсивності світла на 50 %, що відповідає приблизно рівному співвідношенню одиниць і нулів, будь-яке підвищення або зниження яскравості LED призведе до уповільнення передачі.

PPM кодує дані, використовуючи положення імпульсу всередині встановленого відрізка часу. Тривалість цього інтервалу повинна бути достатньо великою, щоб можна було відрізнити різні позиції імпульсу. У порівнянні з OOK, метод PPM споживає менше енергії, хоча його спектральна ефективність нижча. Варіант PPM під назвою змінна фазово-імпульсна модуляція (VPPM) дозволяє реалізувати діммінг, змінюючи тривалість імпульсу, що відповідає заданому рівню яскравості. Отже, VPPM можна розглядати як поєднання PPM і широтно-імпульсної модуляції (PWM).

Оскільки зростають вимоги щодо швидкості передачі даних у мережах Li-Fi, одиночні схеми модуляції, зокрема OOK, PPM та PAM, стикаються з

небажаними явищами, зокрема нелінійною дісторсією сигналу від світлодіода і міжсимвольними перешкодами, спричиненими частотною селективністю в дисперсних оптичних бездротових каналах. Тому для досягнення високошвидкісного оптичного бездротового зв'язку прийняли використання багатоканальної модуляції (MCM). У порівнянні з SCM, MCM забезпечує ширший спектр, але має нижчу енергоефективність. Однією, і, ймовірно, найпоширенішою, реалізацією MCM у мережах Li-Fi є OFDM — мультиплексування з розподілом сигналу по ортогональних частотах, де паралельні потоки даних передаються одночасно через сукупність ортогональних піднесучих, що дозволяє уникнути складного формування амплітудно-частотних характеристик. Якщо кількість ортогональних піднесучих підбирається таким чином, що ширина спектра модуляції менша за ширину смуги когерентності оптичного каналу, кожен підканал можна трактувати як плоский канал із затуханням. Тому, у цьому випадку, можна використати існуючі методи, розроблені для плоских каналів із затуханням.

Модуляція, що базується на зміні кольору (Color Shift Keying, CSK), по суті являє собою схему інтенсивної модуляції, у якій дані передаються шляхом варіювання яскравості світлодіодів RGB. Перша перевага CSK – відсутність мерехтіння на будь-яких частотах. Друга - стабільний потік світла створює практично постійний контрольний струм у світлодіодах, що знижує потенційний стартовий струм під час модуляції сигналу і таким чином підвищує їхню надійність.

У мережі Li-Fi передача сигналу відрізняється використанням світла як засобу передачі. Світлодіодна лампа генерує мерехтіння світла, що передає бінарні дані 1 і 0 фотодіоду, розташованому в пристрої користувача і приймаючому ці дані.

Для забезпечення багатокористувацького доступу використовується модуляція OFDMA – множинний доступ з ортогональним розподілом частот. Як альтернативу можна застосовувати неортогональний множинний доступ, який

підвищує кількість підключень користувачів шляхом розподілу неортогональних частот. Існують також інші методи модуляції зі своїми унікальними особливостями, наприклад, PPM (фазово-імпульсна модуляція) – підвищена енергоефективність, CSK (модуляція за допомогою маніпуляції кольором) – сигнали кодуються інтенсивністю випромінюваних світлодіодами RGB-кольорів, відсутній ефект миготіння на всіх частотах.

2.4 Вплив оптичних Front-End компонентів та світла у відкритому просторі всередині приміщення на VLC та Li-Fi канали

Одним із головних факторів, що впливає на продуктивність систем передачі VLC та мереж Li-Fi, є якість каналу зв'язку. У безз'єднаній оптичній системі модуляції інтенсивності/прямого виявлення (IM/DD) канал передачі, зазвичай, розділений на два сегменти. Перша частина стосується фільтрації front-end елементів, а друга — до внутрішньомережевого поширення у вільному просторі, як показано на рис. 2.6

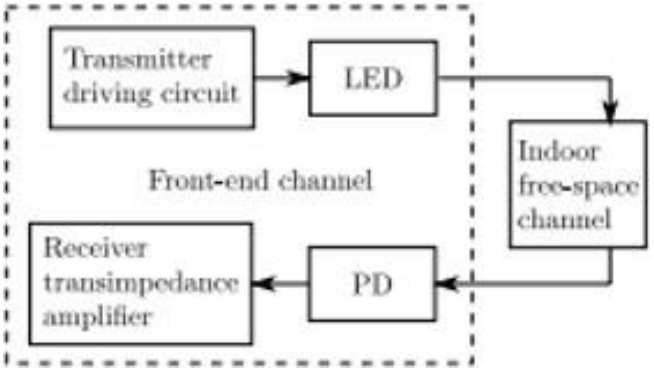


Рис. 2.6 Схема структури каналу LiFi

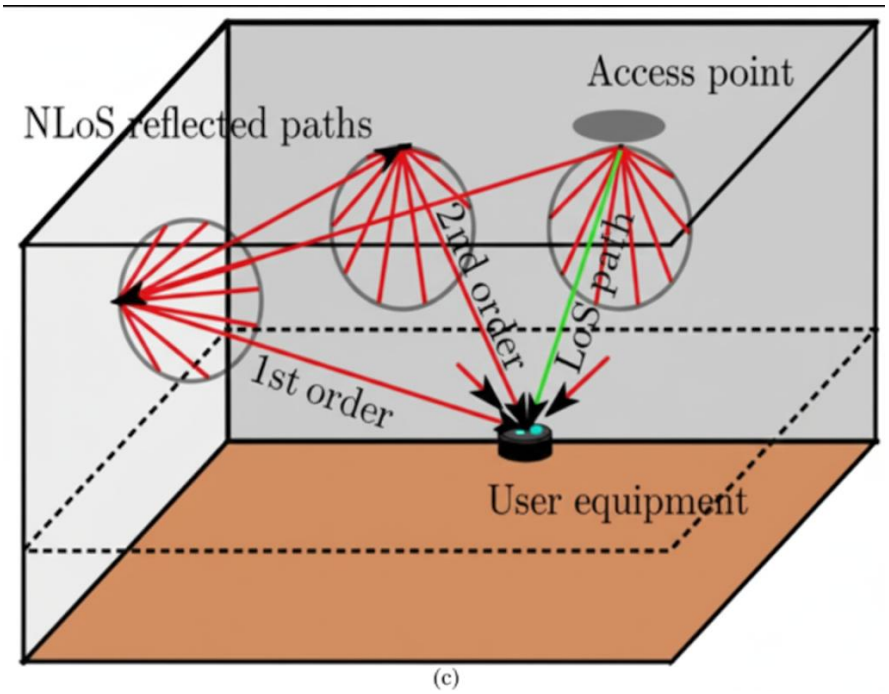
Щодо останньої частини, існує багато публікацій про моделі інфрачервоних каналів, проте досліджень моделей каналів у видимій ділянці спектра небагато. Деякі матеріали демонструють принципово різні характеристики відбивання у

спектрі видимого світла у порівнянні з інфрачервоним. Показано, як ці розбіжності впливають на модель каналу.

Стандартний оптичний front-end (інтерфейс) у некогерентній бездротовій оптичній системі модуляції інтенсивності/прямого виявлення (IM/DD) складається зі світлодіодів у передавачі і фотодіодів (PD) у приймачі. Додатково, при розробці реальних систем, слід ураховувати вплив інтерфейсної електроніки, зокрема драйвери світлодіодів у передавачі та оптичні елементи, в моделях каналу; див. рис. 4.1. У цих компонентів низькочастотна поведінка, що може обмежити максимально можливу швидкість передачі даних. Front-end каналу даної VLC-системи можна визначити експериментально, вимірявши реакцію каналу короткострокового зв’язку “точка-точка”. Точна функція передавання залежить від реальних пристроїв. Отже, описати цей елемент каналу загальними моделями надзвичайно складно, доки не з’являться добре параметризовані моделі. Для цього потрібні подальші дослідження. Багато вчених намагалися застосовувати прості моделі та методи кривих підгонок, щоб апроксимувати характеристики front-end каналу. Більшість поточних досліджень оптичного бездротового каналу беруть до уваги ламбертіанську діаграму випромінювання, бо вона проста у застосуванні і широко прийнята спільнотою VLC. Проте кілька досліджень виявили, що деякі LED-лампи в реальності генерують діаграми випромінювання, які суттєво відрізняються від ламбертіанської моделі. Крім того, ці дослідження продемонстрували, що параметри каналу, зокрема затрати на шлях і середньоквадратичну затримку розповсюдження, сильно залежать від діаграми випромінювання світлодіода.

Оптичні хвилі втрачають суттєву інтенсивність під час поширення у вільному середовищі. До того ж, складові сигналу досягають детектора різними траєкторіями, зокрема завдяки фізичним явищам, наприклад відбиттю та розсіюванню. Ці ефекти породжують різні часові затримки при прибутті сигналів, що створює унікальні профілі затримки живлення каналу. Основним елементом

каналу при поширенні світла у вільному середовищі є передача по прямій видимості (LoS), як продемонстровано на рис. 2.7, яку можна описати простим



аналітичним підходом.

Рис. 2.7 Показ внутрішнього вільного простору VLC-каналу

Оскільки переважна частина виявленої потужності сигналу надходить по лінійці прямої видимості (LoS) і оцінка втрат за цим шляхом проста, просте розповсюдження лише з LoS застосовувалося у багатьох роботах з VLC і Li-Fi. Проте отримана потужність сигналу з непрямих шляхів (NLoS) показала значний вплив у деяких випадках, зокрема в компактних і високо відбиваючих інтер'єрах. Такий NLoS-канал утворюється внаслідок більш складного механізму розповсюдження світла. Більшість навколишніх об'єктів мають нерівну поверхню порівняно з довжиною хвилі оптичного сигналу. Тому оптичний сигнал розсіюється при відбитті, і це призводить до безлічі відбивних шляхів передачі, як показано на рис. 2.7. Крім того, затримка та послаблення сигналу через траси NLoS суттєво залежать від властивостей зазначеного середовища (кімнати), зокрема розмірів приміщення, його відбивних властивостей та характеристик

інших об’єктів. Для моделювання відгуку каналів NLoS запропоновано багато методик. У широко використовуваному детермінованому підході на основі трасування променів розглядається порожня кубічна кімната з шістьма внутрішніми відбивними поверхнями (стіни, підлога і стеля). Така стратегія може дати точні результати відповіді каналу NLoS, проте обчислення є рекурсивним і, відповідно, трудомістким. Час обчислення пропорційний Nk, де N – кількість поверхневих елементів, а k – порядок відображень. Тому обчислювальна складність різко зростає зі збільшенням порядку відображень. На практиці моделювання можливе лише при $k \leq 3$. Для підвищення швидкості та гнучкості розрахунків запропоновано ряд варіантів. Зокрема, метод Монте-Карло дозволяє отримати відповідь каналу NLoS за кілька хвилин навіть для високих порядків відображень. Це значно скорочує час у порівнянні з детермінованим підходом. Проте у цьому методі з'являється додаткова модельна помилка, що означає, що імпульсна характеристика імітованого каналу коливається навколо реальної відповіді (високою чи низькою). Розмір коливання визначається відносною кумулятивною помилкою. При використанні великої кількості променів, наприклад 500000, відносну кумулятивну похибку можна знизити приблизно до 0,01. Нещодавно розроблені частотно-доменні обчислення каналу NLoS перетворюють рекурсивні операції у матрицю інверсних операцій. Подібно до двох попередніх методів, цей підхід придатний для будь-якого внутрішнього середовища та конфігурації передавача/приймача. Завдяки алгоритму Якобі кількість операцій пропорційна kN^2, що суттєво скорочує час розрахунку порівняно з детермінованим методом. Для отримання простішої моделі каналу NLoS був запропонований вираз відповіді моделі NLoS, побудованій на фізичній сферичній моделі, що дає заключний вираз, який, до речі, надзвичайно простий. Проте виявляється, що він точний лише в окремих плануваннях приміщень, а в багатьох інших — неточний. Це зумовлено тим, що він не враховує реального випромінювача та налаштування приймача. Для підвищення достовірності моделювання запропонували підхід, заснований на комерційному оптичному проєктувальнику Zemax. У ряді робіт досліджувалися особливі аспекти каналу

VLC. Наприклад, аналізувалася залежність VLC-каналу від довжини хвилі. Проста процедура дозволила визначити внутрішній вільний простір каналу для широкоформатної VLC-системи. Крім того, розглядали ефект тіні, який було вивчено в кількох початкових роботах. З'ясовано, що вплив людського тіла залежить від швидкості передачі, його відбивної здатності та відстані приймача до тіла. Випадкові блокування можна змоделювати за допомогою розподілу Релея.

2.5 Методи усунення перешкод

Щоб підвищити загальну пропускну здатність мережі Li-Fi, потрібне інтенсивне просторове повторне використання передавальних ресурсів. Отже, міжклітинні інтерференції (CCI) стають обмежувальним фактором, який визначає сумарну продуктивність Li-Fi мереж, як показано на рис. 2.8

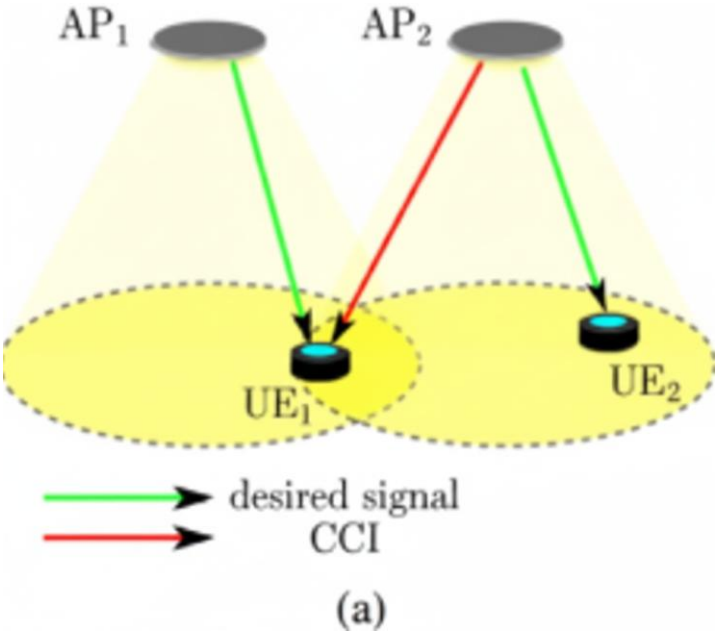


Рис. 2.8 Показ CCI

Для зменшення негативних ефектів CCI застосовувалися різноманітні способи подолання перешкод.

Належне розподілення ресурсів ортогональної передачі, таких як час, простір, частота й потужність, для абонентів, які конкурують за один і той самий спектральний ресурс, широко застосовується у радіочастотних бездротових стільникових мережах задля координації інтерференції. Подібні підходи також розглядалися в мережах Li-Fi, включаючи додаткову вимір довжини хвилі. Один із варіантів – статичний розподіл ресурсів. У цьому випадку доступний ресурс передавання ділиться на кілька блоків. Ці блоки розподіляються абонентам так, щоб суміжні точки доступу завжди використовували різні блоки, як показано на рис. 2.9.

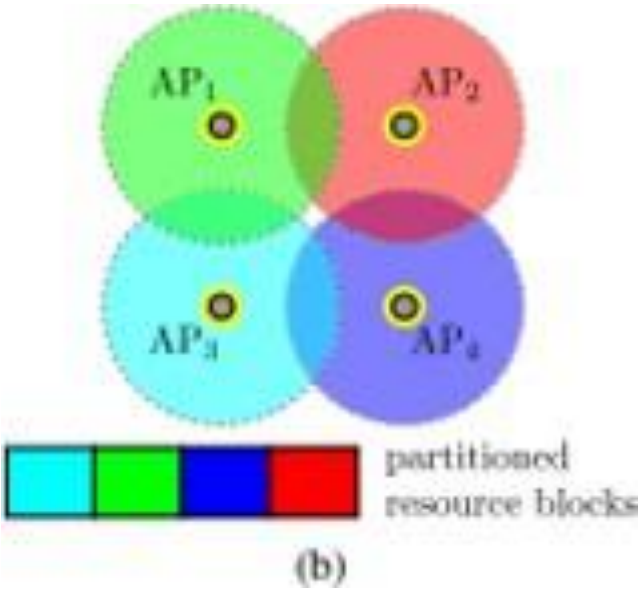
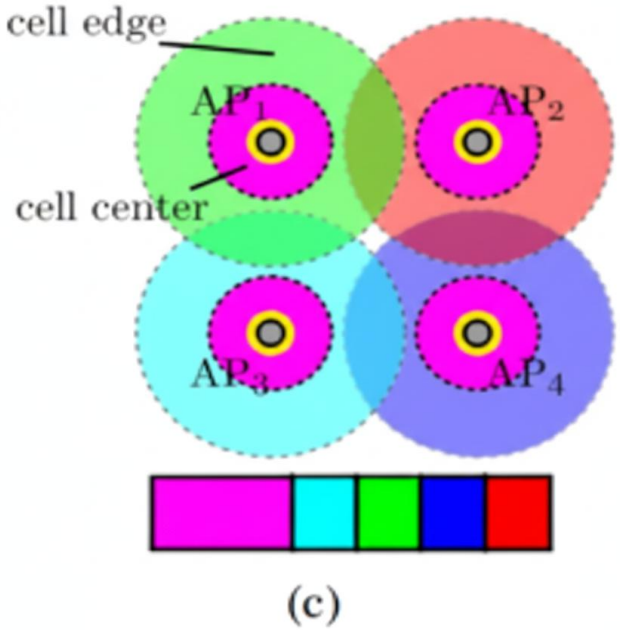


Рис. 2.9 Поділ статичних ресурсів

Ресурси передачі можна розподілити за часом, довжиною хвилі або частотою. Виділення цих блоків ресурсів встановлюється заздалегідь, і план не змінюється під час роботи системи Li-Fi. Такий підхід дозволяє ефективно уникнути CCI при надзвичайно низькій складності. Проте кожна точка доступу може використати лише невелику частку ресурсів, що суттєво знижує спектральну ефективність системи. Удосконалений метод статичного розподілу ресурсів, відомий як дробове повторне використання частот (FFR), пом’якшує втрату спектральної ефективності. У FFR користувачі поділяються на користувачів країв клітин і користувачів стільникового центру. Всі користувачі

стільникового центру обслуговуються кожною точкою доступу, ділячись одним



(c)

блоком ресурсів, коли вони відчувають низький CCI, як показано на рис. 2.10.

Рис. 2.10 Знову використано дробову частоту

Існують різноманітні ресурсо-блоки, які виділяються користувачам на краю стільника і обслуговуються суміжними точками доступу ортогонально, щоб запобігти CCI. Підвищуючи частку ресурсу, відведену центральним користувачам, підвищується загальна спектральна ефективність системи завдяки пришвидшенню повторного використання переданих ресурсів. Хоча фіксовані методи розподілу ресурсів прості, вони виявляються неефективними при нерівномірному навантаженні точки доступу. Для запобігання такому зниженню ефективності розподілу ресурсів розглянуто динамічні схеми їх розподілу. У одному із досліджень Ghimire ресурси передачі розбиваються на кілька фрагментів у часовій і частотній областях, утворюючи ортогональне розподілення частоти з багатократним доступом у часі (TDD) в оптичній бездротовій мережі, розташованій у кабіні літака. Кожне UE випромінює сигнал з фіксованою потужністю, параметр якої відомий усій мережі. Цей базовий живильний сигнал передається в міні-слот, у якому він представлений у вигляді «зайнятого сплеску»

(ВВ). Протокол ВВ застосовує взаємність каналу у TDD. Перевага цієї схеми полягає в тому, що будь-яка потенційна перешкода може оцінити можливе втручання, користуючись отриманою потужністю ВВ-сигналу. Така завада може використати ці дані для формування відповідної стратегії передачі. Завдяки ВВ-сигналізації, фрагменти ресурсу розподіляються динамічно між UE. Дослідження довели, що ВВ-підхід значно підвищує справедливість користувачів і досяжну спектральну ефективність у порівнянні зі статичним розподілом ресурсів. Биховський розглядає часо-роздільну дискретну багатотональну мережу Li-Fi з чотирма точками доступу та динамічний розподіл ресурсів як задачу оптимізації за критерієм max-min. За прийнятних спрощень можна отримати суб-оптимальні рішення щодо розподілу потужності передачі та планування піднесучих. Динамічні схеми розподілу ресурсів можуть адаптувати розподіл відповідно до поточного навантаження точки доступу. Проте це потребує CSI на боці точки доступу і підвищеної обчислювальної складності порівняно зі статичними підходами розподілу ресурсів.

Окрім методів, запозичених із радіочастотних мобільних технологій, унікальні рішення в мережах Li-Fi застосовують кутову різноманітність і на передавачі, і на приймальному боці. На приймальному боці кілька фотодетекторів PD з вузькими полями зору та різною орієнтацією можуть бути встановлені для функціонування як приймач кутового розподілу, згідно з рис. 2.11.

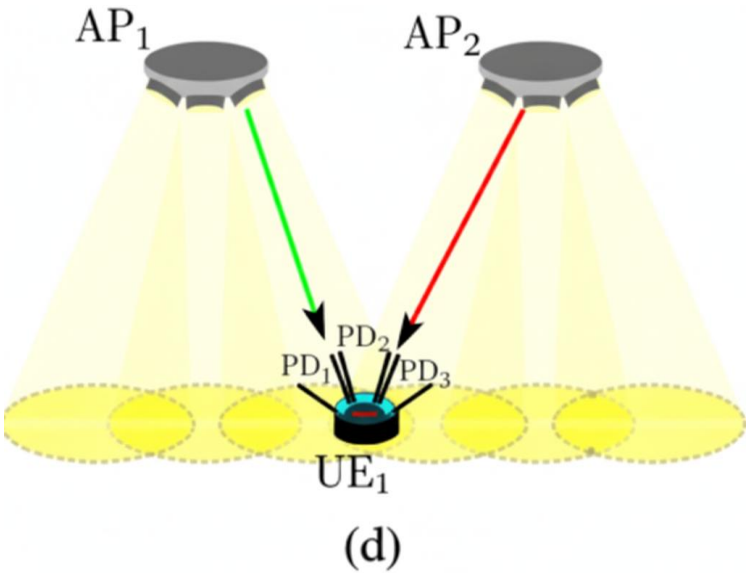


Рис. 2.11 Узгодження перешкод з кутовою різноманітністю у приймачі та передавачі.

Бажаний сигнал від позначеної точки доступу та CCI з інших сусідніх точок доступу можуть потрапляти на приймач з різних напрямків і виявлятися різними PD-детекторами. Використовуючи різні комбіновані підходи, можна знизити вплив CCI без втрати спектральної ефективності. За допомогою приймачів зображень також досягається значне просторове різноманіття для придушення CCI. З боку точки доступу можна розташувати декілька джерел світла з вузьким кутом випромінювання на AP, щоб створити передавач кутового розподілу, як показано на рис. 2.11. У такій конфігурації джерело світла, спрямоване на потрібний UE, активується. Завдяки вузькому куту променя поширення CCI обмежується дуже малим простором. Підвищення продуктивності, забезпечене координацією перешкод за допомогою методів кутового розмаїття, досягається за рахунок збільшення апаратної та алгоритмічної складності.

Ще один перспективний спосіб зменшити перешкоди – синхронізувати передачі з кількох точок доступу, так щоб користувач краю комірки обслуговувався декількома точками доступу, як показано на рис. 2.12.

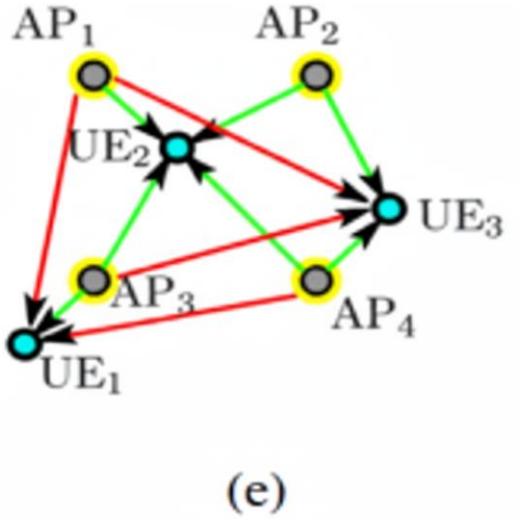


Рис. 2.12 Спільна передача в кооперативному багатоточковому режимі.

Цей підхід називається спільною багатоточковою передачею (CoMPJT) у радіочастотних бездротових системах. Проте ця концепція може легше впроваджуватись у мережах Li-Fi, оскільки у системах на базі IM/DD відсутні ефекти швидкого згасання. Окрім переваги усунення CCI та посилення цільового сигналу, ймовірність блокування зменшується завдяки наявності декількох LoS шляхів.

Як уже зазначалося, мережа Li-Fi поділяється на два складові – front-end канал і канал вільного простору. Канал вільного простору може бути здійснений у вигляді інфрачервоного каналу або каналу видимого світла.

Ключовим фактором розповсюдження світла у відкритому просторі є шлях прямої видимості (LoS), оскільки саме при ньому сигнал має найвищу потужність. Проте варто враховувати й нелінійні маршрути NLoS, адже в окремих випадках вони можуть забезпечити досить хорошу потужність сигналу. Тому необхідно приймати до уваги оточення мережі Li-Fi, предмети в приміщенні, гладкі поверхні, які ефективно відбивають світло тощо.

Головним чинником, що обмежує пропускну спроможність мережі, є міжклітинні інтерференції, або інтерференції спільного каналу (CCI). До способів протидії цим інтерференціям належать: розподіл статичних ресурсів, повторне

застосування дробової частоти, координація інтерференції з кутовою різноманітністю на приймачі й передавачі, а також кооперативна багатоточкова спільна передача.

3 НАПРЯМКИ ПРАКТИЧНОГО ВИКОНАННЯ МЕРЕЖІ LI-FI СТВОРЕННЯ ОПТИЧНОЇ ЛОКАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ, СТІЙКОЇ ДО ЗАВАД

3.1 Програмне забезпечення для емуляції Li-Fi

Нещодавні дослідження створили декілька моделей, що описують і імітують системи Li-Fi. Розроблена модель Li-Fi містить стандартну схему трансфера, реалізовану за допомогою MATLAB.

З метою підвищення продуктивності в порівнянні з попередніми моделями, у модель системи Li-Fi Simulink, додаються деякі елементи, зокрема дзеркала і лінзи. Очікується, що концентрація світла, випромінюваного світлодіодом на фотодіод, призведе до збільшення амплітуди вихідного сигналу.

Головна Li-Fi система включає дві ключові складові. Приймальний і передавальний контури розташовані окремо і знаходяться на відстані один від одного. Проте незаповнений оптичний зв'язок (канал Li-Fi) з'єднує ці два елементи. Схема блоку головної Li-Fi системи зображена на рис. 3.1.

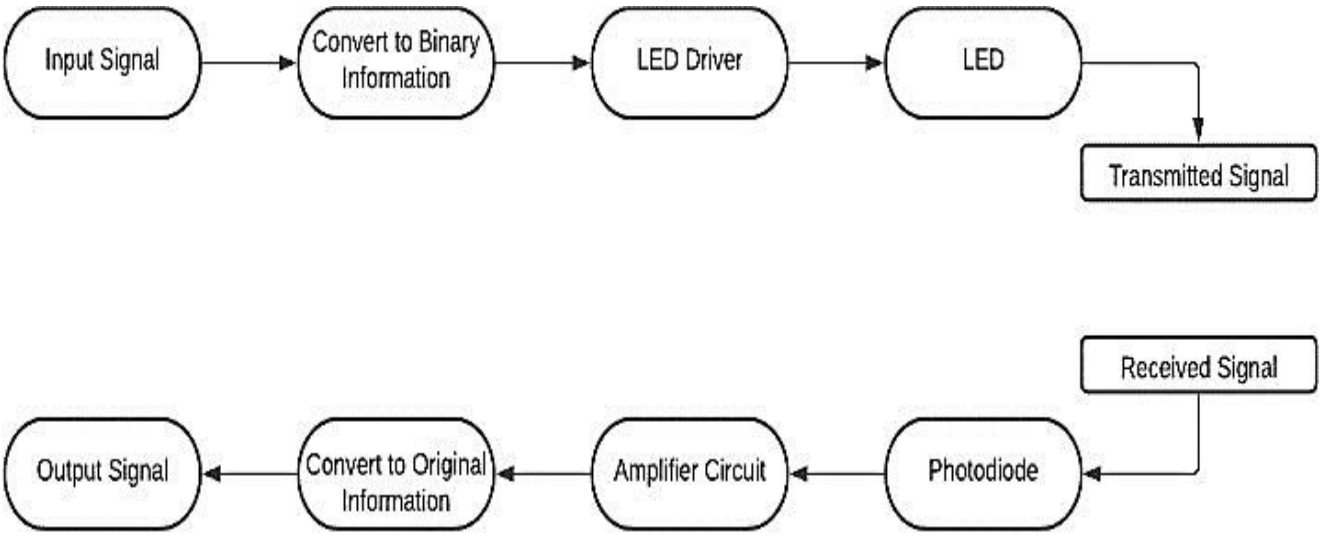


Рис. 3.1 Схема основної системи Li-Fi

Застосовується формула закону квадрата відстані: (3.1)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

де I_1 та I_2 - рівні інтенсивностям світла LED на відстанях d_1 і d_2 від фотодіода, відповідно.

Комунікаційний канал може включати декілька джерел оптичного шуму. Протягом дня головним джерелом шуму залишається сонце. Краплі води, що утворюються під час дощу, снігопаду чи густого туману, можуть розсіювати світло-дані і заважати передачі видимим світлом.

Дзеркальні та блискучі поверхні відбивають більшість падаючого на них світла згідно законів відбиття. Подія відбиття зображена на рис. 3.2.

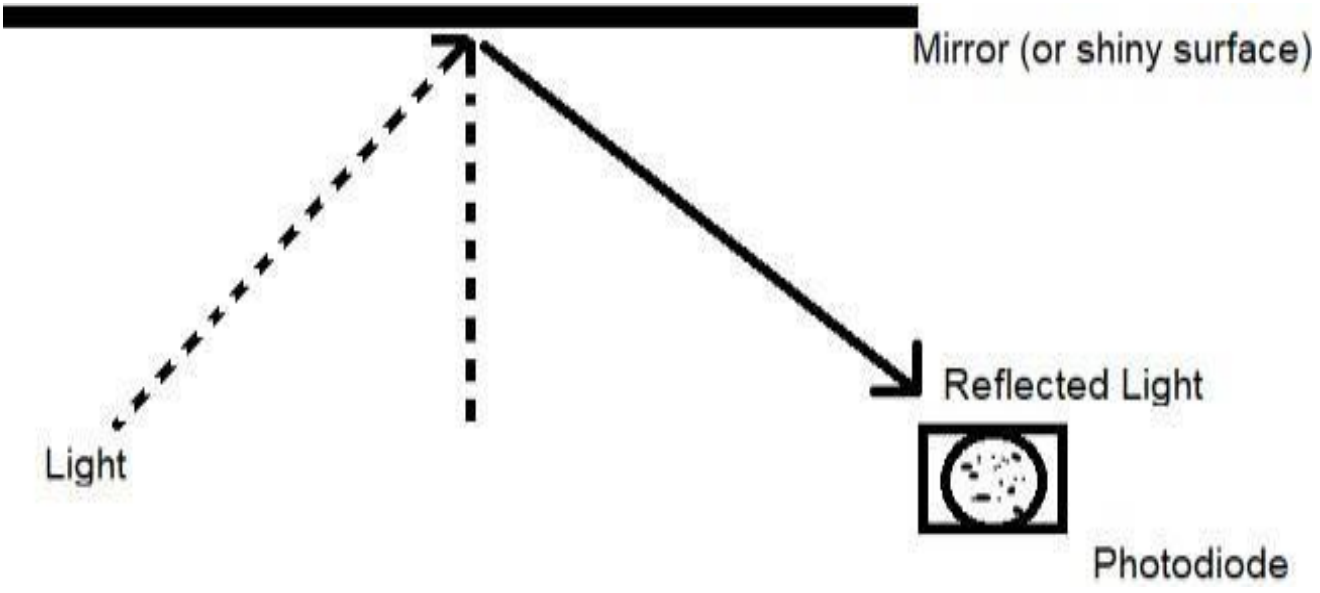


Рис. 3.2 Приклад відзеркалення

У системі Li-Fi з дзеркалом вхідне світло відбивається від поверхні та спрямовується до фотодіода. Закон Снелла описує процеси відбиття і відхилення

світла. За законом Снелла відношення синусів кутів падіння і відбиття відповідає відношенню фазових швидкостей у двох середовищах, або оберненому відношенню показників заломлення: (3.2)

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

де θ1 — кут падіння, θ2 — кут відбиття; обидва визначаються щодо нормалі до поверхні; v1 і v2 — швидкості вхідного та вихідного світла; n1 і n2 — показники заломлення відповідних середовищ.

Будь-який промінь, що рухається уздовж головної осі збиральної лінзи, заломлюється в лінзі та проходить через фокусну точку F' з її зворотного боку. Схема на рисунку 3.3 ілюструє шлях двох променів, що наближаються паралельно до центральної осі. У цьому випадку місце, де промені сходяться, називається фокусною точкою F' лінзи. У Li-Fi системі фотодіод має певний кут огляду. Він не сприймає світлові промені, що знаходяться поза межами цього кута. Якщо фотодіод розташований у точці F', кількість падаючого на нього світла зростає.

Лінзи утворені двома вигнутими рефракційними поверхнями. Рефракційна сила P, тобто обернена фокусна відстань f (відстань між лінзою та точкою фокусування), для лінзи у повітрі обчислюється за допомогою загального рівняння лінзи:
(3.3)

$$P = \frac{1}{f} = (n-1)\left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)d}{nR_1R_2}\right]$$

де n – коефіцієнт заломлення матеріалу лінзи, d – відстань вздовж оптичної осі між її двома поверхнями, що становить товщину лінзи, а R1 і R2 – радіуси кривизни цих поверхонь. Модель Simulink базової системи Li-Fi, представлена на рис. 3.3.

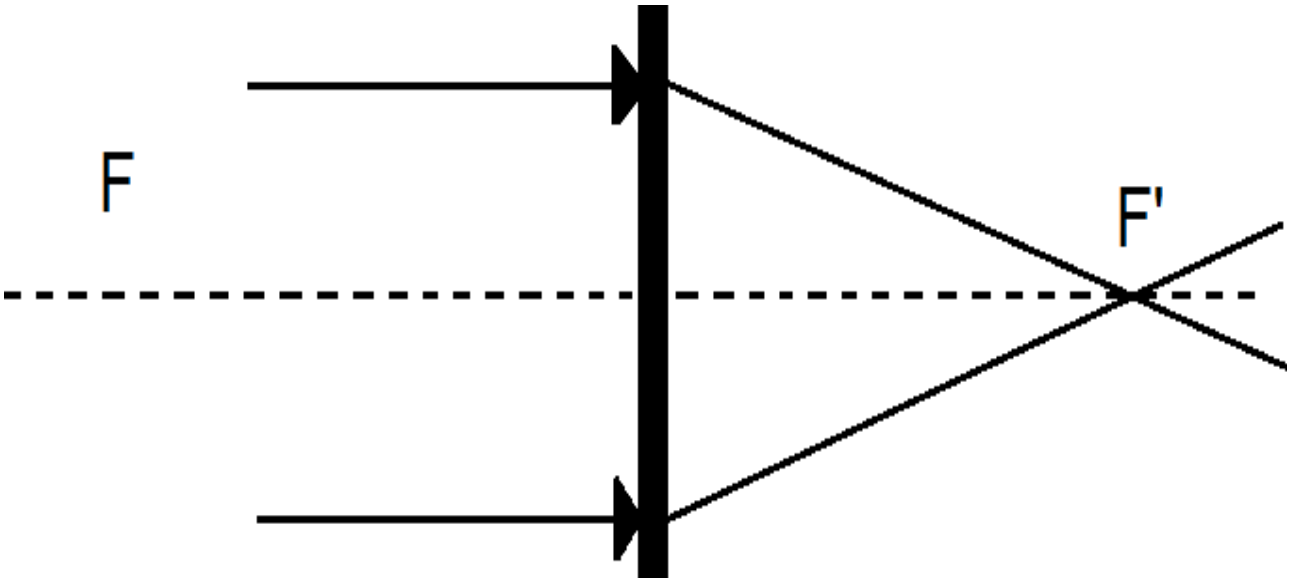


Рис. 3.3 Переміщення світла через збиральну лінзу

Модель включає передавальну секцію, що містить генератор квадратних хвиль для перетворення вхідного сигналу в бінарну інформацію, перемикаючу схему, яка активує світлодіод, та сам світлодіод, який передає дані за допомогою світла. Передавач працює разом з оптичним каналом, що слугує середовищем, через яке розповсюджується світло і використовується для передачі даних до приймача.

Далі йде секція приймача, що містить фотодіод, який перетворює світлову потужність у електричний сигнал, та підсилювальний підсилювач, який використовується для збільшення отриманого електричного сигналу.

3.2 Моделі Li-Fi систем у Simulink

Модель Li-Fi системи з дзеркалом у Simulink представлена на рис. 3.5. Модель містить модель, створену для базової Li-Fi системи у попередньому розділі, і модель дзеркала, реалізовану за допомогою функції Matlab, сформовану згідно рівняння (3.2), що спрямовує світло від LED лампи до фотодіода. Під час моделювання дзеркала в Simulink встановлені показники: коефіцієнт заломлення

повітря — 1,75, коефіцієнт заломлення самого дзеркала, що відбиває світло, та кут нахилу дзеркала — 30°. Параметри, використані у симуляції, взяті з діапазону 300-1500 лк, що забезпечує належне освітлення офісу світлодіодами, а також кутів дзеркал, спрямованих на підвищення продуктивності системи. Ці значення можуть коригуватись у моделі залежно від вимог і сфери застосування.

Хоча світло, яке випромінює світлодіод, розподіляється по всьому простору (кімната, офіс, салон літака тощо), його інтенсивність не однакова у всіх точках, і фотодіод може реєструвати дані лише під певним кутом огляду. Тонка збільшуюча лінза не здатна зібрати весь випромінений світловий потік на фотодіод, проте світло поза полем зору може бути сфокусоване на фотодіод. На рис. 3.6 показана модель Simulink для Li-Fi системи з тонкою збільшувальною лінзою. Модель містить розроблену для базової Li-Fi системи частину та модель тонкої лінзи, реалізовану функцією Matlab, згідно рівняння (3.3), що фокусує розсіяне світло на фотодіод. Параметри моделі можна змінювати відповідно до вимог та сфери застосування.

Коли тонка збільшувальна лінза і дзеркало застосовуються одночасно, розсіяне світло відхиляється, і на фотодіод потрапляє більше світла. У цьому випадку проміння, відбиті від дзеркала та тонкої збільшувальної лінзи, падають прямо на фотодіод. В результаті передбачається подальше збільшення вихідного сигналу системи. Модель Simulink, що включає як тонку збільшувальну лінзу, так і дзеркало для повної Li-Fi системи, зображена на рис. 3.4.

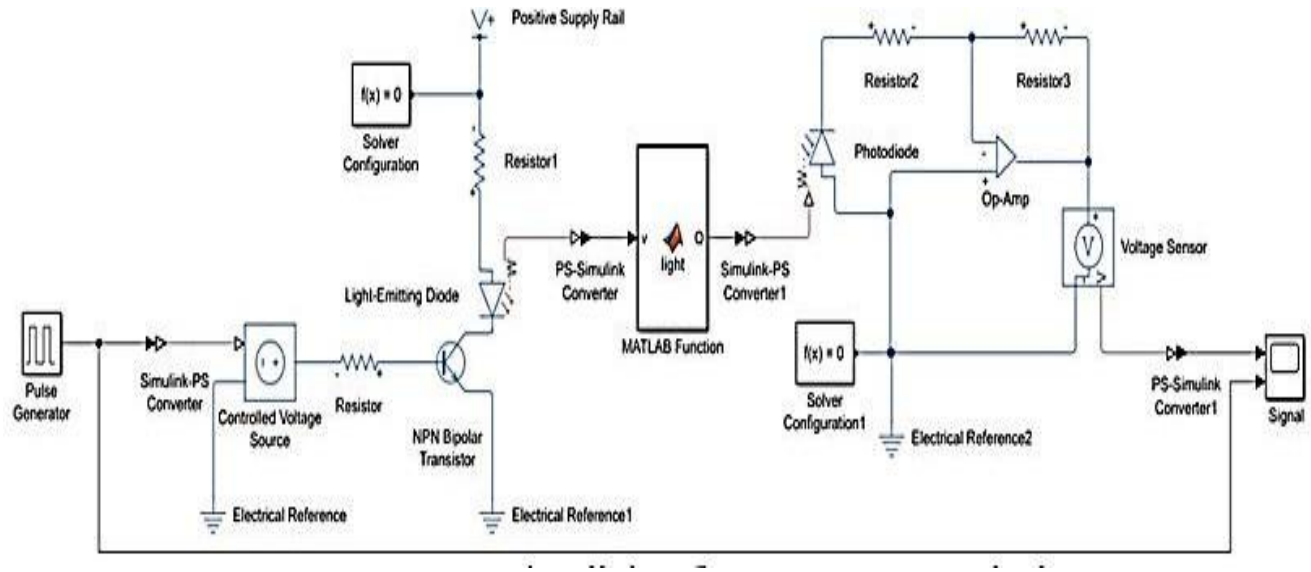


Рис. 3.4 Simulink модель основної Li-Fi системи

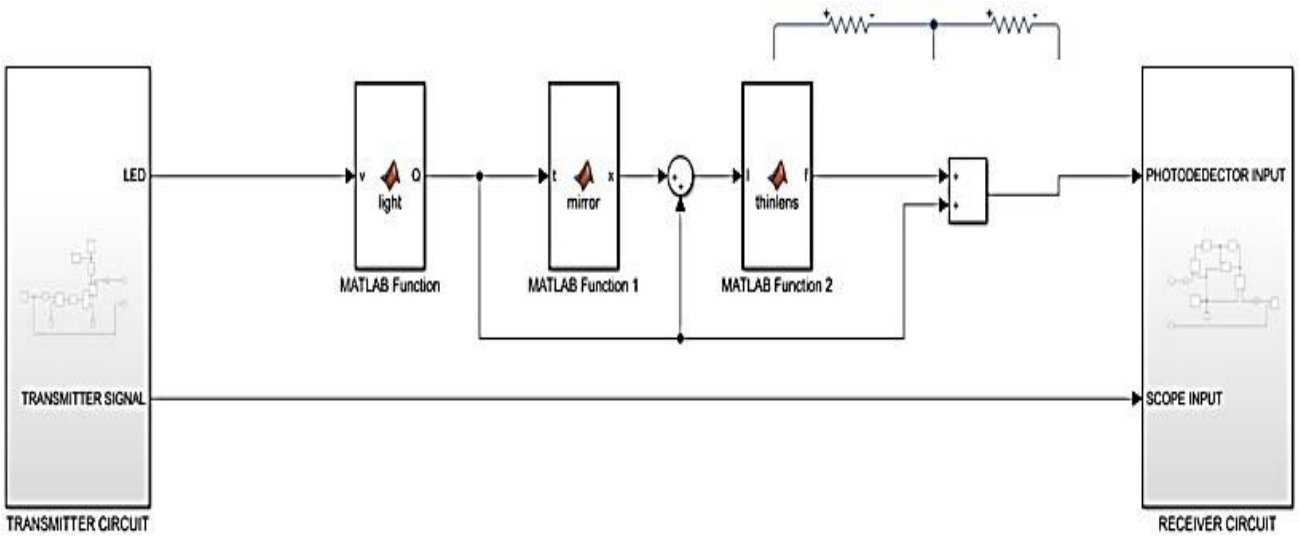


Рис. 3.5 Модель Simulink системи Li-Fi з використанням дзеркала

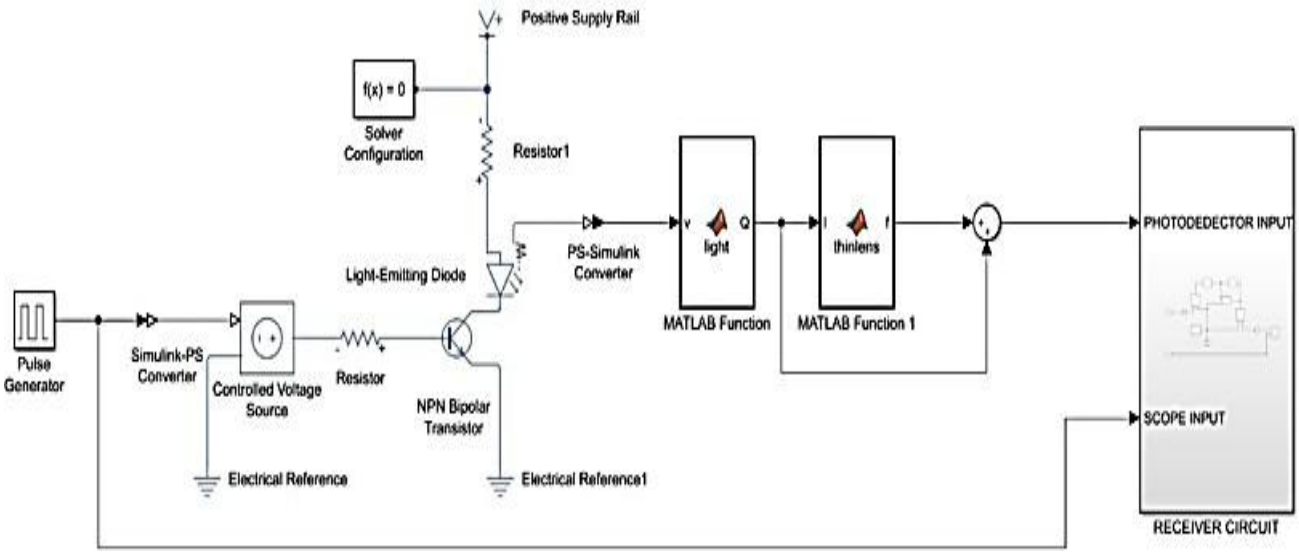


Рис. 3.6 Схема Simulink системи Li-Fi з тонкою випуклою лінзою

Створені моделі оцінюються за допомогою моделювання. Функціональність моделей перевіряється шляхом подачі вхідного сигналу з амплітудою 3,3 В і спостереженням вихідного сигналу. На рисунку 3.8 зображено форми сигналів передавача і приймача (вхідні та вихідні сигнали системи) для моделі Simulink базової Li-Fi системи.

Як видно на рисунку 3.8, сигнал 3,3 В, який надійшов від передавача, у приймачі спостерігається як 1,213 В

На рис. 3.9 зображені хвильові форми передавача і приймача (вхідні та вихідні сигнали системи Li-Fi) для Simulink-моделі Li-Fi з використанням дзеркала. Як видно на рис. 3.9, сигнал у 3,3 В, що надходить від передавача, вимірюється як 1,396 В у приймачі. Виміряний у приймачі сигнал підвищується завдяки впливу дзеркала.

На рис. 3.10 зображені хвильові форми передавача і приймача (вхідні та вихідні сигнали системи Li-Fi) для Simulink-моделі Li-Fi з тонкою вигнутої лінзою. Як видно на рисунку 3.10, сигнал 3,3 В, випромінений передавачем, спостерігається у приймачі як 1,549 В. Завдяки фокусуючому ефекту тонкої вигнутої лінзи, отриманий у приймачі сигнал збільшується. На рис. 3.11 показані

хвильові форми передавача і приймача (вхідні та вихідні сигнали системи Li-Fi) для Simulink-моделі складної системи Li-Fi. Як продемонстровано на рис. 3.1, сигнал 3,3 В, випромінений передавачем, реєструється в приймачі як 2,687 В. При використанні і дзеркала, і тонкої вигнутої лінзи в моделі, вихідний сигнал приймача значно підвищується.

У таблиці 3.1 представлено порівняння розроблених моделей системи Li-Fi у Simulink за вихідним сигналом.

Таблиця 3.1

Порівняльний аналіз моделей розробленої системи Li-Fi Simulink

Модель	Відправлений сигнал (V)	Отриманий сигнал (V)
Основна	3.3	1.213
Дзеркальна	3.3	1.396
Випукла лінза	3.3	1.549
Всеохопна	3.3	2.687

Отже, аналізуючи запропоновані варіанти вихідного сигналу Li-Fi системи, можна виділити підвищення сигналу приблизно на 15 % у системі Li-Fi з дзеркалом, близько 28 % у системі Li-Fi з тонкою випуклою лінзою та приблизно 122 % у комплексній системі Li-Fi порівняно з базовою Li-Fi системою. Крім того, комплексна система Li-Fi перевищує систему Li-Fi з дзеркалом і систему Li-Fi з тонкою випуклою лінзою на 93 % і 74 % відповідно.

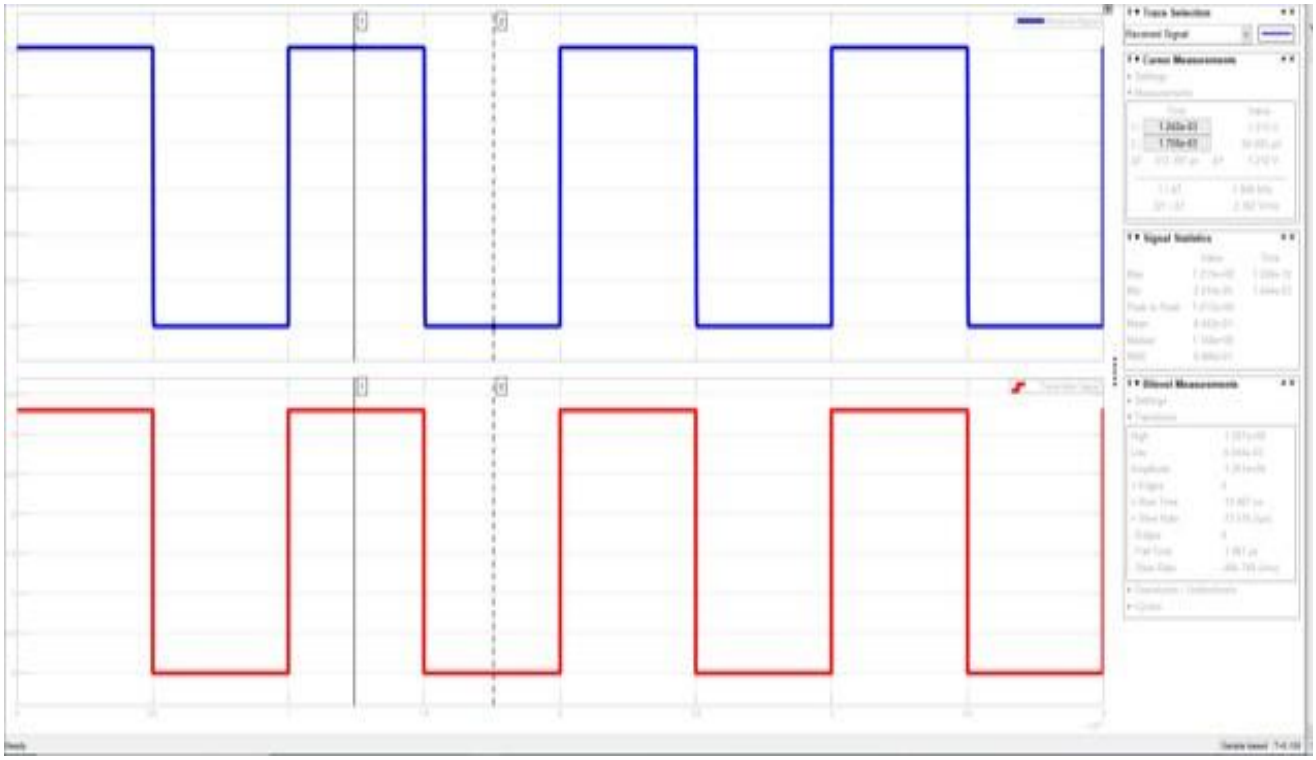


Рис. 3.8 Відправлені та отримані сигнали для базової моделі Simulink технології Li-Fi

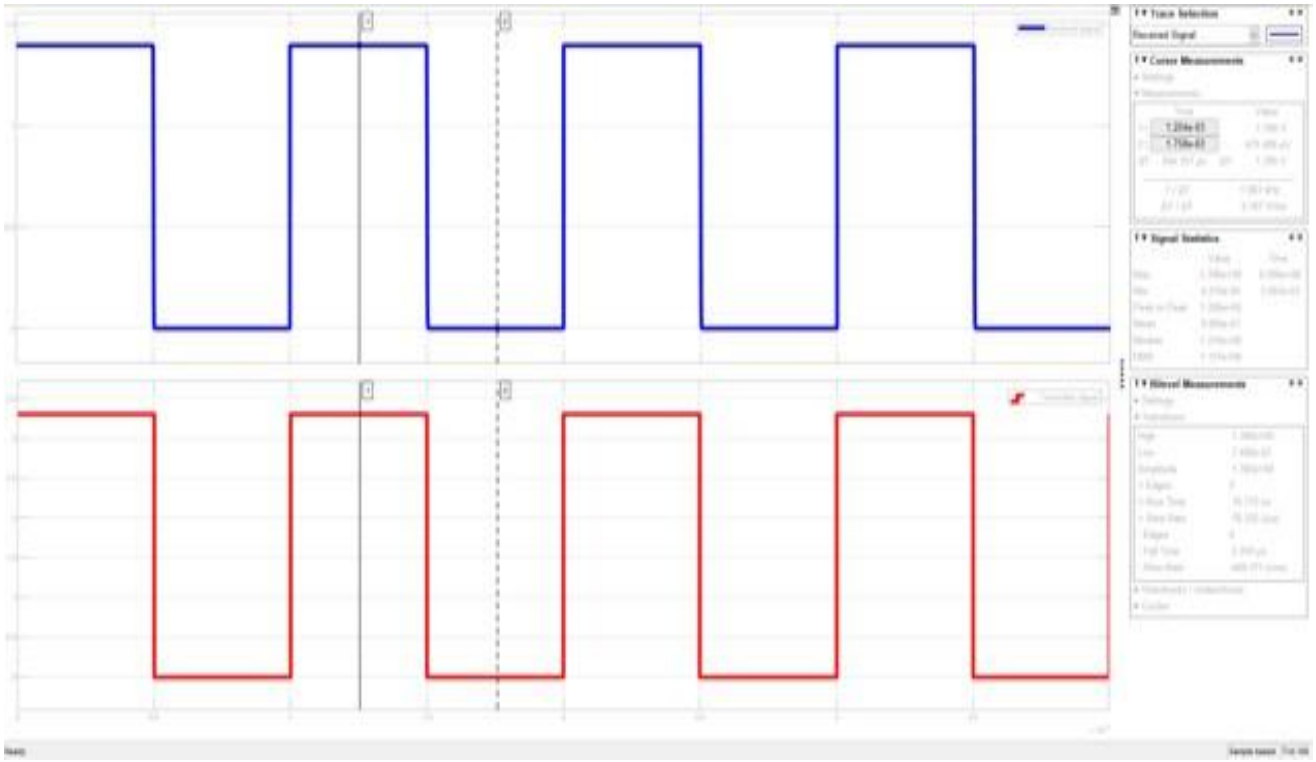


Рис. 3.9 Відправлені та отримані сигнали для моделі Simulink системи Li-Fi з використанням дзеркала

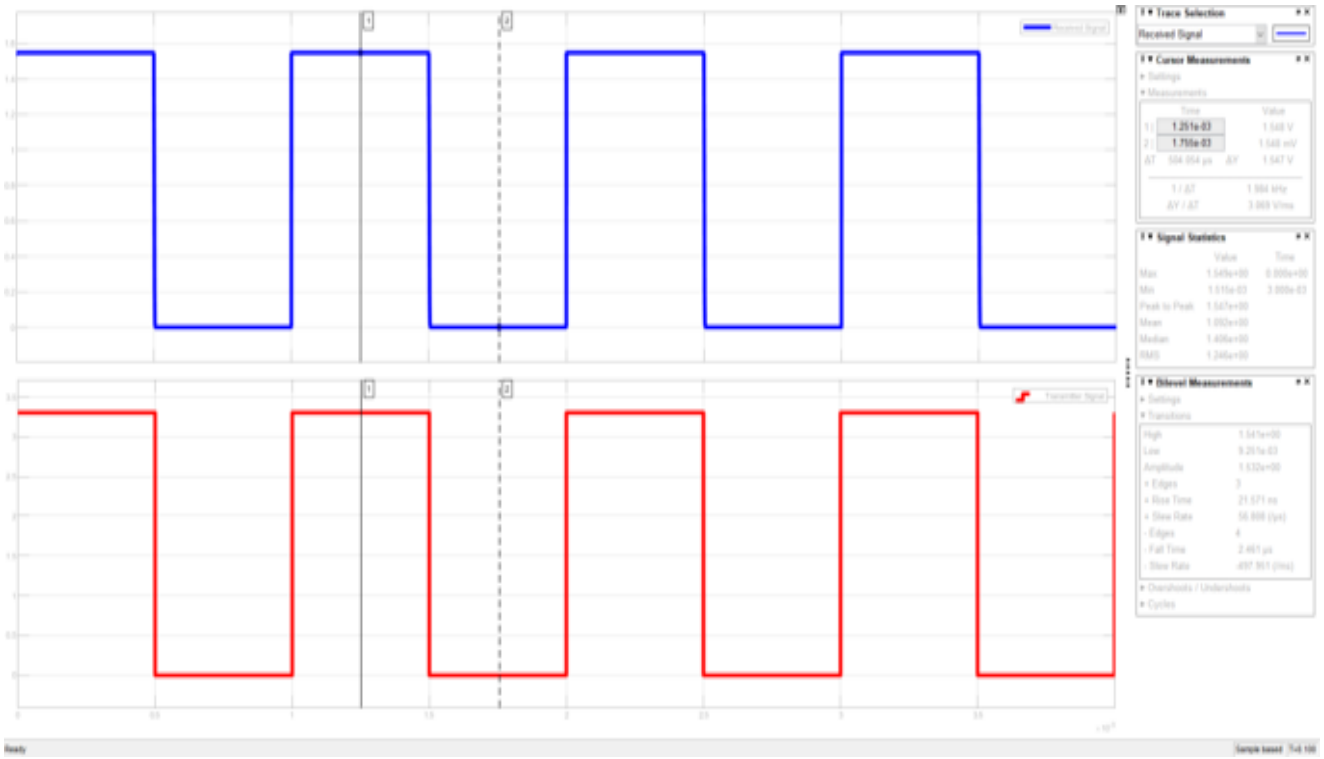


Рис. 3.10 Відправлений та отриманий сигнали для моделі Simulink системи Li-Fi з тонкою випуклою лінзою

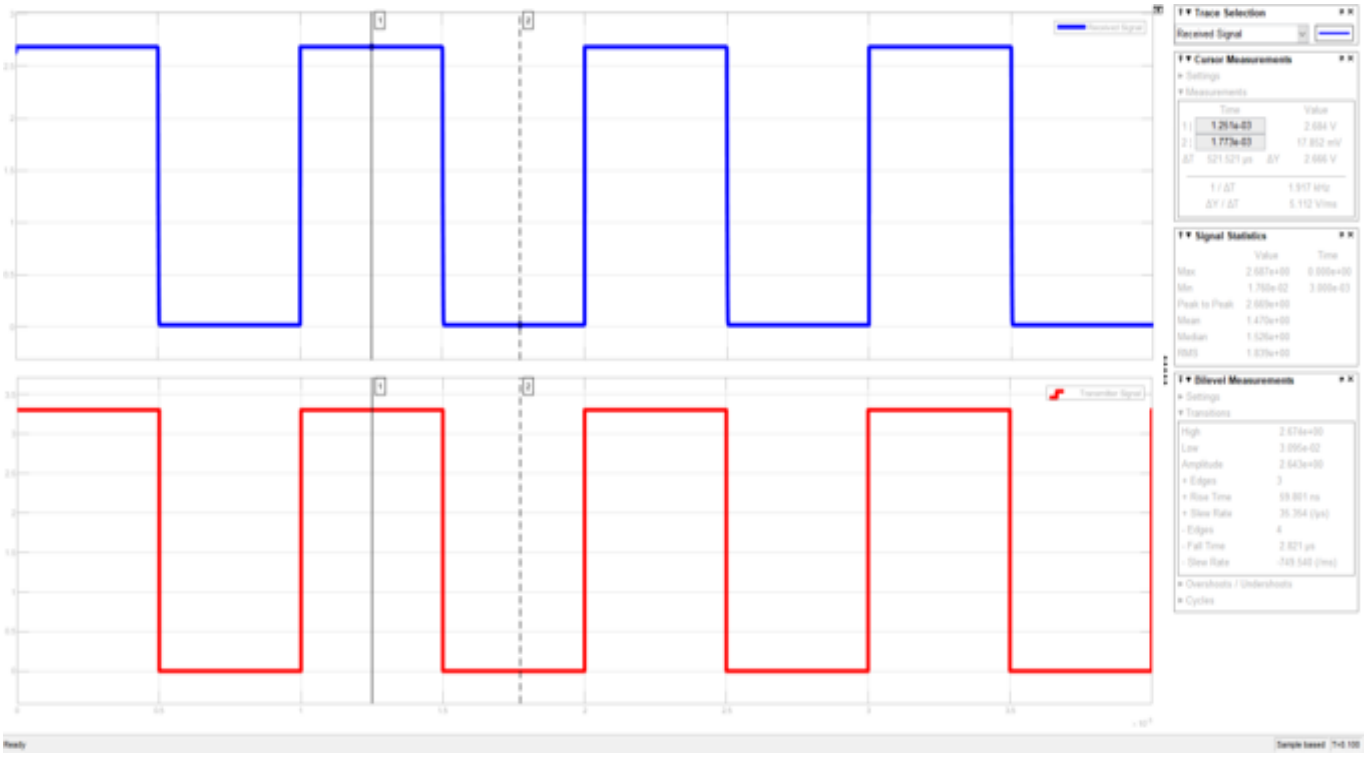


Рис. 3.11 Трансльовані і прийняті сигнали для моделі Simulink повної систем и Li-Fi

Продуктивність моделей порівнюється з базовою моделлю системи Li-Fi. Запропонована комплексна модель демонструє надзвичайно високу ефективність. Зафіксовано зростання вихідного сигналу на 122 % у порівнянні з базовою моделлю. Додатково, сигнал, отриманий у варіантах лише з дзеркалом та лише з тонкою випуклою лінзою, збільшується на 15 % і 28 % відповідно, якщо порівнювати з базовою моделлю.

3.3 Комбіновані мережі Li-Fi і Wi-Fi

Li-Fi мережі можна впроваджувати з метою зменшення навантаження на радіочастотні мережі вищого класу, наприклад Wi-Fi. Wi-Fi працює за нераціональною схемою багаторазового доступу шляхом сканування носія й володіє обмеженою пропускною здатністю. На великій площі внутрішньої мережі той самий спектр не піддається повторному використанню з такою ж інтенсивністю, яку мають інфрачервоний і видимий спектри. Тому загальна пропускна здатність Wi-Fi системи обмежена, а швидкість передачі даних користувача падає при надмірній кількості активних пристроїв, що проілюстровано на рис. 3.12.

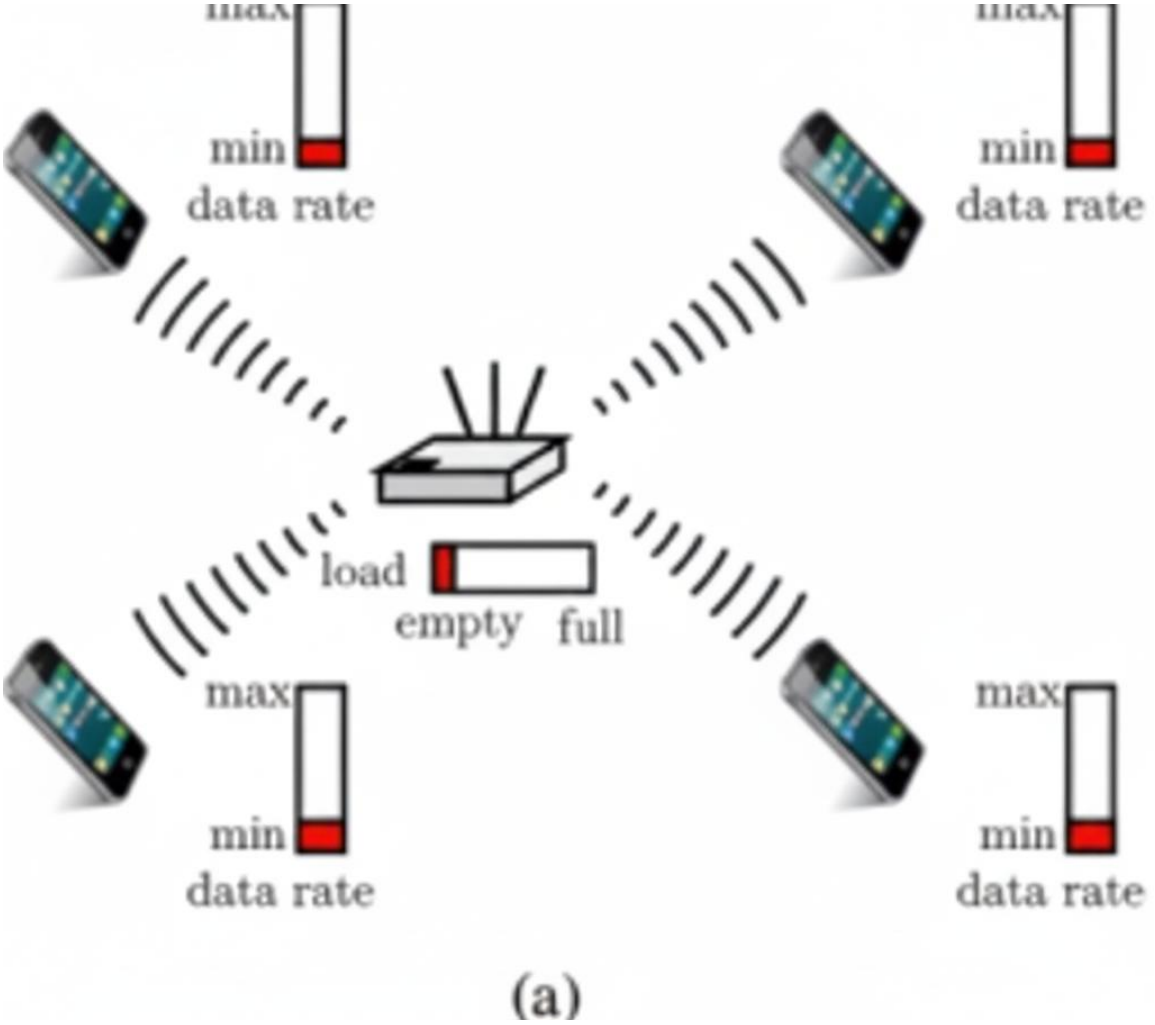


Рис. 3.12 Незалежна Wi-Fi мережа.

На противагу цьому, кожна точка доступу Li-Fi може забезпечити високу швидкість бездротового з’єднання. Однак сильні перешкоди і швидкий рух/поворот UE може привести до того, що зв’язок між UE та точкою доступу Li-Fi стане нестабільним в автономній мережі Li-Fi, як показано на рис. 3.13.

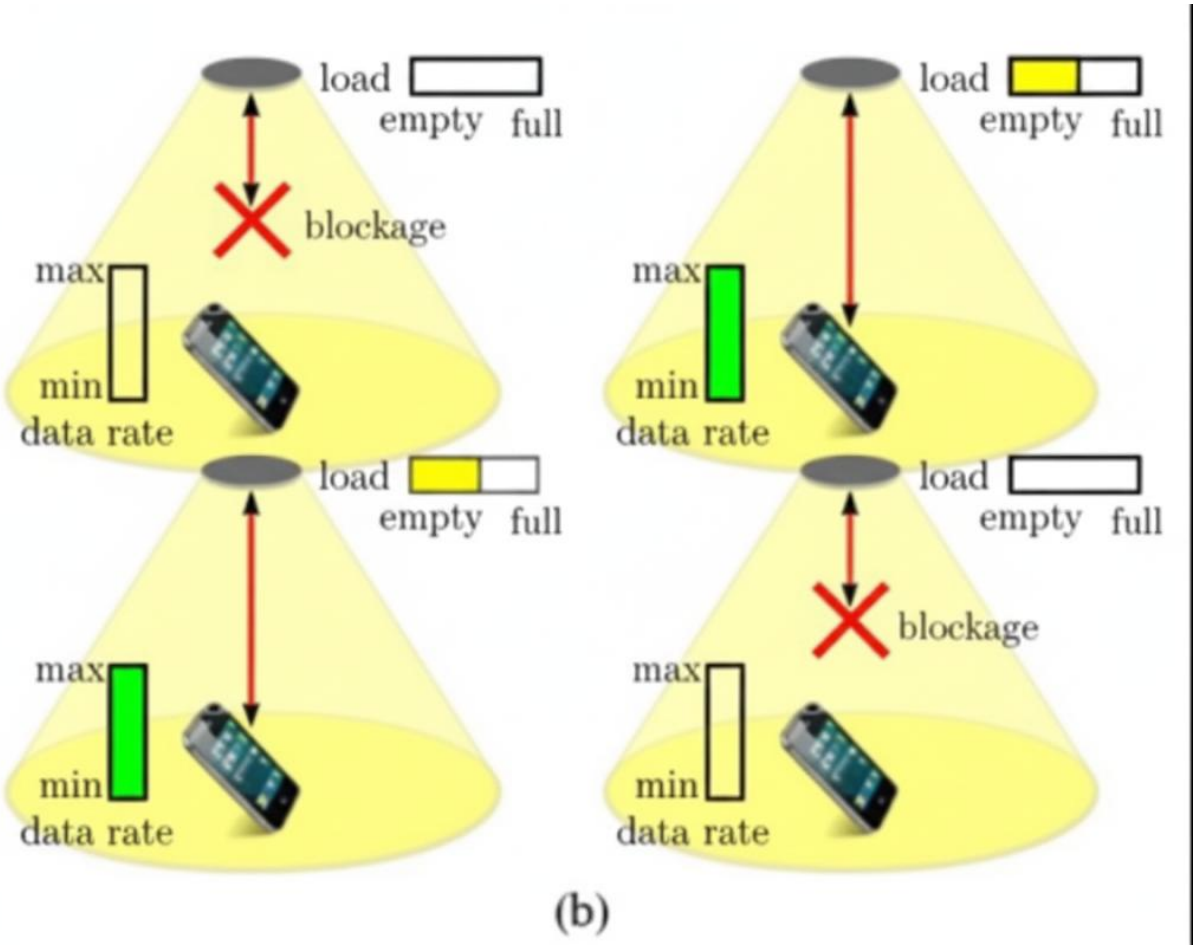


Рис. 3.13 Самодостатня мережа Li-Fi

Отже, поєднання мереж Wi-Fi і Li-Fi потенційно може усунути недоліки кожної з технологій і підвищити загальну продуктивність системи, що ілюструється на рисунку 3.14.

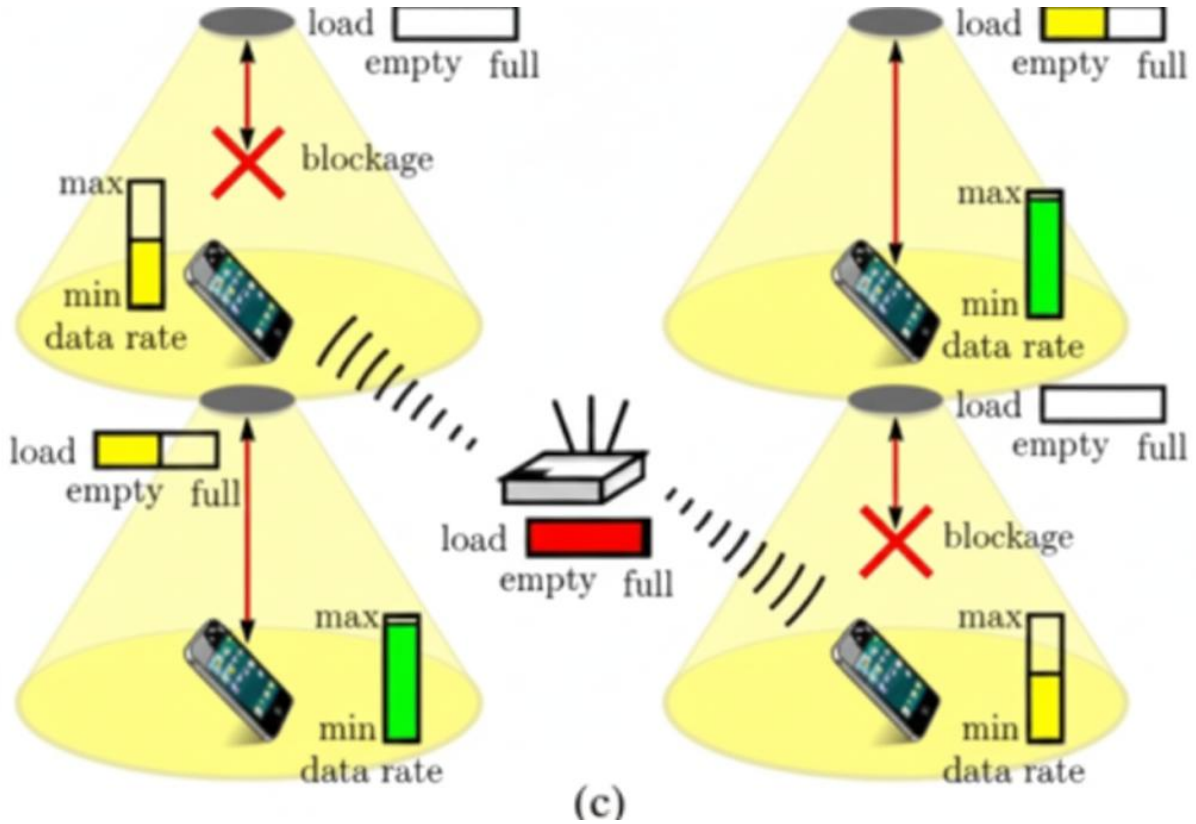
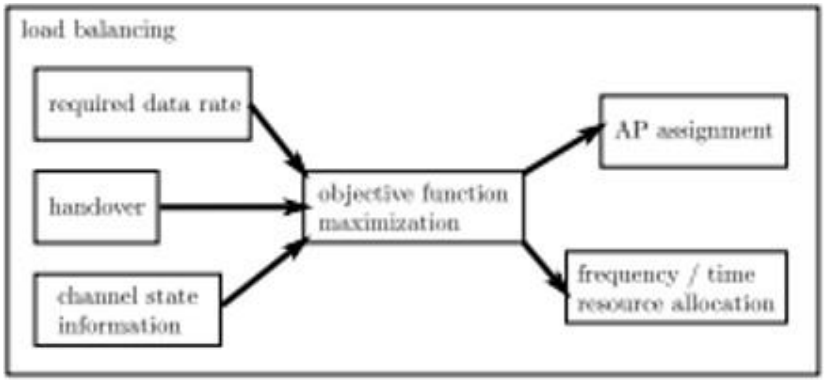


Рис. 3.14 Комбінована мережа Li-Fi/Wi-Fi

У додатку, користувацько-орієнтована архітектура, розроблена для майбутніх дрібноклітинних мереж, спрощує впровадження подібних взаємодій між мережевими технологіями.

Серед ключових проблем гібридної мережі Li-Fi/Wi-Fi — ефективне розподілення навантаження. Враховуючи характеристики каналу, позицію користувача, швидкість та умови навантаження, налаштовується взаємодія AP і розподіл передавальних ресурсів задля максимізації визначеної цільової функції, що ілюстровано на рис. 3.15.



(d)

Рис. 3.15 Розподіл навантаження у гібридному режимі Li-Fi/Wi-Fi мережі

Ціль балансування навантаження у гібридній мережі Li-Fi/Wi-Fi полягає у спільному використанні ресурсів передачі мереж Li-Fi і Wi-Fi. Це породжує складне завдання оптимізації, і для його вирішення розглянуто різні підходи. Ванг представив задачу балансування навантаження у вигляді змішано-цілої нелінійної програмної моделі. Було запропоновано комбінований алгоритм оптимізації та окремий оптимізаційний алгоритм, які здатні знайти оптимальне рішення, проте їхня обчислювальна складність висока. Лі провів нове дослідження з оптимізації балансування навантаження у гібридній мережі VLC/Wi-Fi, у якій активовано комбіновану та векторну передачу в мережі VLC. Однак, обчислювальна складність надзвичайно велика. У подальшому дослідженні Ванга, заснованому на теорії ігор, запропоновано розподілений підхід, який потребує меншої обчислювальної складності, проте дає рішення, що лишається асимптотичною до глобального оптимуму. Цей алгоритм дуже адаптивний при розв’язанні надскладних багатошарових задач оптимізації. Проте, подібний евристичний підхід володіє низькою платоспроможністю, ускладнюючи аналітичну оцінку та доказ оптимальності. Останні дослідження демонструють, що балансування навантаження здійснюється в гібридних мережах Li-Fi/Wi-Fi за динамічних умов із урахуванням руху та обертання UE. Виявлено, що при оптимальних стратегіях балансування навантаження рівень якості послуги користувача може зрости до

80 % у порівнянні з іншими підходами. Зауважте, що якість послуг визначається ступенем задоволеності користувачів, який розраховується як співвідношення швидкості отриманих даних до потрібної швидкості їх передачі. Окрім підвищення продуктивності системних комунікацій, розглянуто й енергоефективне балансування навантаження. Кашеф здійснив дослідження щодо оптимізації балансування навантаження в гібридній мережі RF/VLC з позиції енергоефективності. За результатами, впровадження Li-Fi у гетерогенні радіочастотні мережі може суттєво підвищити енергоефективність, хоча ця сфера вимагає подальшого вивчення.

3.4 Вбудовування LiFi в гібридне програмне забезпечення Li-Fi/Wi-Fi. Тестовий стенд мережй

Для спрощення експериментальної оцінки алгоритмів мережі, зокрема алгоритмів передачі даних, створено тестовий стенд, який зображений на рис. 3.16.

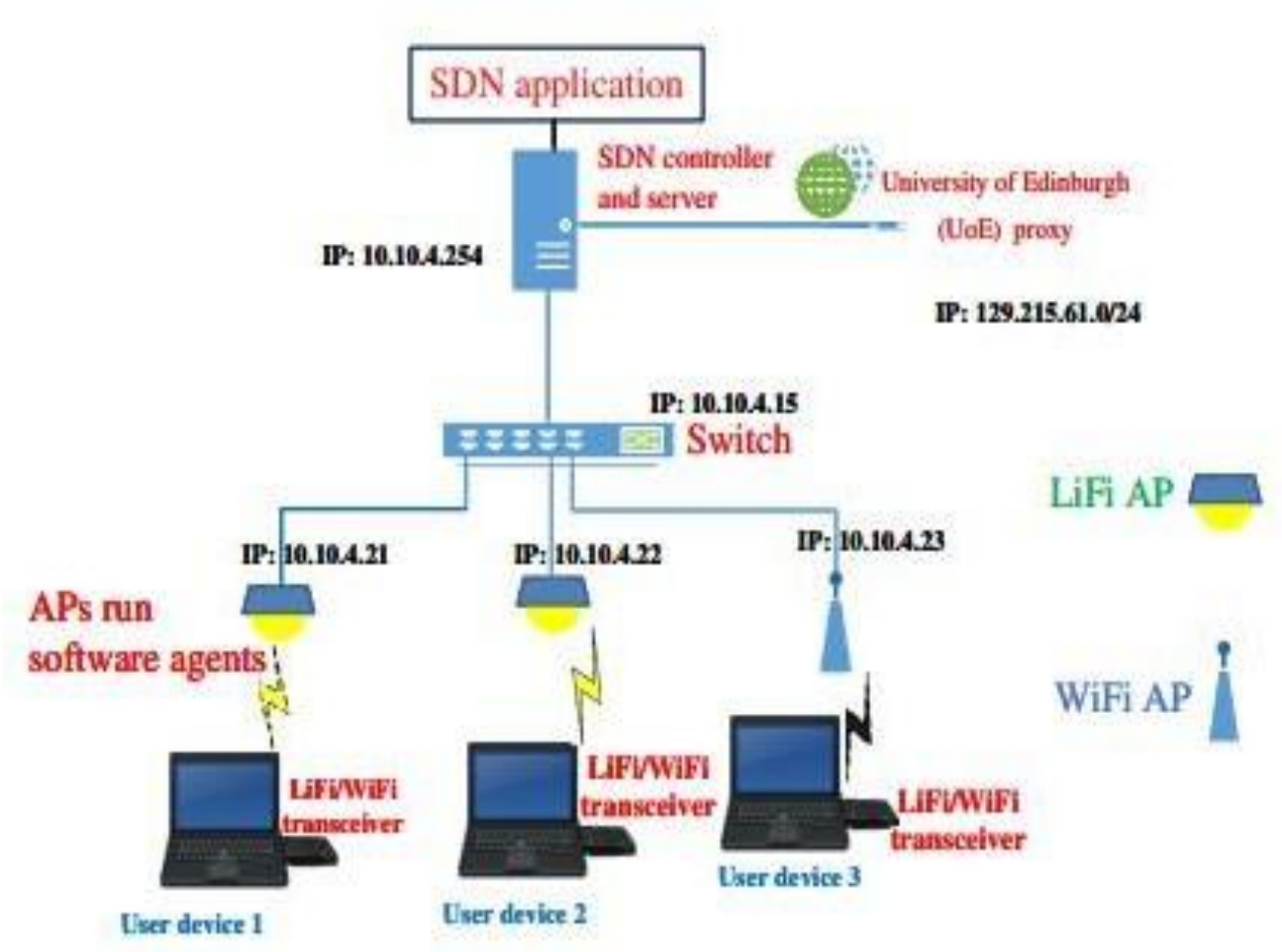


Рис. 3.16 Експериментальна схема випробувань мережі Li-Fi/Wi-Fi з підтримкою SDN, Центр досліджень і розробки LiFi, UoE

Тестовий стенд включає шість Li-Fi attocells і одну Wi-Fi точку доступу. Точки доступу зв'язані між собою комутатором з контролером OpenDaylight централізованої програмно-визначеної мережі (SDN). Керування здійснюється за допомогою SDN-мережі через південний інтерфейс, тоді як служби підтримки у своєму представницькому стані передають інтерфейсні програми на північ. Доступ до Li-Fi і інженерна трафік-програма працює над тестовим стендом, що забезпечує моніторинг і управління мережею, користувацьку мобільність і балансування навантаження. Контролер SDN розгортає програмних агентів на точках доступу, які регулярно надсилають їх стан до контролера. Це, у свою чергу, відображає зібраний стан мережі у створеному додатку для забезпечення зазначених сервісів.

Тестова платформа створює дані про користувачів, мережу, потоки трафік та підтримувані сервіси. Оскільки тестовий стенд забезпечує вертикальну передачу даних між різними Li-Fi та Wi-Fi, можна відстежити потоки даних користувачів під час переходу з Li-Fi на Li-Fi і з Li-Fi на Wi-Wi. Приклад горизонтальної і вертикальної передачі відео високої якості на мобільному пристрої представлено на рис. 3.17.

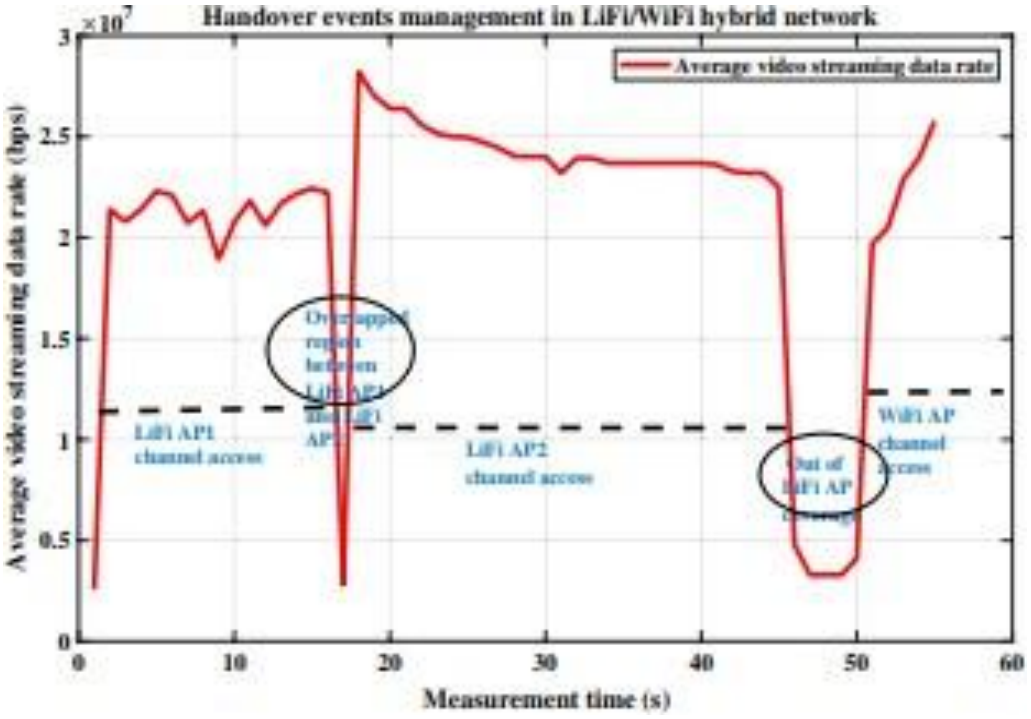


Рис. 3.17 Зареєстрована середня швидкість передачі даних при обміні даними на користувацькому пристрої між Li-Fi і Li-Fi, а також між Li-Fi і Wi-Fi

Мобільний користувач повільно переміщається від центру однієї Li-Fi-точки доступу до іншої, проходячи через зону їх перекриття. Потім він переходить з Li-Fi точки доступу на Wi-Fi точку доступу.

Отриманий попередній результат демонструє, що тривалість горизонтальної передачі даних менша за тривалість вертикальної, згідно з рис. 3.18 Під час обох процесів передачі користувачі стикаються з коротким перериванням обслуговування, проте воно непомітне, оскільки сервіс діє у буферному режимі.

На рис. 3.18 SNR показано, коли користувач відходить від центру точки доступу Li-Fi.

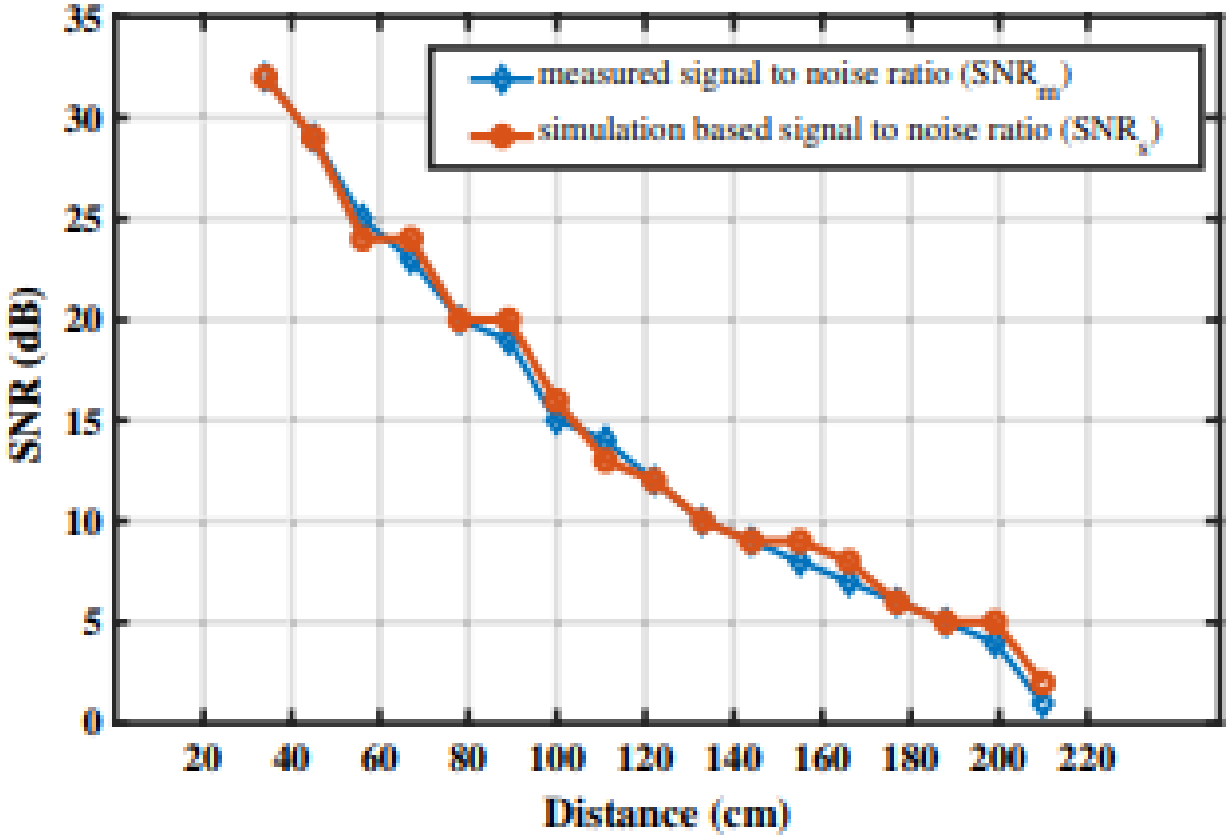


Рис. 3.18 SNR на підставі моделювання та вимірювання при різній під за допомогою Li-Fi

SNR оцінюється за допомогою моделювальної системи рівня та вимірювань. Li-Fi точки доступу створюють високий SNR біля центру клітини, що дозволяє досягти надзвичайно високих швидкостей передачі даних завдяки адаптивній модуляції та кодуючим методам. Це також демонструє просторову обмеженість світлового сигналу, який можна застосовувати для формування дуже щільної бездротової мережі (на відстані 1 м SNR впав на 15 дБ).

3.5 Ємність стільникових мереж Li-Fi

Ємність бездротового зв’язку становить ключовий показник ефективності системи у мережі Li-Fi. Шеннон представив модель ємності каналу, обмежену сумарним каналом передачі, яка передбачає гауссові сигнали та шум. Для

оптичних бездротових систем, що працюють за принципом IM/DD, встановлюються додаткові обмеження на оптичні передавальні схеми, що визначають нові межі пропускної здатності оптичного каналу, сигнали якого мають бути реально вимірюваними та невід'ємними. Декілька досліджень пропонують більш точні оцінки меж пропускної здатності в IM/DD оптичних бездротових системах, використовуючи середню та пікову оптичну потужність, яка обмежується наявністю шуму. Для дослідження мережі Li-Fi розглядаємо електричні сигнали на приймачі після перетворення оптичного сигналу в електричний, які мають біполярний характер, з урахуванням впливу CCI в електричному домені. Тому застосовуємо верхню межу Шеннона для оцінки пропускної здатності каналу мережі Li-Fi. Як показано на рис. 3.19, між верхньою межею, обчисленою рівнянням Шеннона-Хартлі, та фактичною пропускною спроможністю системи Li-Fi існує розрив.

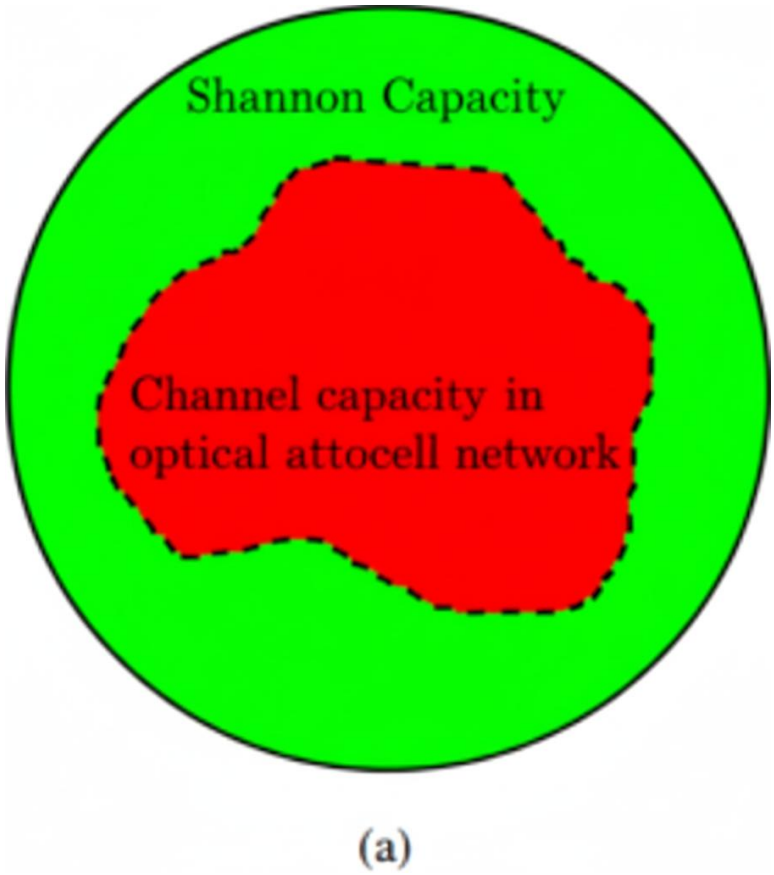


Рис. 3.19 Відношення між максимальною пропускною здатністю за Шенноном і швидкістю каналу в Li-Fi-мережі

Однак ця верхня межа допомагає зрозуміти тенденції й основні взаємозв'язки між параметрами системи та їх впливом на можливу швидкість передачі даних. Тому ми встановлюємо верхню межу посилання Li-Fi як (3.4)

$$C = \frac{1}{2} W \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_0^2 \|H_0\|^2}{\sum_{i \epsilon I} \sigma_i^2 \|H_i\|^2 + W N_0}\right)$$

де W відноситься до модуляції смуги пропускання, σ_i^2 відноситься до дисперсії електричного сигналу від і-го AP, і $\|H_i\|^2$ зсилається на посилення каналу від і-ї точки доступу до потрібного користувача. Ми маємо посилання на сукупність точок доступу, застосовуючи один і той самий канал передачі, що викликає CCI, а N0 представляє двосторонню спектральну щільність потужності шуму. Якщо i = 0, то це подаючий AP. У рівнянні (3.4) раціональний доданок у функції логарифму відповідає відношенню електричного сигналу до інтерференції і шуму (SINR). Чим більше величина SINR, тим вища доступна потужність. Є різні методи підвищення SINR. Якщо приділити увагу формулі SINR, правильним розподілом ресурсів $\sum_{i \epsilon I} \sigma_i^2 \|H_i\|^2$ можна знизити значення CCI. Крім того, доцільно збільшити смугу пропускання модуляції W поза функцією логарифму. Однак завдяки збільшенню W, додаток приросту каналу $\|H_i\|^2$ скорочується через інтерфейс низькочастотних параметрів, і це також призводить до підвищення шуму WN_0. Тому, аби скористатися широкою модуляцією пропускної смуги, потрібні інтерфейсні компоненти зі значним підсиленням каналу у високочастотному діапазоні, а також потужність передачі від визначеної точки доступу має бути адекватною. Як уже зазначалося, величина підсилення каналу визначається не лише елементами інтерфейсу, а й внутрішнім вільним простором, пов'язаним із просторовим розташуванням точок доступу. Чен оцінив ефективність роботи лінійних мереж Li-Fi, аналізуючи різні варіанти їх розгортання. Розгортання комірок за гексагональною схемою та процесом точок Пуассона (PPP) розглядалися як найкращий і найгірший сценарії відповідно з точки зору CCI. Це тому, що у випадку гексагонального стільникового макету між

точками доступу досягається максимальне розмежування, що запобігає появі сильних CCI у межах обмеженої зони по краях клітини. Навпаки, у макеті стільникового зв’язку PPP немає обмежень на відстані між точками доступу, що призводить до значно вираженішої CCI. При умові, що мережа Li-Fi розташована вище існуючої системи освітлення, реальне просторове розміщення ламп навряд чи відповідатиме оптимізованій гексагональній сітці або випадковому макету PPP. Тому розглядаються дві додаткові топології AP, які більше відповідають практичним розгортанням: квадратна сітка та випадковий макет, що слідує процесу хардкорних точок (HCPP), як показано на рис. 3.20.

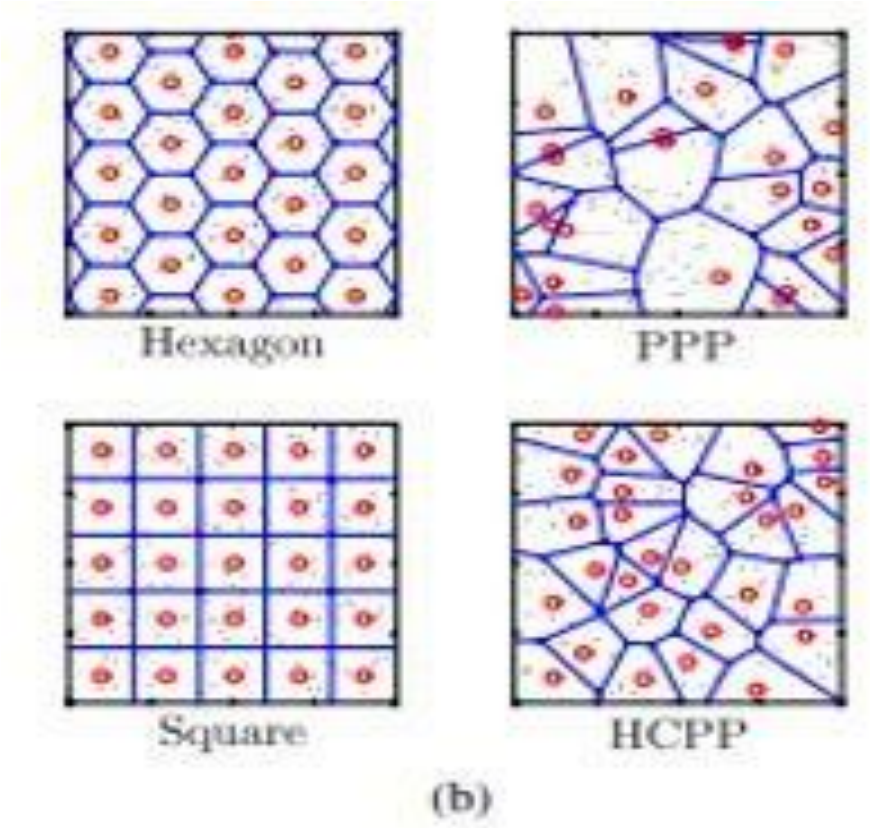


Рис. 3.20 Різноманітні проекти клітин у мережах Li-Fi

Продуктивність нижньої лінії зв’язку мережі Li-Fi при різних конфігураціях точки доступу продемонстровано на рис. 3.21.

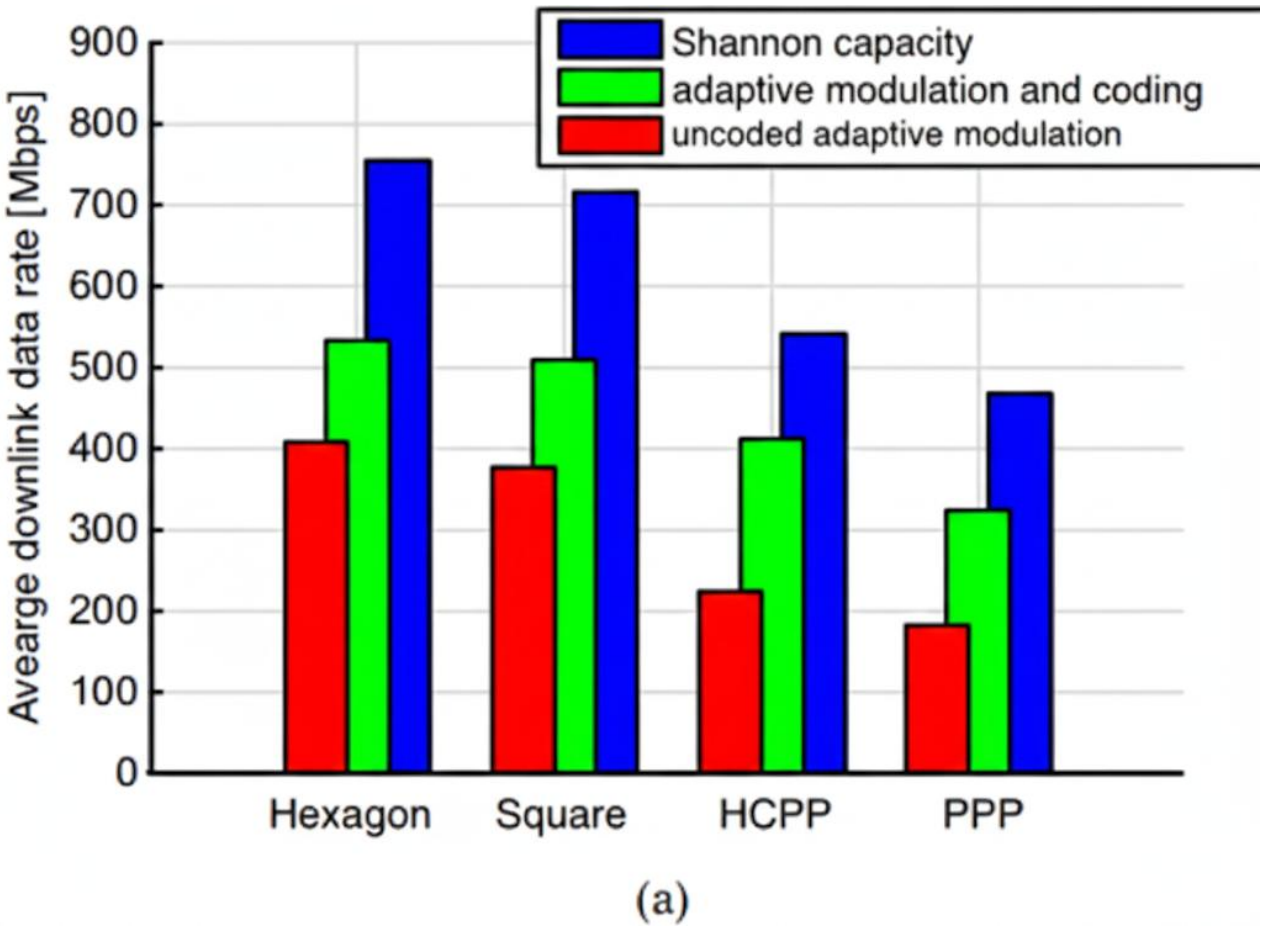


Рис. 3.21 Приклад функціонування нижчої ланки зв’язку у мережі Li-Fi з середнім радіусом клітини 2,5 м та напівпотужним джерелом з напівкутом 40◦

Викладені дані відповідають Li-Fi мережі, що працює зі спектрально-оптичною постійною складовою та модуляцією OFDM. Оцінка швидкості передачі інформації здійснюється на основі практичного білого світлодіода. Отримані результати свідчать, що досягнута середня швидкість передачі даних у спусковому каналі коливається в межах 180-530 Мбіт/с, причому системи з гексагональним та розгортанням комірок PPP забезпечують найвищу і найнижчу швидкість передачі даних. Швидкість, яку забезпечує мережа квадратних сіток, трохи нижча, ніж швидкість, яку забезпечує гексагональна мережа. Швидкість, яку досягає мережа HCPP, перевищує показник мережі PPP, проте відстає від показника мережі квадратних сіток.

Висхідна лінія передачі у Li-Fi викликає певні додаткові складнощі. По-першому, головна проблема – енергоефективність способу модуляції, оскільки функціонування мобільних пристроїв обмежене акумуляторами. Тому методи багатошарової модуляції виглядають найвідповіднішими, оскільки вони забезпечують майже нульове зміщення постійного струму, який є головним споживачем енергії у високошвидкісних режимах IM/DD-системи. По-друге, оскільки мобільний термінал може приймати будь-яку орієнтацію, направлена передача може спричинити значні коливання SNR (відношення сигнал/шум). Лише небагато досліджень присвячені висхідній лінії зв'язку в мережах Li-Fi. Основний підхід, що застосовується для створення надійної висхідної лінії, базується на просторовому різноманітті. Ефективність просторового різноманіття була також продемонстрована в промислових умовах, де надійність становить ключову проблему. У недавньому дослідженні показано, що можна створити всеспрямований передавач для висхідної лінії, використовуючи передавачі принаймні з трьох боків мобільного пристрою.

Застосування Li-Fi у поєднанні з Wi-Fi дозволяє зняти велику частину навантаження з Wi-Fi-мережі, оскільки вона використовує неоптимальну схему багатокористувацького доступу. Також з'єднання користувача з точкою доступу LiFi може виявитися нестабільним через рух користувача чи інші причини, тому оптимальним варіантом є впровадження гібридної конфігурації Li-Fi/Wi-Fi.

Для оптимального розподілу спільних ресурсів застосовується технологія балансування навантаження. Завдяки цьому підходу якість обслуговування користувачів може досягати 80%.

Для визначення пропускної здатності Li-Fi-мережі застосовуємо верхню межу Шеннона як найвищу можливу пропускну спроможність.

3.6 Приклади використання LiFi: полегшення навантаження мережі у класі

Ефективність, безпека, швидкість та інші переваги технології Li-Fi спонукають нас впроваджувати її у різні галузі, щоб зробити буття більш досконалим, зручним і інтерактивнішим. Деякі сфери, у яких ми можемо використати цю технологію, наведені нижче:

Технологія Li-Fi може бути інтегрована з GPS-системою автомобіля, яка отримує повідомлення про дорожній рух від ліхтарів, наприклад дані про аварії, затори, дорожні карти тощо. Крім того, увімкнені передні й задні ліхтарі з підтримкою Li-Fi на транспортному засобі можуть забезпечити зв’язок між машинами.

Можна застосовувати налаштування Plane-lights з Li-Fi, забезпечуючи пасажирам літака швидке з’єднання без електромагнітних перешкод, які заважають спілкуванню на льотній палубі. Крім того, використання Li-Fi скоротить зайву кількість кабелів, що полегшить літак.

Оскільки це система з високим захистом, будь-яка держава може застосовувати Li-Fi для надзвичайно конфіденційної передачі даних.

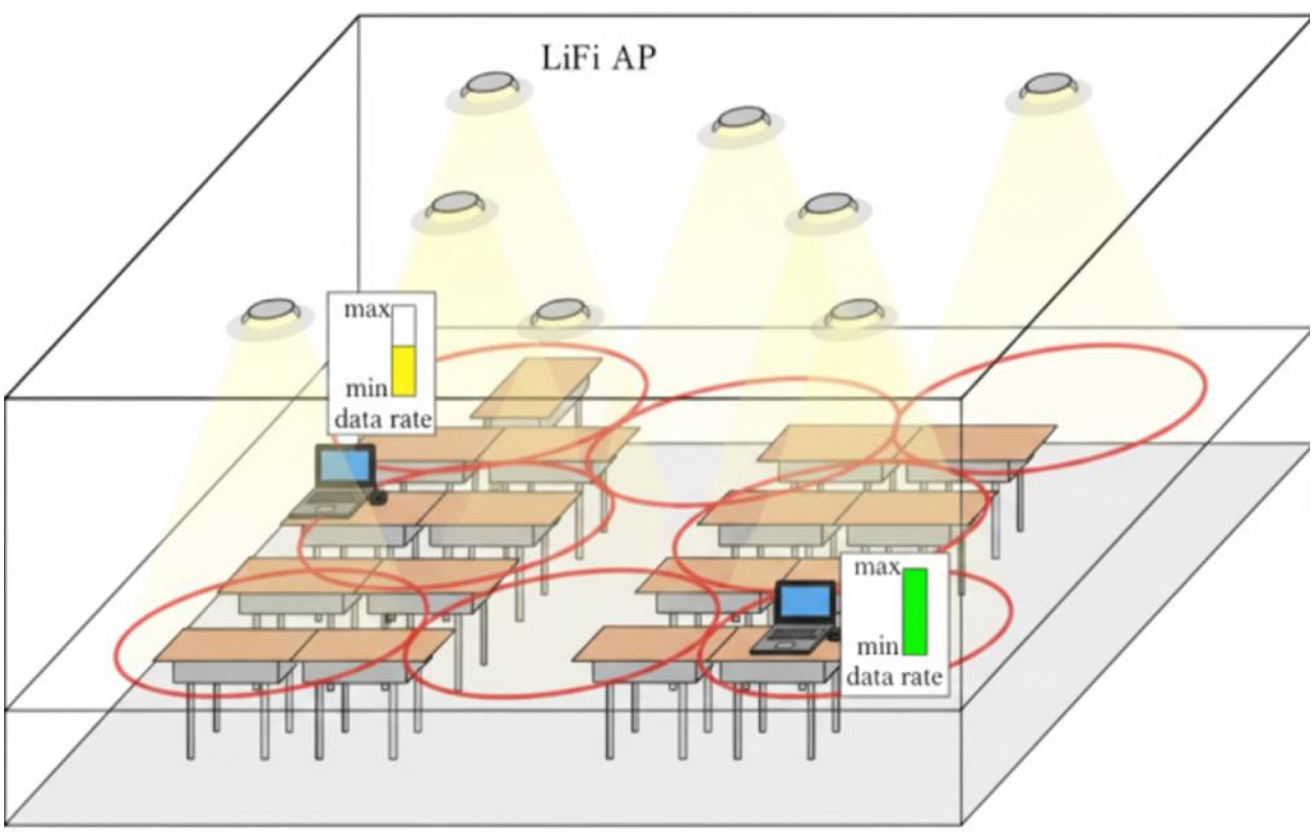
Світло конференц-зали можна застосовувати для збільшення кількості точок доступу, які будуть доступні учасникам під час зустрічі. Отже, чим більше цих точок, тим швидше буде передача та завантаження даних.

Оскільки світло проникає у воду, ми можемо застосовувати Li-Fi для підводного бездротового зв’язку, зокрема в дослідженнях, спілкуванні між суднами, отриманні даних про морські урагани тощо.

Li-Fi спонукає нас задуматися над концепцією "Інтернет всього" — це означає, що ми можемо з’єднати різні предмети в мережі і надати їм особливий інтелект. Перетворюючи систему освітлення в наших будинках на систему з підтримкою Li-Fi, ми можемо підключити всі звичні прилади (холодильники,

пральні машини, духовки тощо), що використовуються в наших будинках, і насолоджуватися свободою віддаленого керування.

Приклад застосування, у якому в приміщенні додатково підключено мережу LiFi до існуючої Wi-Fi. Схема мережі включає вісім пристроїв доступу LiFi



attocell, що видно на рисунку 3.22.

Рис. 3.22 Схема мережевої топології точок доступу Li-Fi у класі 2 та точка доступу Wi-Fi, що обслуговує обидва класи

Точки доступу Li-Fi attocell працюють разом з ще двома точками доступу Wi-Fi, що обслуговують сім навчальних аудиторій. Wi-Fi точки доступу доступні в комерційному сегменті й спираються на стандарт IEEE 802.11ac. Одна Wi-Fi точка може забезпечувати швидкість передачі даних від 300 до 867 Мбіт/с, залежно від режиму та пропускної здатності.

У однокімнатному класі встановлено комерційну систему Li-Fi. Одна Li-Fi-точка доступу охоплює кругову зону діаметром від 2,8 до 3,5 м. Li-Fi-точка працює у повнодуплексному режимі, забезпечуючи багатокористувацьке підключення і інтернет-трафік між усіма розташованими точками. Кожна Li-Fi-точка здатна одночасно обслуговувати до восьми користувачів із сумарною швидкістю до 43 Мбіт/с. У цілому це забезпечує максимальну сумарну пропускну здатність 344 Мбіт/с у класі. Варто зазначити, що швидкість Li-Fi-точки значно менша порівняно зі швидкістю VLC, зазначеної в лабораторних випробуваннях. Головна причина — використання готових, не модифікованих LED-світильників, чия електрична смуга пропуску становить близько 2 МГц. У майбутніх оновленнях планується вбудовування замовлених оптичних елементів у світильники, що дозволить досягти швидкостей 1-10 Гбіт/с. Для цього знадобляться окремі світильники, які можуть здійснювати довжини хвильного мультиплексування.

Розгортання LiFi-точок доступу стикалося з обмеженнями через наявні люмінесцентні лампи та встановлені датчики пожежі/димові. Пристрої Li-Fi розташувалися поруч з вже існуючою інфраструктурою. Через це в приміщенні залишилися зони з недостатнім покриттям Li-Fi. На рисунку 8.1 представлено конфігурацію мережі. Тому передбачається, що ефективність користувача буде залежати від його розташування. У ідеальному варіанті LiFi-точки замінять поточне освітлення і будуть налаштовані згідно з планом приміщення, щоб досягти оптимального балансу між освітленням і зв’язком. З цією метою здійснили вимірювальне дослідження, порівнявши продуктивність мереж Li-Fi і Wi-Fi, а також оцінюючи сумарну швидкість передачі даних. Швидкість передачі даних користувачів слугує показником ефективності. Група з 22 учнів одночасно підключилася до Li-Fi, тоді як два сусідніх класи користувалися лише Wi-Fi. Кількість учнів у цих класах була однаковою. Два випробування виконувалися, використовуючи найкращі можливі результати передачі даних при різних цільових швидкостях передачі даних:

- бажана пропускна здатність становить 1 Мбіт/с на одного користувача,
- бажана швидкість передачі даних — 3 Мбіт/с на одного користувача.

Кумулятивна функція розподілу (CDF) швидкості даних користувача, отримана мережею Li-Fi та Wi-Fi, зображена на рис. 3.22 для цільових швидкостей передачі 1 і 3 Мбіт/с, тоді як на рис. 15 наведені швидкості даних без цільового показника.

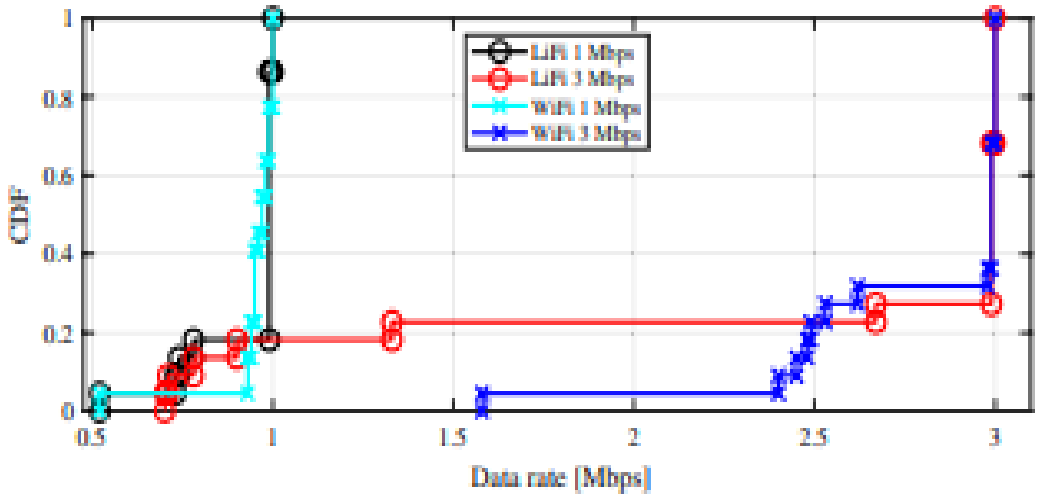


Рис. 3.22 CDF швидкості передачі даних для користувачів Wi-Fi та Li-Fi, що працюють на запланованих швидкостях передачі даних 1 Мбіт/с і 3 Мбіт/с

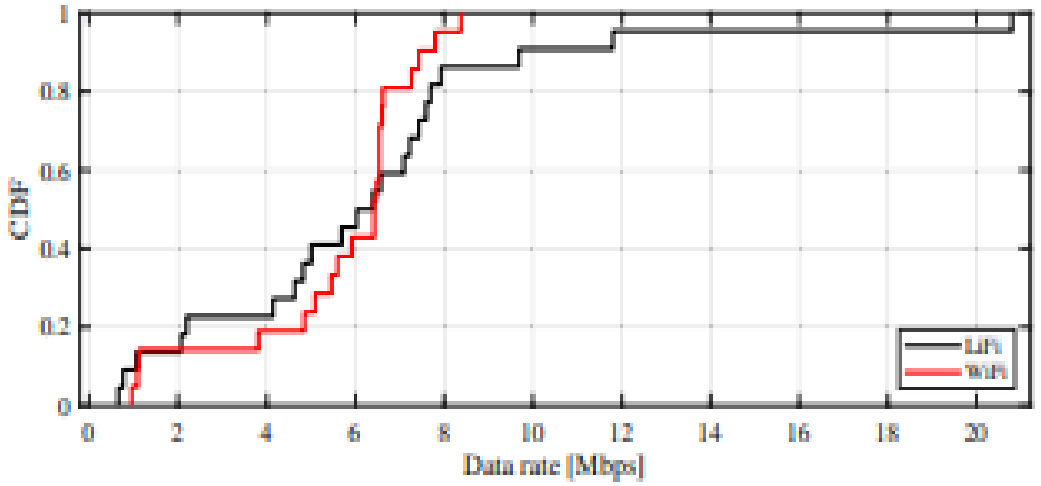


Рис. 3.23 Кумулятивна функція розподілу швидкості передачі даних для користувачів Wi-Fi і LiFi, коли цільова швидкість передачі даних не встановлена

Результати на рис. 3.22 показують, що більшість користувачів досягають цільової швидкості передачі даних. Однак, деякі користувачі не досягають цільової швидкості передачі даних через неоптимальне розташування точок доступу Li-Fi. Рис. 3.23 демонструє, що в мережі Li-Fi є користувачі зі швидкістю передачі даних до 20 Мбіт/с. Це також показує, що пікова швидкість передачі даних користувача в мережі Li-Fi вища, незважаючи на те, що максимальна швидкість передачі даних для даної точки доступу Li-Fi становить приблизно в 10 разів нижче, ніж максимальна швидкість передачі даних розгорнутої точки доступу Wi-Fi. Середні швидкості передачі даних для мереж Li-Fi та Wi-Fi показані в Таблиця 3.2.

Таблиця 3.2

Визначена середня швидкість передавання даних для мереж Wi-Fi та Li-Fi

Бажана швидкість передачі даних користувача	Середнє значення швидкості передачі даних Li-Fi користувача	Середня швидкість передачі даних Wi-Fi користувача
Найкращий результат	6,24	5,57
1 мегабіт/сек	0,94	0,95
3 мегабіт/сек	2,5	2,79

Отримані дані свідчать, що мережа Li-Fi перевищує показники Wi-Fi за середньою швидкістю передачі даних при максимальному навантаженні, що також продемонстровано на рис. 3.23 Проте вони також вказують, що Li-Fi трохи відстає від Wi-Fi, коли цільова швидкість становить 3 Мбіт/с. Це пов’язано з низькою швидкістю, досягнутою через не зовсім ефективне обладнання користувача, розташоване у межових ділянках Li-Fi attocell та в областях мертвих точок класу.

Непрямим, проте досить помітним результатом цього дослідження концепції-доказу стало спостереження різкого зростання швидкості передачі даних у сусідніх навчальних кабінетах, де працює лише Wi-Fi. Це зумовлено перенесенням частини трафіку в Li-Fi. Збільшення швидкості передачі даних у сусідніх класах подано на рис. 3.24 для різних цільових швидкостей передачі.

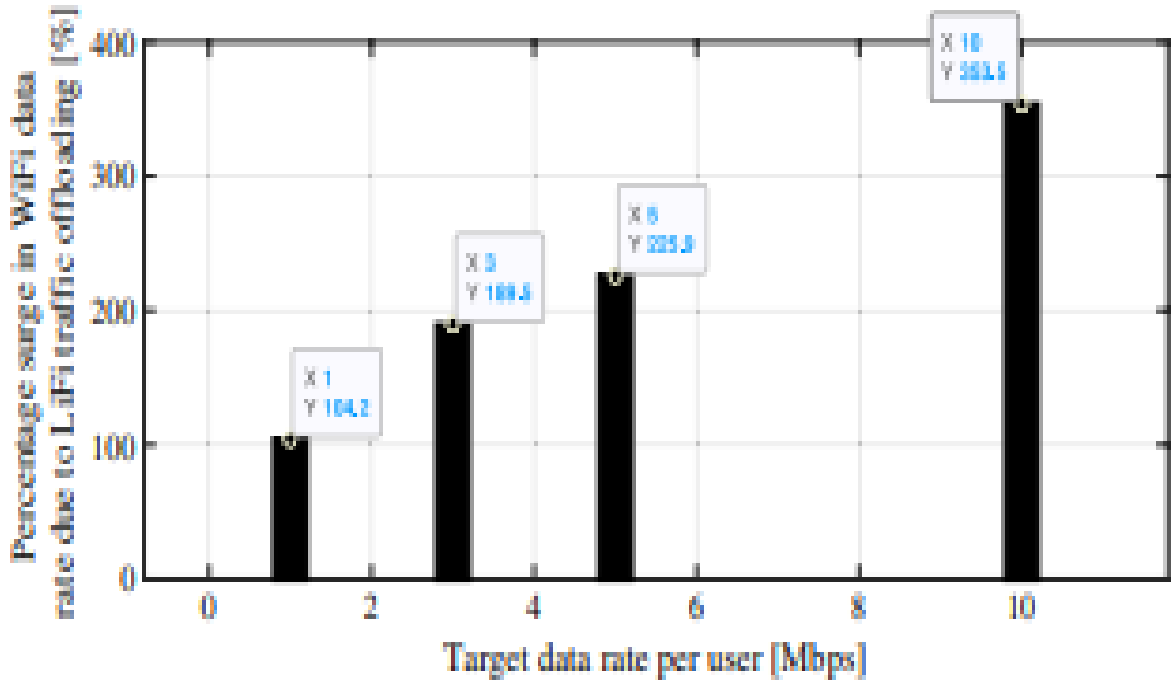


Рис. 3.24 Підвищення швидкості агрегованих Wi-Fi даних у прилеглих класах.

Це демонструє можливість мережі Li-Fi зменшувати навантаження трафіку. Ця можливість особливо корисна у густонаселених середовищах, наприклад школах і аеропортах. Результати також показують, що підвищення частоти повторного використання можливе на невеликій площі – в даному випадку в класі.

Завдяки своїм сильним сторонам технологія Li-Fi може знайти окремі специфічні сфери застосування – у поєднанні з GPS-системою, що дозволить водіям отримувати дані про дорожню обстановку; у літаку для забезпечення пасажирів інтернет-доступом, оскільки Li-Fi не викликає електромагнітних завад

для навігаційного зв’язку; для конфіденційного обміну інформацією, бо мережа LiFi має високий рівень захисту; зручно застосовувати в інтернеті речей, оскільки точки доступу розташовані по всьому будинку і забезпечують практично всім пристроям стабільне підключення, що, у свою чергу, полегшує керування цими пристроями; для підводного бездротового зв’язку, зв’язку між суднами, оскільки світло проникає у воду.

Дослідження впровадження Li-Fi в одному з навчальних приміщень продемонструвало, що Wi-Fi в цьому випадку значно знизив навантаження, що призвело до підвищення швидкості передачі даних у сусідньому класі, де використовується лише Wi-Fi.

ВИСНОВКИ

Як видно, у майбутньому можна створювати мобільні мережі, спираючись на оптичний зв’язок у відкритому просторі. У цьому підході наголошується, що для реалізації задуму оптичний простір має перейти від збільшення швидкості передачі даних на рівні каналу VLC до підвищення щільності даних у бездротовій інфраструктурі. Продемонстровано, що Li-Fi здатний суттєво підвищити ефективність Wi-Fi, розвантажуючи його трафік. Це відкриває можливість збільшити швидкість передачі даних, яка наразі досягається лише у волоконно-оптичних лініях до кінцевих користувачів, а саме наших мобільних пристроїв. Проте реалізація цієї ідеї вимагатиме появи нових оптичних компонентів. Поки що варто зазначити, що поєднання Li-Fi з Wi-Fi дозволяє значно підвищити щільність передаваних даних, лише тому, що Li-Fi поступово підвищує ущільнення комірок і забезпечує повторне використання передавальних ресурсів. Це важливий аспект, враховуючи зростаючу кількість пристроїв, які мають підключатися до мережі. Мобільні гаджети, що стануть наступною ерою після смартфонів, потребуватимуть постійного підвищення швидкості передачі, зменшення затримки та підвищення енергоефективності, зокрема у пристроях доповненої та віртуальної реальності. Крім того, з’являться ще більш розумні машинні пристрої та безліч сенсорів у майбутніх розумних будинках і містах, які будуть покладатися на стабільне і високошвидкісне бездротове підключення. У комерційному контексті, Li-Fi активізує індустрію освітлення, щоб розширити свої бізнес-моделі на індустрію зв’язку, і навпаки. Li-Fi створює суттєві економічні перспективи, проте водночас існує багато захоплюючих наукових

викликів щодо вдосконалення системи Li-Fi, аби повністю використати величезний обсяг неліцензованого спектру в інфрачервоній та видимій ділянках.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Леба, М., С. М. Ріуреан і А. К. Іоніка, Li-Fi - шлях до нового способу зв'язку, у CISTI2017: Лісабон, Португалія. с. 1-6.

2. Хан, Л. У., Видиме світлове зв'язку: застосування, архітектура, стандартизація та наукові виклики. Цифрові комунікації та мережі, 2017. 3(2): с. 78-88.

3. Альбрахім, Л. І., Л. Х. Алхудайті, А. А. Альдхафіан, М. Р. Альдхафіан і Г. М. Балівах, Створення ієрархічної архітектури Інтернету речей на основі Li-Fi. IEEE Access, 2018. 6: с. 40811-40825.

4. Прадхан, Дж., В. К. Каппала і С. К. Дас, Аналіз продуктивності системи Li-Fi за умов амбієнтного світла, у NCC2020: Харагпур, Індія. с. 1-6.

5. Абід, С. М. Т., С. Хабір, М. А. Хасан, А. Саха та М. Масудуззаман, Технологія Li-Fi: збільшення дальності Li-Fi за допомогою дзеркала. International Journal of Information Technology and Computer Science, 2019. 11(1): с. 50-57.

6. Чевік, Т. і С. Йільмаз, Огляд систем видимого світла. Міжнародний журнал комп'ютерних мереж і зв'язку, 2015. 7(6): с. 139-150.

7. Васан, С., Основи фотоніки та оптики. 2004, Trafford Publishing.

8. Саркар, А., С. Агарвал, та А. Нат, Технологія Li-Fi: передача даних через видиме світло. Міжнародний журнал передових досліджень з комп'ютерних наук та управлінських студій, 2015. 3(6): с. 3-10.

9. Шарма, Р. Р., Раунак та А. Санганал, Технологія Li-Fi: передача даних через світло. Міжнародний журнал комп'ютерної техніки та застосувань, 2014. 5(1): с. 150-154.

10. Санусі, Дж., А. М. Айбіну, С. Адешіна, Г. Койунлу і С. Ідріс, Огляд передачі в режимі переадресації в мережах Li-Fi та Wi-Fi, у ICCNCT2019: Коймбатор, Індія. с. 955-964.

11. Арінзе, С. Н., Г. Н. Онох і Д. О. Абоні, Порівняння мережевої продуктивності технологій передачі даних за допомогою світлодіода та бездротових технологій. Міжнародний журнал передових наукових та технічних досліджень, 2020. 1(10): с. 14-24.

12. Маджід, А. Ф. та І. А. Мурдас, Новий дизайн для системи моніторингу здоров'я на основі Li-Fi. International Journal of Intelligent Engineering & Systems, 2019. 12(6): с. 59-70.

13. Радж, Б. Д., Б. С. Ракеш, Н. Авінаш, К. Балакрішнан та С. Басавараджу, Видимий спектр за допомогою оптичного зв'язку. Перспективи в комунікаціях, вбудовані системи та обробці сигналів, 2018. 2(7): с. 153-156.

14. Лю, СВ., Б. Садегі, і Е. В. Найтлі, Можливості включення видимих світлових комунікацій (V2LC) мереж, у VANET2011: Лас-Вегас, Невада, США. с. 41-50.

15. Коміне, Т. і М. Накагава, Фундаментальний аналіз системи зв'язку через видиме світло з використанням світлодіодів. IEEE Transactions in Consumer Electronics, 2004. 50(1): с. 100-107.

16. Палл, М. Л., Wi-Fi - важлива загроза здоров'ю людини. Екологічні дослідження, 2018. 164: с. 405-416.

17. Хаас, Х., LiFi - технологія 5G як парадигма. Огляд в фізиці, 2018. 3: с. 26-31.

18. Абдалла, А. М., Х. Родрігез, І. Ельфергані та А. Тейшейра, Оптична та бездротова конвергенція для мереж 5G. 2019, Wiley-IEEE Press.

19. Джордж, Р., С. Вайдьянатан, А. С. Раджпут і К. Діпа, LiFi для міжавтомобільного зв'язку - огляд. Procedia Computer Science, 2019. 165: с. 25-31.

20. Валковскі, Т. і К. Димитров, Низькобюджетне лабораторне середовище для використання оптичних методів передачі аудіосигналів, у ICEST2020: Ніш, Сербія. с. 65-68.

21. Госвамі, П. і М. К. Шукла, Проектування Li-Fi трансивера. Бездротова інженерія та технологія, 2017. 8(4): с. 71-86.

22. Cailean, A., Etude et realisation d’un systeme de communications par lumiere visible (VLC/LiFi). Application au domaine automobile. 2014, Optique/photonique. Universite de Versailles Saint-Quentin en Yvelines.