

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій і технічного захисту інформації
(повна назва)

Кафедра Радіотехнологій інформаційно комунікаційних систем
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження роботи каналу зв'язку
безпроводної комунікаційної технології Li-Fi
(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи ІРТМ-22-1

Луб'янка А.О.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і повна назва спеціальності)

Освітня програма Інформаційних радіотехнологій

(повна назва освітньої програми)

Керівник д.т.н., проф. Цопа О.І.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

В.о. зав. кафедри

(підпис)

Зрудний О.А.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіо технологій і технічного захисту інформації

Кафедра Радіотехнологій інформаційно комунікаційних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і повна назва)

Освітня програма Інформаційних радіотехнологій

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Луб'янка Андрій Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження роботи каналу зв'язку безпроводної комунікаційної технології Li-Fi.

затверджена наказом університету від 20.10.2023 р. № 1221Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 8 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи:

літературні джерела та електронні ресурси за темою кваліфікаційної роботи

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

перелічити назви всіх розділів роботи від вступу до додатків (див. зміст)

Вступ. 1 LI-FI ТЕХНОЛОГІЯ – ПРИНЦИПИ РОБОТИ І ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ 2 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МЕРЕЖІ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ Li-Fi 3. ПОБУДУВАННЯ ОПТИЧНОЇ ЛОКАЛЬНОЇ ЗАВАДОСТІЙКОЇ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ. Висновки. Перелік джерел посилання. Додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____

Комп'ютерна презентація

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина			

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз принципів роботи і області застосування Li-Fi	21.10.23- 29.10.2023	вик.
2	Вибір обладнання для мережі бездротового зв'язку Li-Fi	30.10.2023-10.11.2023	вик.
3	Побудування оптичної локальної завдостійкої мережі	11.11.2023-20.11.2023	вик.
4	Висновки	21.11.2023-15.12.2023	вик.
5	Оформлення пояснювальної записки	16.12.2023-07.01.2024	вик.
6	Представлення роботи на кафедрі	8.01.2024	вик.

Дата видачі завдання 20 жовтня 2023 р.

Студент _____ (підпис) Луб'янко А.О. (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ (підпис) проф. Цопа О.І. (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи магістра містить 67 сторінок тексту, 20 рисунків, 22 джерела посилань, 2 додатки.

ТЕХНОЛОГІЯ. ПОБУДОВА. СИСТЕМА. РЕАЛІЗАЦІЯ.
ЕМУЛЯЦІЯ. ШВИДКІСТЬ. ПЕРЕДАЧА. ДАНІ.

Предметом дослідження є технологія двонаправленого бездротового зв'язку Li-Fi.

Мета роботи – Побудування оптичної локальної заводостійкої мережі зв'язку.

У наслідок виконаної роботи Проведена оцінка більш вдосконаленої та ефективної моделі системи Li-Fi. Проаналізовані переваги використання системи. Виконано моделювання систем за різними параметрами. Проведено перевірка продуктивності.

Результати дослідження можуть бути використані для побудування оптичної локальної заводостійкої мережі зв'язку.

ABSTRACT

The explanatory note of the master's thesis contains 67 pages of text, 20 figures, 22 reference sources.

TECHNOLOGY. CONSTRUCTION. SYSTEM. IMPLEMENTATION.
EMULATION. SPEED. TRANSMISSION. DATA.

The subject of the research is the technology of bidirectional wireless communication called Li-Fi.

The objective of the work is to construct an optical local interference-resistant communication network.

As a result of the performed work, an evaluation of a more advanced and efficient Li-Fi system model has been conducted. The advantages of using the system have been analyzed. The systems have been simulated under various parameters, and performance verification has been carried out.

The research findings can be utilized in the construction of an optical local interference-resistant communication network.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І СКОРОЧЕНЬ..	7
ВСТУП.....	8
1 Li-Fi ТЕХНОЛОГІЯ – ПРИНЦИПИ РОБОТИ І ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ...	10
1.1 Принцип роботи системи Li-Fi.....	10
1.2 Область застосування	13
1.3 Переваги використання системи у водному середовищі.....	17
2 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МЕРЕЖІ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ Li-Fi.....	24
2.1 Автоматизована система підводного бездротового зв'язку з використанням технології Li-Fi та підтримкою Інтернету речей (IoT) та GPS-позиціонуванням	24
2.2 Технологія Li-Fi как альтернатива Wi-Fi.....	30
2.3 Мережі Li-Fi: можливості і перспективи.....	34
2.4 Перетворення повідомлення на сигнал.....	37
2.5 Канали передачі дискретної інформації	41
2.6 Висновки по розділу 2.....	44
3 ПОБУДУВАННЯ ОПТИЧНОЇ ЛОКАЛЬНОЇ ЗАВАДОСТІЙКОЇ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ	45
3.1 Програмне забезпечення для емуляції Li-Fi.....	45
3.2 Взаємодія світла з дзеркалом і лінзою.....	49
3.3 Впровадження комплексної системи Li-Fi за допомогою Simulink® ..	50
3.4 Модель Li-Fi системи з дзеркалом у Simulink®	51
3.5 Модель Li-Fi системи з тонкою збільшувальною лінзою в Simulink®	51
3.6 Модель Comprehensive Li-Fi системи в Simulink®.....	52
3.7 Перевірка продуктивності.....	53
3.8 Висновки по розділу 3.....	56
ВИСНОВКИ.....	57
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	60
Додаток А – КОПІЇ ПРЕЗЕНТАЦІЇ.....	65
Додаток Б – ВІДОМОСТІ АТЕСТАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ	72

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ,
ОДИНИЦЬ І СКОРОЧЕНЬ

Li-Fi – Light Fidelity

Wi-Fi – Wireless Fidelity

LED – Light Emitting Diode

FBG – Fiber Bragg Grating

ВСТУП

Питання якісного проведення наукових досліджень в галузі океанології та океанографії завжди стоїть на першому місці при вивченні світового океану. Для нікого не секрет, що на сьогоднішній день рівень розвитку технологій надає неімовірних можливостей для нових досліджень, кожен день створюючи нові методи та рішення завдань, що стоять перед науковою спільнотою.

І якщо розвиток технологій, які для звичайних людей вже є базовими потребами, не стоїть на місці, то не повинен стоїти на місці і розвиток систем і пристроїв, якими користуються сучасні океанологи.

Різноманіття методів спеціальних океанологічних досліджень на сьогоднішній день є величезним. Більшість з них мають різні системи передачі даних, але не всі з них можуть працювати під водою.

Деякі системи, наприклад, на основі радіохвиль, не можуть працювати під водою, оскільки вода знищує радіохвилі, і деякі, наприклад кабель-трос, до певної міри обмежують маневреність системи.

Також існує можливість передачі інформації через підводний звуковий канал, що дозволяє передавати дані на великі відстані, оскільки швидкість звуку в ПЗК набагато вища, ніж швидкість звуку поза каналом. Проте, незважаючи на те, що ці способи добре вивчені і вже завоювали довіру в науковому середовищі, можна розглянути інший спосіб передачі даних, який має великий потенціал для застосування одночасно як у водному, так і в повітряному середовищі.

Таким способом може бути передача даних за допомогою системи передачі даних через світловий канал (Visible Light Communication – VLC) – технологія Light-Fidelity або Li-Fi технологія.

Li-Fi – це технологія бездротового зв'язку, яка використовує інфрачервоний та видимий спектр світла для високошвидкісної передачі даних. Ця комунікаційна технологія є двонаправленою і, на відміну від радіохвиль у Wi-Fi, може бути використана під водою.

Актуальність. Li-Fi - це технологія двонаправленої бездротової передачі даних, яка може використовувати інфрачервоний та видимий спектр світла для передачі даних з одного пристрою на інший.

Оскільки цей спосіб передачі даних може бути використаний під водою, визначення потенціалу використання подібного способу є дуже актуальною задачею на сьогоднішній день.

Мета роботи. Визначення напрямків використання систем Li-Fi для апаратно-комплексних систем океанологічних досліджень.

Завдання:

- Розглянути принцип роботи системи Li-Fi та області її застосування;
- Виявити особливості роботи системи Li-Fi під водою;
- Провести аналіз впливу оптичних властивостей води на роботу системи;
- Визначити ефективність роботи системи;
- Розробити схему системи;
- Аналіз отриманих результатів.

Об'єктом дослідження є (Каспійське море) як середовище для передачі світлового випромінювання.

Предметом дослідження є технологія двонаправленого бездротового зв'язку Li-Fi.

Структура роботи: Вступ, Основна частина роботи складається з трьох розділів та двадцяти дев'яти підрозділів, висновки та список використаної літератури.

1 LI-FI ТЕХНОЛОГІЯ – ПРИНЦИПИ РОБОТИ І ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ

1.1 Принцип роботи системи Li-Fi

Основою роботи системи Li-Fi є передача даних через світловий канал - будь то видимий спектр світла або інфрачервоне випромінювання. Загалом, канал зв'язку створюється між передавачем (джерелом світла або випромінюванням) та фотодетектором. Швидкість передачі даних повною мірою залежить від використовуваної технології освітлення та цифрової модуляції сигналу. У ролі технологій освітлення в першу чергу розглядають світлодіоди (LED-лампи), RGB-лазери та діоди інфрачервоного випромінювання (RGB-діоди) (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 - Типи світлових елементів

Для ведучих LED-ламп використовуються сині світлодіоди з фосфорним покриттям, галієвінітридні мікросвітлодіоди та RGB-кольорові LED-лампи. Під кольоровими лазерами розуміють лазерні випромінювачі, оптоелектронні компоненти, що включають напівпровідникові лазерні діоди та лазерні модулі з вбудованими схемами управління.

Щодо інфрачервоного випромінювання, принцип роботи залишається схожим. Є передавач і приймач, а також система кодування інформації. Традиційним методом передачі інформації через інфрачервоний порт є набір стандартів, описаних для протоколів фізичного і логічного рівня передачі даних за допомогою інфрачервоного випромінювання (IrDA). Проте існують інші методи передачі даних через інфрачервоне випромінювання, наприклад, відомий всім

спосіб керування телевізором за допомогою пульта, який використовує інфрачервоне випромінювання. Цей метод особливо практичний для дистанційного керування пристроями в місцях, де можлива пряма лінія видимості між передавачем і приймачем, такими як телевізори та інші пристрої.

Проте, цей метод не є ефективним для роботи на великих відстанях через фізичні та оптичні властивості води та самого інфрачервоного випромінювання.

Сині LED-лампи складаються з потужного синього світлодіода з фосфорним покриттям, яке перетворює синє світло в жовтувате. Коли синє світло і жовтувате світло поєднуються, світло стає білим. Зараз це найекономічніший метод отримання білого світла, але процес заміни кольорового світла на біле сповільнює резонанс частоти, тобто високі частоти значно згасають. Таким чином, полоса пропускання подібних світлодіодів знаходиться лише в області 2 МГц. Однак використання методів фільтрації світла може допомогти досягти швидкості передачі даних до 1 Гбіт в секунду. Більш розвинені кольорові світлодіоди червоного, зеленого і синього (RGB) освітлення забезпечують швидкість передачі даних до 5 Гбіт/с, оскільки вони виробляють біле світло шляхом змішування основних кольорів, а не за допомогою хімічних змін кольору. Були продемонстровані швидкості передачі даних на одному мікросвітлодіоді 8 Гбіт/с, і було показано, що досягнення 100 Гбіт/с є досить ймовірним за допомогою лазерного освітлення.

У розглянутих технологіях Li-Fi існують певні міфи та недорозуміння. Спершу, багатьох цікавить, як працює ця технологія під сонячним світлом. Сонячне світло створює постійний завадний сигнал поза діапазоном частот, використовуваним для модуляції даних в Li-Fi, які, як правило, перевищують 1 МГц. Тому сонячне світло може бути видалено за допомогою електрофільтрів.

Додатковим ефектом сонячного світла є підвищений світловий шум, який не може бути легко усунутий за допомогою оптичних фільтрів. В дослідженні впливу шуму було докладно вивчено і виявлено, що швидкість передачі даних зменшується на 1,5% і 4,5% в залежності від розміру сенсорів, які становлять

0,19 мм² і 2 мм² відповідно. Насичення можливо уникнути, застосовуючи методи автоматичного керування підсиленням разом з оптичними фільтрами. Фактично, сонячне світло може бути корисним, оскільки дозволяє пристроям Li-Fi працювати на сонячних батареях, де сонячне випромінювання функціонує як засіб передачі даних, і водночас використовується як джерело енергії.

По-друге, технологія Li-Fi може бути оптимізована та працювати при невеликому світловому виході завдяки покращеним методам модуляції, таким як eU-OFDM (покращена ультрависокочастотна ортогональна частотно-роздільна мультиплексація). Ці методи дозволяють зберігати великі швидкості передачі даних, навіть при обмеженому світловому виході. Таким чином, можливість затенення світлового сигналу значно зменшується, і технологія Li-Fi стає більш надійною та ефективною для передачі даних при різних умовах освітлення

По-третє, частота, з якою модулюються світлові сигнали в технології Li-Fi, зазвичай становить приблизно 1 МГц, що є значно вище, ніж частота оновлення екрану комп'ютера (зазвичай близько 100 Гц). Тому швидкість мигання світлової лампи Li-Fi значно перевищує частоту оновлення екрану, і це мигання не впливає на працездатність сигналу передачі даних. Таким чином, затурканість миганням є малоймовірною проблемою у технології Li-Fi.

По-четверте, проблема полягає в уявленні про те, що канал зв'язку в засновку може бути лише мононаправленим, і відповідно, працює лише для вхідних або вихідних сигналів. Проте це не так. Наприклад, два одночасних світлових потоки не перетинаються, і призначення потоків даних не змінюється. Крім того, існує можливість впровадження комбінованої системи, де для нисходячого каналу використовується світлодіодне освітлення, а для висходячого - інфрачервоне випромінювання.

Таким чином, технологія Li-Fi може бути багатоканальною та бідирекційною, що надає можливість ефективного обміну даними в різних сценаріях використання.

Цей метод передачі даних істотно розширює можливості використання. На

сьогоднішній день активно проводяться дослідження щодо використання технологій Li-Fi в сфері підводних операцій людини. На жаль, більшість експериментів вважаються конфіденційними і доступ до їх результатів практично відсутній. Однак, на основі інформації з відкритих джерел, можна зробити висновок, що цей розвиток технології може бути найкраще використаним в океанології для створення автономних підводних апаратів для проведення океанологічних та океанографічних досліджень.

1.2 Область застосування

Li-Fi - це технологія, яка в більшості випадків може замінити Wi-Fi та інші радіочастотні методи передачі даних. В деяких ситуаціях впровадження Li-Fi може бути більш безпечною альтернативою, а в інших вона може бути єдиною швидкісною технологією зв'язку. Отже, Li-Fi може бути використана в різних умовах та середовищах, включаючи:

В лікарнях: Наприклад, Li-Fi може бути безпечно використана в клініках, де пристрої, що працюють на радіочастотах, можуть створювати електричні перешкоди для Wi-Fi. У коридорах, зонах очікування, палатах для хворих і операційних, розробка Li-Fi дозволить створити мережу зв'язку, яка усуває проблеми, пов'язані з електричними завадами від мобільних телефонів, які можуть виникати при використанні Wi-Fi в лікарнях. Li-Fi також може бути використана для реального часу в моніторингу руху хворих та важливих показників без потреби в кабелях.

В аеропортах: Використання системи в аеропортах, як приклад, вважається досить успішним. Основним фактором, чому це можливо, є той факт, що система не заважає роботі пристроїв, які використовують радіочастоти, і не перешкоджає роботі основних систем зв'язку з літаками і метеорологічними станціями, що дозволяє аеропорту працювати без збоїв.

У літаках: Wi-Fi використовується дуже рідко, і це майже завжди через те, що електричні радіохвилі від роутерів заважають роботі пристроїв і спілкуванню

з диспетчерами. Використання Li-Fi в цьому випадку може бути надзвичайно ефективним.

У офісах і школах: Система Li-Fi надає найбільш захищене підключення з точки зору інформаційної безпеки порівняно з іншими, досить дешевими на сьогоднішній день, технологіями. Крім освітлення, ця система може надавати доступ до онлайн-мережі без проходження через стіни, що робить її дуже безпечною і зручною для використання.

У науково-дослідних планах: Використання телеуправління для отримання даних в режимі реального часу в даний момент вважається найбільш поширеним методом. Однак системи з цим типом зв'язку не є мобільними і не можуть бути використані в недоступних місцях. Як альтернативу розглядають незалежні пристрої, які працюють за попередньо заданою програмою. Проте ці пристрої зазвичай не використовуються як мобільні пристрої - їх головна робота виконується в стаціонарному об'єднанні, і дані від них передаються дослідникові через штучні земні супутники.

Такий метод особливо популярний для океанологічних досліджень по всьому Великому океану, і головними прихильниками є буї "АРГО" - мережа плаваючих-занурюються буїв для здійснення океанографічних вимірювань у верхньому шарі океану в режимі реального часу. Система співпрацює з супутниковими спостереженнями і створює оперативну океанологічну систему, подібну до масової системи досліджень атмосфери. Буя "АРГО", випущеного на поверхню, опускається на глибину до 2000 метрів і дрейфує на даній глибині протягом 10 днів, потім піднімається на поверхню, вимірюючи температурні та солоність розподілу по глибині. На поверхні буя передає по радіо дані вимірювань та свій стан на орбітальний супутник і потім повертається на глибину для продовження циклу вимірювань. Буї розроблені для здійснення 150 таких циклів. Тривалість роботи буїв оцінюється від 4 до 5 років. У випадку поломки буїв вчені не зазнають значних втрат коштів, оскільки система виробництва є відносно недорогою.

Головною метою при розробці такого пристрою має бути потреба у визволенні або скороченні частоти використання телекомунікаційних систем, а також

вирішення завдань щодо отримання даних з апаратів, втрата яких може призвести до значних втрат з боку наукових досліджень, не лише з економічного погляду.

Подібний метод збору даних з апаратів, безперечно, може допомогти в ситуаціях, де інші методи передачі інформації недоступні з якихось причин. Впровадження технологій, описаних нижче, може значно підвищити якість досліджень, збільшивши технічні можливості самостійних безпілотних підводних апаратів. Якщо враховувати можливість виключення з системи апаратного комплексу кабелю для передачі даних та управління пристроєм, то використання такого методу суттєво підвищить маневреність апарата, що, в свою чергу, зробить його більш мобільним.

Як було сказано раніше, головною областю використання розглядаються океанологічні та океанографічні дослідницькі групи, які включають незалежні безпілотні підводні апарати, що використовуються для досліджень недоступних областей, таких як підлісні дослідження або дослідження регіонів з різним рельєфом, де використання телекомунікаційних апаратів було б проблематичним.

Перевагами такої системи, можливо, є збільшення мобільності автономних апаратів. До інших переваг можна віднести можливість отримувати дані, не вносячи установку на поверхню, що дає можливість у разі потреби отримати дані з апарата, доступ до якого впрямувати важко з ряду причин, таких як пошкодження його системи переміщення або попадання в зону, з якої його витягти без допомоги водолазів неможливо за даних обставин.

NextLiFi працює над розробкою власної системи підводного зв'язку, яка буде використовуватися для забезпечення комунікації між аквалангістами (рисунок 1.2).

Схожу систему зв'язку через світловий канал можна використовувати в таких сферах:

– На підводних лодках: Дані можуть передаватися між двома підводними човнами, і перешкоду на шляху можна виявити;

- Для забезпечення безпеки особистих і комерційних рибальських судів: В разі виникнення проблеми на морі, рибальський човен може надсилати повідомлення іншому судну або центральному органу;
- Морські рятувальні операції: Якщо морська рятувальна операція виникає на морі, інформацію можна передавати з одного судна на інше;
- Патрулювання: Якщо невідоме судно знаходиться на морі, патрульне судно може надсилати інформацію в центральний орган;
- Дистанційне бездротове управління підводними апаратами: Це може використовуватися для управління підводними апаратами здалеку;
- Як спосіб зв'язку між підводними апаратами та береговими станціями.

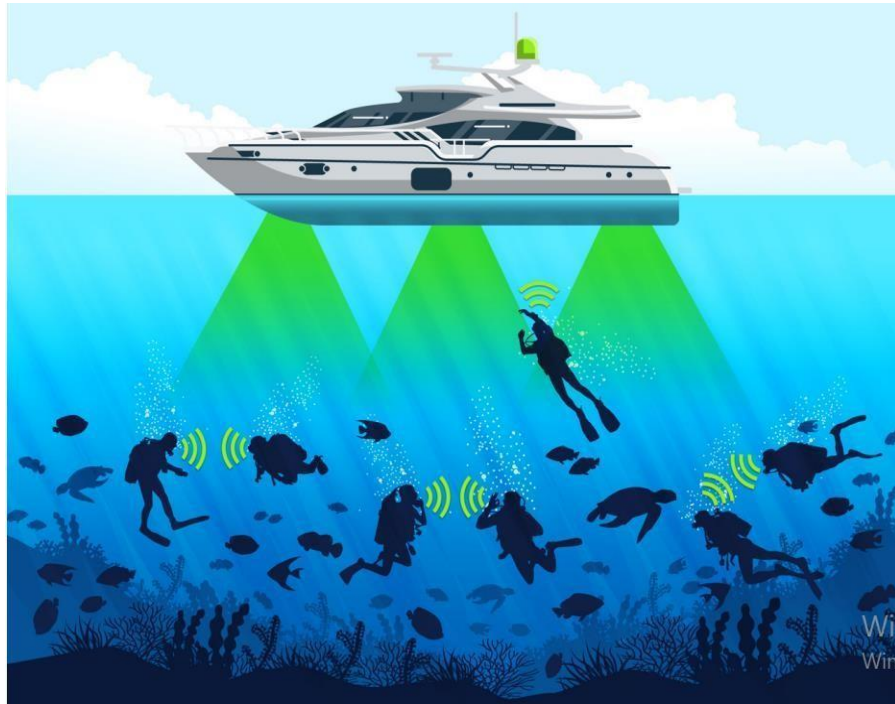


Рисунок 1.2 – Візуалізація проекту nextLi-Fi

У замітках фірми RDL Technologies Pvt Ltd, описується система, що об'єднує оптичну та акустичну передачу даних під водою. Ця система розширює можливості акустичних систем, які використовуються для підводного зв'язку. Акустичні системи придатні для великих відстаней, але мають обмежену швидкість передачі даних і значну затримку через швидкість звуку в воді.

Оптична система доповнює акустичну і дозволяє розширити використання

автономних підводних апаратів, уникнувши необхідності підключення їх по кабелю для передачі даних. Ця система спрощує операції з підводними дронами та, потенційно, зменшує витрати завдяки використанню легких і менш обладнаних надводних судів.

Крім того, вона сприяє швидкій реакції на події, полегшує обслуговування і технічне обслуговування морських обсерваторій. Ця система також дозволяє передавати великі файли даних з фіксованих датчиків, транслювати відео в реальному часі з рухомих транспортних засобів для обстеження та ідентифікації, а також може замінити підводні кабелі для підводних мереж датчиків на доступній глибині для роботи системи.

У такій системі підводні апарати, які працюють на батареях і прив'язані до підводного вузла, використовують як акустичний, так і оптичний канал для передачі даних. Ця система може мати застосування як у науковому дослідженні, так і у комерційних цілях.

Буйкові станції, які обмінюються даними з незалежними або дистанційно керованими безпілотними апаратами (АНПА), можуть бути побудовані за допомогою технології Li-Fi. Принцип такого ансамблю полягає в тому, що АНПА рухаються по програмованій траєкторії або керуються здалеку, вимірюючи дані і передаючи їх через Li-Fi на буйкові станції. Буйкові станції, в свою чергу, транслюють дані за допомогою супутникового або радіозв'язку.

Перехід від літій-іонних батарей до графенових може допомогти зменшити використання буйків у подібних системах. Графен - це матеріал з надзвичайними електричними властивостями, і його хімічна модифікація робить його перспективним для використання в різних сферах мікроелектроніки, наприклад, як акумуляторні батареї. Графенові акумулятори мають вищу специфічну ємність, ніж літій-іонні акумулятори. Важливо відзначити, що графен-полімерні батареї є безпечними та не схильними до загоряння та вибухів, відмінності від літій-іонних. Графен-полімерні батареї також можуть значно збільшити час роботи апарата, принаймні у 3 рази, в порівнянні з літій-іонними батареями.

1.3 Переваги використання системи у водному середовищі

Спочатку розглянемо видатні переваги порівняно з іншими відомими методами бездротового передавання даних, такими як Wi-Fi. Переважним плюсом є те, що, на відміну від систем на радіочастотних діапазонах, вода не поглинає сигнал повністю - вона поглинає лише частину сигналу, а решта передається з меншою кількістю помилок. Швидкість роботи системи та кількість даних для передачі значно більші, ніж через підводний звуковий канал. Робоча зона системи, наприклад, набагато ширша, ніж у підводному звуковому каналі - обмеженнями для впровадження є лише висока глибина води або термоклін. Таким чином, основними перевагами перед іншими методами передачі даних під водою є:

- відсутність конструктивної поглинаності сигналу водою;
- найвища швидкість передачі даних;
- більше кількість даних, які система може передати;
- більший робочий діапазон, ніж у підводному звуковому каналі.

Поміж бездоганних переваг порівняно з радіочастотними методами передачі даних, головними перевагами бездротової мережі Li-Fi є:

- збільшення густини передачі даних у 3 рази;
- унікальні характеристики, які підвищують рівень фізіологічної безпеки мережі.
- застосування в вибухонебезпечних середовищах, таких як нафтохімічні заводи та нафтові платформи;
- застосування Power-over-Ethernet (PoE - технологія, що дозволяє передавати електроенергію разом із даними до віддалених пристроїв через звичайний етернет-кабель) і можливість зворотного зв'язку з існуючими інфраструктурами передачі даних для важливих транзитних зв'язків між джерелами світла та інтегрованим Li-Fi модемом і онлайн.

Li-Fi працює як додаток до радіочастотних мереж. З цією метою проведені дослідження гібридних мереж Li-Fi та радіочастотні мережі, і зроблено три важливі висновки:

- мережі Li-Fi покращать якість обслуговування для мобільних користувачів;
- постачання послуг може бути неперервним;
- Wi-Fi мережі можуть покращити свою ефективність у взаємодії з мережами Li-Fi.

На відміну від Wi-Fi, яка використовує електричні хвилі, Li-Fi використовує світловий канал, який можливо використовувати в воді. Для кращого розуміння розглянемо таблицю 1.1, де подані можливості обох систем.

Таблиця 1.1 - Порівняння технологій Li-Fi и Wi-Fi

Особливість	Li-Fi	Wi-Fi
Тип зв'язку	світловий	безпроводний
Функціонування	Li-Fi передає дані, використовуючи світло за допомогою світлодіодів (LED).	Wi-Fi передає дані за допомогою радіохвиль за допомогою маршрутизатора Wi-Fi.
Перешкоди	Не конфліктує з іншими точками доступу, як інші методи, які працюють на радіочастотах.	Може стикатися з проблемами від близьких точок доступу або маршрутизаторів через можливі конфлікти на радіочастотах, особливо в областях з великою кількістю бездротових пристроїв
Технічні засоби	Наразі пристрої, які працюють на інфрачервоному випромінюванні	Бездротова локальна мережа стандартів 802.11a/b/g/n/ac/ad.
Застосування	Використовується в авіакомпаніях, підводних дослідженнях, операційних справах в лікарнях, офісах та домашніх приміщеннях для передачі даних та роботи в Інтернеті.	Використовується для роботи в Інтернеті за допомогою точок доступу Wi-Fi.
Переваги	Поява шум малоїмовірна, може проходити через солону морську воду	Велика ймовірність появи шумів, не може пройти через морську воду.

Продовження таблиці 1.1

Особливість	Li-Fi	Wi-Fi
Частота роботи	у 10 тисяч разів більша за радіо спектр	2,4 ГГц, 4,9 ГГц і 5 ГГц
Конфіденційність	У технології Li-Fi світло блокується стінами, що, в свою чергу, забезпечує більш безпечну передачу даних.	У Wi-Fi радіосигнал не може бути заблокованим стінами, тому потрібно використовувати методи для забезпечення безпечної передачі даних.
Швидкість передачі даних	Близько 1 Гбіт/с.	Бездротова локальна мережа - це 150 Мбіт/с, приблизно 1-2 Гбіт/с може бути досягнуто за допомогою WiGig/Giga-IR.
Щільність запису	Висока щільність запису	Щільність запису відносно низька через проблеми з перешкодами.
Відстань покриття	Близько 10 метрів	Близько 32 метрів (WLAN 802.11 b / 11g), варіюються в залежності від потужності передачі та типу антени.
Системні компоненти	Модулятор, LED (лампа) і фотодетектор являють собою повну систему Li-Fi.	Потрібно встановити маршрутизатори та абонентські пристрої (ноутбуки, КПК, настільні комп'ютери), які в подальшому називаються станціями.

Отже, можна зробити висновок, що у порівнянні з Wi-Fi, Li-Fi має більше переваг, ніж недоліків.

До основних переваг варто віднести:

- підвищений рівень конфіденційності мережі;
- можливість використання під водою, включаючи морську воду;
- вищу щільність запису даних;
- можливість уникнення значних втрат даних.

До недоліків можливо віднести: потенційну можливість перекриття потоку

даних будь-якою бар'єрною структурою, яка повністю перекриває джерело світла.

У цілому, Li-Fi має більше переваг, ніж недоліків, і варто розглядати цю технологію для конкретних застосувань.

Варто зазначити, що робоча відстань Li-Fi втричі коротше, ніж у Wi-Fi, а при використанні технології під водою вона зменшується ще більше. Загалом, Li-Fi має свої переваги і недоліки.

Li-Fi (Light Fidelity) - це технологія бездротового передавання даних, яка базується на використанні інфрачервоного та видимого світла для швидкого передавання інформації. Ця технологія є двонапрямленою і, на відміну від радіохвиль, може використовуватися під водою. Li-Fi відноситься до технологій передачі даних через видиме світло (VLC - Visible Light Communication). Для створення основних LED-ламп використовуються сині світлодіоди з фосфорним покриттям, галієво-нітридні мікросвітлодіоди, RGB кольорові світлодіоди. Також передбачається використання кольорових лазерів, оптоелектронних компонентів, таких як напівпровідникові лазерні діоди та лазерні модулі зі вбудованими схемами керування.

Li-Fi може змінити Wi-Fi та інші бездротові технології передачі даних в більшості випадків. В деяких ситуаціях впровадження Li-Fi вважається більш безпечною альтернативою, в інших випадках Li-Fi може стати єдиною швидкісною технологією зв'язку. Отже, Li-Fi можливо використовувати в різних сценаріях та оточеннях:

- в медичних закладах;
- у аеропортах;
- в повітряних судах;
- в офісах та навчальних закладах;
- в науково-дослідницьких проектах.

Для використання у науково-дослідницьких цілях система в першу чергу пов'язана з роботою в водному середовищі. Аналогічний метод збору даних з апаратів, безсумнівно, допоможе в умовах, коли інші методи передачі інформації

недоступні з якихось причин. Головною областю застосування розглядається океанологічне та океанографічне дослідження, включаючи незалежні безлюдні підводні апарати, які використовуються для дослідження важкодоступних областей.

Також, аналогічна система зв'язку через світловий канал може бути використана:

- На підводних човнах - дані можуть передаватися між двома підводними човнами, і перешкоду на шляху можна виявити;
- Для безпеки особистих та комерційних рибачьких судів, додатково до радіозв'язку. У разі виявлення чогось під час риболовлі, судно може вислати повідомлення іншому судну або центральному органу;
- Морські рятувальні операції - якщо морська рятувальна операція стається, інформацію можна передати з одного корабля на інший;
- Під час патрулювання - якщо невідоме судно знаходиться в морі, патрульне судно може також надіслати інформацію центральному органу;
- Для дистанційного бездротового керування підводними апаратами;
- Як засіб зв'язку між підводними апаратами та бойовими станціями.

Видатні характеристики системи порівняно з іншими методами передачі даних включають:

- Недоступність конструктивного поглинання сигналу водою;
- Найвища швидкість передачі даних;
- Більше даних, які може передавати система;
- Область використання ширше, ніж у водному звуці (ПЗК);
- Унікальні характеристики, що підвищують фізіологічну безпеку мережі;
- Використання в вибухонебезпечних середовищах, таких як нафтохімічні заводи та нафтові платформи.

Отже, можна зробити висновок, що порівняно з Wi-Fi, Li-Fi має більше переваг, ніж недоліків. До головних переваг можна віднести високий рівень конфіденційності мережі, можливість використання під водою та навіть в морській

воді, більшу густину запису та недоступність потужних втрат. До недоліків можна віднести можливість повного перекриття потоку даних під час будівництва перешкоди, яка повністю приховує світлодіодне пристрій. Крім того, слід відзначити робочу відстань, яка втричі менша, ніж у Wi-Fi, і за умов використання технології під водою ця відстань зменшується ще більше. В цілому, Li-Fi, як і будь-яка інша система, має свої переваги та недоліки.

2 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МЕРЕЖІ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ LI-FI

2.1 Автоматизована система підводного бездротового зв'язку з використанням технології Li-Fi та підтримкою Інтернету речей (IoT) та GPS-позиціонуванням.

Бездротовий передача даних в водному середовищі має свої власні проблеми порівняно з іншими видами зв'язку в повітряному середовищі. Для досягнення бажаних швидкостей передачі даних в системах підводного бездротового зв'язку необхідні передові пристрої. Водне середовище має кілька характерних особливостей, що роблять його унікальним і складним для передачі даних в порівнянні з іншими традиційними методами передачі. На підводний зв'язок впливають декілька явищ, таких як солоність, мутність, тиск, температура, кількість світла, яке потрапляє на поверхню води, і їх вплив на хвилі. Незважаючи на труднощі та проблеми, з якими стикається підводний зв'язок, він відіграє важливу роль у застосуваннях у реальному часі.

Кілька застосувань, де це корисно, включають спостереження за впливом на довкілля, передачу даних через автономний підводний апарат (AUV) для передачі інформації про стан тварин в океані, розвідку нафти та газу, моніторинг океану та безпеку узбережжя. Для передачі даних між буйком і АПНА або з АПНА на будь-які зовнішні пристрої розроблена складна процесорна плата. Вона складається з секції передавача та приймача для обробки сигналів. Для захисту пристроїв передбачено відповідну ізоляцію, яка знаходиться всередині плаваючого човна, який називається буєм. Для застосування на підводних човнах і в військових цілях будуть використовуватися датчики на якорі з піднятими вежами обробки.

Для підводного бездротового зв'язку доступні три технології. По-перше, радіочастотний зв'язок має високу пропускну спроможність на невеликій відстані та піддається впливу ефекту Доплера. Другий метод - оптична передача, яка

використовує довжину хвилі від 450 до 550 нм. Недоліком цього методу є необхідність прямого видимості для встановлення належного зв'язку між передавачем і приймачем. Третій метод - акустичний зв'язок. Необхідно враховувати такі фактори, як ефекти Доплера і міжсимвольні завади. За рахунок низької пропускної спроможності та великих просторових завад акустичний зв'язок обмежений одним користувачем, тобто багатокористувацький зв'язок та мультиплексування сигналів неможливі. Перевагою цього методу є те, що процес не впливає на життя морських тварин в океані, оскільки використовується лише низькочастотний сигнал. Оскільки ми перебуваємо в епоху промислової революції 4.0 та широкого застосування автоматизації, ми інтегруємо нашу систему з невеликою автоматизацією, щоб розширити її можливості та поліпшити її використання користувачами.

Для наземного застосування дані повинні бути перетворені у належний формат і вони повинні бути відібрані таким чином, щоб вони відповідали теоремі вибірки Найквіста. Це потребує кваліфікованої людини і є втомлюючою роботою. Акустичний сигнал можна використовувати як носія в більшості застосувань, оскільки він має низькі характеристики поглинання. Єдиною недолікою є те, що його можна використовувати на великій відстані зв'язку через погіршення сигналу. Система, що використовує електромагнітні хвилі, потребує широкої смуги пропускання і високого поглинання передаваного сигналу. Міжсимвольні завади - ще один параметр, що обмежує використання електромагнітних хвиль в підводному зв'язку.

Нашою головною метою є зменшити складність та впровадити підводний бездротовий зв'язок в режимі реального часу. Дешева, автоматизована система підводного бездротового зв'язку, яка легко реалізовується. Li-Fi може служити кращою альтернативою акустичним модемам через його високу швидкість, надійну передачу даних і енергоефективність. Підводні комунікації можна відстежувати та аналізувати. Більше того, ми могли б створити простий і доступний прототип, який можна було б використовувати для комерційних застосувань та застосувань у реальному часі.

До моделюваного підводного каналу застосовуються різні коди помилок. Кодування даних виконується до схеми модуляції. Застосований код RS (63, 53), і автор отримав коефіцієнт помилок 10^{-3} в повітряному середовищі. Автори також показали, що значний вигравш в кодуванні був отриманий при використанні схеми Trellis Coded Modulation в підводному зв'язку. У підводному зв'язку оптимальна частота відіграє важливу роль у отриманні кращого коефіцієнта помилок. У результаті автори отримали експериментальну формулу оптимальної частоти для конкретної відстані. З цією прогнозованою частотою виконується моделювання методів кодування помилок, таких як турбокоди, згорнутий код. Результати показали, що код згортки з найменшим відстані Хеммінга дає найменшу помилку.

Докладно вивчено зміну захисту інтервалу (GI) при мультиплексуванні з ортогональним частотним розділенням. Зразок зображення спочатку перетворюється в двійковий формат, а потім передається в моделюваний канал. Доведено, що безпомилковий зв'язок досягається, якщо підтримується інтервал GI, рівний 25% закодованих даних. Метою цього методу є усунення міжсимвольної інтерференції в змінюючомуся з часом каналі, такому як підводний канал. Досліджено зворотний зв'язок щодо рішень і лінійного еквалайзера в підводному каналі. Автори спроектували канал на два різних діапазони.

Один на 100 метрів, інший на 1000 метрів. Оптимальний розмір кроку, отриманий для еквалайзера LMS, становить від 0,05 до 1. Для алгоритму RLS він знаходиться в діапазоні від 0,02 до 1. У результаті моделювання зроблено висновок про те, що коефіцієнт помилок 10^{-4} досягається при рівні сигналу 24 дБ за допомогою алгоритму RLS. Передача даних за допомогою кліків Dolphin здійснюється авторами. Запропонований алгоритм оцінюється шляхом порівняння його продуктивності з відомими стандартними методиками OFDM та еквалайзером.

Результати показують, що клацання дельфіна викликає частоту помилок, яка становить одну п'яту від частоти помилок, створених попередніми методами.

Поліном у сверточному коді був змінений, і його ефективність оцінена в

підводній зв'язку для різних кодових швидкостей. Зі збільшенням кодової швидкості частота помилок поступово знижується, і важкий алгоритм коду LDPC може бути спрощений шляхом розбиття більш довгої кодової швидкості сверточного коду на послідовності з меншою кодовою швидкістю. Це забезпечило ту саму частоту помилок, яку дає код LDPC в підводному зв'язку. Статистичний аналіз сигналів і класифікація нестационарних сигналів аналізуються з використанням інструментарію обробки сигналів. Зокрема, автор ефективно взаємодіяв на морському дні між підводними апаратами за допомогою оптичних сигналів. Це спонукало дослідників до виконання своїх робіт у сфері підводного зв'язку. Високошвидкісний оптичний зв'язок зі швидкістю 10 Мбіт/с був продемонстрований на короткій відстані в 20 метрах. Запропонована система складається з передавальної секції з автоматизацією та приймальної секції з GPS-відстеженням та підтримкою GPRS-IOT. Конструкція та робота системи показані на рисунку 2.1.

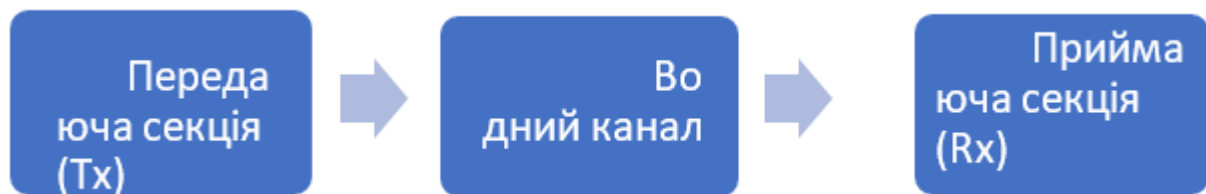


Рисунок 2.1- Блок-схема системи

Передаюча секція в основному складається з контролера PIC-Micro, обладнаного блоком живлення, передавачем Li-Fi (світлодіод), клавіатурою 1x5 і модулем Bluetooth для покращеного користувацького інтерфейсу. Завдяки інтеграції модуля Bluetooth і клавіатури ми розробили два режими роботи (тобто) ручний режим і режим Bluetooth. Користувачі можуть вибрати будь-який з цих режимів для роботи, відповідно до своїх потреб і вимог. Блок-схема передавальної секції показана на рисунку 2.2.

Блок живлення призначений для забезпечення необхідної напруги живлення мікроконтролера (9-12В). Клавіатура запрограмована на відправлення попередньо визначених даних і вибір режиму (тобто) між ручним режимом і режимом Bluetooth.



Рисунок 2.2 - Блок-схема передачої секції

У ручному режимі повідомлення або дані відправляються через клавіатуру, тоді як у режимі Bluetooth повідомлення та дані відправляються через Bluetooth за допомогою ПК або мобільних телефонів. Відправник Li-Fi складається з білого світлодіода, розташованого в корпусі, що збільшує інтенсивність і точність. Світло використовується як джерело у технології Li-Fi. У передавальному розділі світлодіод увімкнений і вимкнений в залежності від отриманих двійкових даних. Через фотодетектор в приймальному розділі дані будуть розшифровані.

Різні переваги Li-Fi полягають в простоті реалізації, оскільки в ній використовуються лише світлодіод і фотодетектор. Вона забезпечує високу безпеку даних, оскільки не може проникнути через металеві блоки або стіни. В будь-який момент можна отримати доступ до кількох пристроїв, що не призводить до перевантаження мереж. Секція прийому в основному складається з фотодетектора (фотодіода), пов'язаного з мікроконтролером PIC, модемом GPRS/GSM-IOT і модулем GPS для позиціонування. Блок-схема приймальної секції представлена на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 - Блок-схема приймаючої секції

Фотодетектор використовується для виявлення надходячого сигналу, і сигнал обробляється мікроконтролером. Модуль GPS призначений для GPS-відстеження та позиціонування, який можна використовувати для подальшого використання та застосування в реальному часі. Отримана інформація разом із GPS-місцезнаходженням подалі відправляється в хмару через модем GPRS/GSM-IOT, де інформація приймається з вказівкою дати та часу прибуття і може бути використана для подальшої обробки, аналізу та моніторингу.

Відправник Li-Fi складається з білого світлодіода, розташованого в корпусі з збіжною пучини для більшої інтенсивності і точності. Підводний канал моделюється методом трасування променів. Оточуючий шум, ефекти багатолуччівості та втрати поглинання визначаються для короткої відстані в 1 метр. Дані моделюються за допомогою модуляції бінарної фазової маніпуляції, модульовані дані можуть проходити через світлодіод.

В секції приймання вхідні дані демодулюються за допомогою демодулятора BPSK, а дані витягаються назад належним чином за допомогою фотодетектора. Моделювання як передавача, так і приймача виконується за допомогою MP-Lab .

Апаратна реалізація виконується за допомогою мікроконтролера PIC для обробки даних, лампа потужністю 50 Вт та динамік Olud використовуються як передавач і приймач. Звуковий сигнал проходить через лампочку, і те ж саме чути через динамік без жодних шумів.

2.2 Технологія Li-Fi як альтернатива Wi-Fi

У зв'язку з обмеженістю спектральних ресурсів у традиційних бездротових мережах стає популярним створення систем зв'язку за допомогою видимого світла (Visible Light Communication – VLC). Вони забезпечують високу енергоефективність, широкий канал пропускання, високий рівень безпеки та не вимагають ліцензування, що дозволить їм стати частиною майбутніх бездротових систем. Проте традиційні стратегії побудови мереж не завжди застосовні до VLC. Тому для таких мереж планується використовувати точки доступу з кількома світлодіодами, розроблені для гібридних систем зв'язку LiFi - WiFi усередині приміщень. Це дозволить отримати значний приріст пропускну здатності внутрішніх мереж Wi-Fi за допомогою комбінованих мереж.

Термін Li-Fi (Light Fidelity) був запропонований професором Харальдом Хассом із Університету Единбурга. Light Fidelity – це бездротова технологія зв'язку за допомогою видимого світла. Так само, як і будь-яке оптичне бездротове з'єднання, Li-Fi використовує оптичне випромінювання для передачі даних, переважно у видимому діапазоні спектра. Світлодіодні джерела світла ідеально підходять для реалізації технології Li-Fi. Струм через світлодіоди, які використовують для передачі даних у Li-Fi, модулюється сигналами високої частоти, і тому людське око не відчуває змін яскравості світіння ламп, подібних до мерехтінь.

За словами Миколи Серафимовського, голови Тематичної групи зі світлової комунікації (LC) IEEE 802.11, метою групи було визначити технічні та економічні можливості використання оптичного діапазону для бездротового зв'язку та сформулювати технічні специфікації [3]. Вважається, що IEEE 802.11 є най-

кращим форумом для сприяння глобальним стандартам для співпраці з виробниками, операторами та кінцевими користувачами, що виникають у процесі стандартизації. Просування цієї роботи у TG допоможе користувачам у домашніх, корпоративних та промислових середовищах, а також допоможе виробникам та операторам надавати спільні компоненти та послуги для користувачів IEEE 802.11.

Розробка стандарту IEEE 802.11bb дозволить створити основу для впровадження продуктів масового ринку, використовуючи систему світлодіодного освітлення, яка має глобальне розгортання та налічує мільярди пристроїв.

Незважаючи на те, що в 2011 році було опубліковано першу версію стандарту для бездротових комп'ютерних мереж, які використовують видимий світло для передачі даних Wireless Optical Communication Using Visible Light [4]), вона забезпечує високу швидкість передачі.

Стандарт IEEE 802.15.7 визначає фізичний рівень (PHY) та рівень управління доступом до середовища (MAC). Стандарт визначає три фізичні (PHY) рівні з різною пропускнуою здатністю:

PHY I призначений для зовнішнього застосування та забезпечує швидкість передачі даних від 11,67 до 267,6 Кбіт/с. PHY II дозволяє досягати швидкостей передачі даних від 1,25 до 96 Мбіт/с. PHY III призначений для багатоджерельних джерел з визначеним методом модуляції Color Shift Keying (CSK) і забезпечує швидкість передачі даних від 12 до 96 Мбіт/с.

Таким чином, розробляється стандарт IEEE 802.11bb.

За прогнозами Cisco, кількість пристроїв Інтернету промов (IoT) у 2020 році зросте до 50 мільярдів підключених пристроїв. Для забезпечення високорослої комунікації одночасно великої кількості користувачів найбільш підходящою технологією є зв'язок у видимому діапазоні світла. Це особливо актуально в умовах значних електромагнітних перешкод. Така технологія може використовуватися в лікарнях, супермаркетах, бізнес-центрах, прес-центрах, на нафтохімічних заводах, літаках та багатьох інших випадках. Крім того, Li-Fi також вико-

ристовуватиметься для суттєвого покращення внутрішніх бездротових комунікацій у житлових будинках.

У технології Li-Fi є інші переваги. Однією з основних є підвищений рівень безпеки, пов'язаний з тим, що світло не проникає через стіни. Ще одним перевагою є підвищення надійності мережі. Передавачі Li-Fi можуть бути вбудовані в кожний світильник у кімнаті або будинки, таким чином усуваючи обмеження структури мережі Wi-Fi. Ці характеристики роблять Li-Fi особливо привабливою альтернативою у випадках, коли сигнали Wi-Fi значно ослаблені або там, де використання Wi-Fi заборонено (наприклад, на атомних електростанціях), а також там, де потрібна швидка та безпечна передача великих обсягів даних (наприклад, у лікарнях). Оскільки приймачі Li-Fi реагують на зміни інтенсивності світла, Li-Fi може працювати при денному освітленні. При використанні Li-Fi у внутрішніх приміщеннях будинків не потрібна пряма видимість між світильником та приймачем оптичного випромінювання, оскільки відбитий від стін та інших поверхонь світло також може бути сприйнятим приймачем.

Однак, як і в разі будь-якої технології, у Li-Fi також є недоліки, найбільш помітним з яких є висока вартість впровадження, принаймні на поточний момент. Крім того, дальність зв'язку не перевищує 10 метрів, у той час як для Wi-Fi вона може бути до 32 метрів. Крім цього, технологія Li-Fi не забезпечує зв'язку у темряві або за відсутності світлодіодних ламп.

Протягом останніх кількох років Li-Fi вже використовується в обмеженій кількості мобільних застосувань і вимагає, щоб мобільні телефони покупців могли приймати сигнали Li-Fi через спеціальний додаток.

Видатним виходом на ринок Li-Fi є нещодавно анонсований комплект систем від компанії Signify (раніше Philips Lighting), який отримав назву Trulifi. Компанія заявляє про швидкість передачі даних до 150 Мбіт/с при передачі даних від різних світлодіодних ламп до користувача, а при фіксованій точці-точці – до 250 Мбіт/с. Набір призначень для вбудовування у нові або модифіковані системи освітлення Signify.

Нещодавно у прес-центрі стадіону німецького футбольного клубу Гамбург [1] було встановлено систему освітлення з використанням ламп серії Trulifi для забезпечення високошвидкісного зв'язку журналістів. Шкірному журналісту надається модуль з USB-портом, який забезпечує двосторонній високошвидкісний зв'язок за допомогою технології Li-Fi через світлі прилади прес-центру.

Хоча технологія має багато привабливих функцій, її широкого поширення наразі не набуло. Основним стримуючим фактором є відсутність галузевого стандарту, над яким зараз ведеться робота [5, 6].

Для реалізації системи Li-Fi необхідне таке обладнання:

- Світлодіодна система освітлення або окремі світлодіоди;
- Маршрутизатор, встановлений разом із системою освітлення;
- Приймач, який має декодер для розшифрування світлового сигналу.

Однією з останніх розробок мобільних пристроїв, що підтримують роботу з системою Li-Fi, є смартфон від компанії Oledcomm, який працює під управлінням операційної системи Android. У смартфона є одна важлива модифікація: замість фронтальної камери в нього вбудований Li-Fi сенсор, який отримує команди від світлодіодних ламп, що розташовані поруч зі смартфоном, що дозволяє переглядати на пристрої зображення та відеоролики.

Крім того, компанія продемонструвала прототип компактного зовнішнього Li-Fi-приймача, який підключається до смартфона за допомогою 3,5-міліметрового роз'єму. Такий приймач дозволяє отримати дані Li-Fi на пристроях, які не обладнані модулем. Компанія Oledcomm планує впроваджувати свою розробку в планшети та смартфони, що дозволить розширити сферу застосування технології Li-Fi. Слід врахувати, що майже всі сучасні смартфони та планшети можуть приймати сигнали системи Li-Fi за допомогою датчика освітленості чи фронтальної камери. Потрібно лише встановити на них спеціалізоване програмне забезпечення.

2.3 Мережі Li-Fi: можливості і перспективи

Швидкість передачі даних у технології Li-Fi порівнюється з Wi-Fi через кілька факторів, що визначають переваги Li-Fi у цьому аспекті:

1. Швидкість світла: Одним із ключових переваг Li-Fi є використання світлових хвиль для передачі даних. Світло має дуже високу швидкість, що значно перевершує швидкість радіохвиль, використовуваних Wi-Fi. Це дозволяє Li-Fi досягати вражаючих швидкостей передачі даних.

2. Велика пропускна здатність: Спектр світлових хвиль має величезну пропускну здатність порівняно з радіочастотами, які використовують Wi-Fi. Це означає, що Li-Fi може передавати більше інформації за той самий проміжок часу, що призводить до високої швидкості передачі даних.

3. Більша ефективність використання спектру: Li-Fi використовує світлодіоди, які можна швидше вимикати та вмикати, ніж стандартні радіоантени Wi-Fi. Це дозволяє більш ефективно використовувати обмежений спектр передачі даних.

4. Менше втрати сигналу: Сигнал Wi-Fi може стикатися з перешкодами, такими як стіни та інші об'єкти, що може впливати на якість та швидкість з'єднання. У Li-Fi світловий сигнал майже не проникає через стіни, що допомагає уникнути втрат сигналу та забезпечити стабільніше підключення.

Хоча швидкість Li-Fi може бути вражаючою, важливо враховувати його обмеження, такі як область покриття та вимога до прямого "видимого" з'єднання. Лише в оптимальних умовах Li-Fi може продемонструвати свої високі швидкості передачі даних. Пропускна здатність Li-Fi є одним з його ключових переваг, оскільки використання світлових хвиль дозволяє досягати значно більших швидкостей передачі даних порівняно з традиційним Wi-Fi. Використання Li-Fi разом з іншими технологіями може допомогти створити ефективні та збалансовані системи зв'язку, об'єднуючи переваги кожної технології.

Деякі аспекти, які визначають пропускну здатність Li-Fi:

1. Швидкість світла: Світло має дуже високу швидкість, приблизно 3×10^8 метрів за секунду у вакуумі. Це значно перевищує швидкість радіохвиль, які використовують у традиційному Wi-Fi. Висока швидкість світла дозволяє Li-Fi передавати дані з над високою швидкістю порівняно з Wi-Fi.

2. Використання світлодіодів (LED): В основі Li-Fi лежить використання світлодіодів для передачі даних. Світлодіоди можуть швидко вимикатися та вмикатися, дозволяючи передавати більше інформації за один годинний інтервал. Це сприяє ефективному використанню доступного спектру та підвищенню пропускну здатності.

3. Ширший спектр світлових хвиль: Спектр світлових хвиль має значно більшу пропускну здатність порівняно з радіочастотами. Таким чином, Li-Fi може використовувати ширший діапазон частот для передачі даних, що дозволяє забезпечувати велику пропускну здатність та високу швидкість передачі.

4. Можливість використання багатопроменевого освітлення: Li-Fi може використовувати технологію багатопроменевого освітлення, де світлові сигнали спрямовані в різних напрямках, що дозволяє більш ефективно використовувати доступний спектр і забезпечувати високу пропускну здатність в областях з високою концентрацією пристроїв.

5. Сумісність з іншими технологіями: Li-Fi може бути інтегрованою з іншими технологіями, такими як Wi-Fi або мережі п'ятої генерації (5G), для створення ефективних та комплексних систем зв'язку, які забезпечують велику пропускну здатність та швидкість передачі даних.

Всі ці фактори роблять Li-Fi потенційною технологією для створення найшвидших та ефективніших мереж передачі даних, особливо в умовах високої концентрації пристроїв та об'єктів.

Комбінована робота з Wi-Fi: У певних сценаріях, де швидкість та ефективність з'єднання є важливими, можна створити гібридні мережі, що використо-

вують як Li-Fi, так і Wi-Fi. Наприклад, Li-Fi може використовуватися для високошвидкісної передачі великих обсягів даних, тоді як Wi-Fi може забезпечувати широкий радіус покриття.

Інтеграція з технологією 5G: Технологія Li-Fi може бути інтегрована з мережами 5G для створення потужних та високоефективних систем передачі даних. Об'єднання цих технологій може забезпечити велику пропускну здатність та стабільність з'єднання, що особливо важливо в умовах міст та інших населених місць.

Робота з іншими бездротовими технологіями: Крім Wi-Fi та 5G, Li-Fi може бути інтегрована з іншими бездротовими технологіями, такими як Bluetooth або Zigbee, для створення різноманітних інтерфейсів зв'язку для різних сценаріїв використання.

Комбіновані системи в освітленні та зв'язку: Технологія Li-Fi може бути використана не тільки для передачі даних, але і як освітлення. Такі системи, відомі як "системи з'єданого освітлення" (Connected Lighting), поєднують у собі ефективне освітлення та можливість передачі даних через світлодіоди.

Робота в "розумних будинках" та "розумних містах": Li-Fi може бути інтегрована в розумні системи для створення ефективних мереж для передачі даних у розумних будинках та містах. Це дозволяє покращити якість з'єднання та забезпечити швидкий обмін даними між пристроями.

Взаємодія Li-Fi з іншими технологіями відкриває нові можливості для створення розумних та ефективних систем зв'язку, які можуть задовольняти різноманітні потреби споживачів та підприємств.

Особливість системи Li-Fi полягає в тому, що вона не створює електромагнітних завад для медичного обладнання. Крім того, ця технологія не піддається впливу від МРТ-сканерів. Ці фактори дозволяють налагоджувати систему високошвидкісного передавання даних у лікарнях та великих медичних центрах, приклад використання зображено на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Приклад використання технології Li-Fi у лікарні

2.4 Перетворення повідомлення на сигнал

Система конвертації повідомлення у сигнал під час передачі та зворотне перетворення при отриманні може бути представлена у вигляді таблиці, де кожному повідомленню з кінцевої множини A відповідають конкретні сигнали з кінцевої множини Z . терміну. У разі значного розміру множини A , яка включає багато різноманітних повідомлень, створення та збереження вищезгаданої таблиці (відомої як кодова таблиця) стає практично неможливим. Таким чином, зазначений спосіб створення кодових таблиць використовується лише при обмеженій кількості елементів множини A .

Навіть у таких випадках, як морські сигнальні коди, комерційні коди тощо, кодова таблиця може зростати до розмірів книги. У більшості випадків, замість безпосереднього створення кодових таблиць, проводять розчленування всіх повідомлень з множини A на послідовність елементарних повідомлень або символів, які формують кінцеву множину X , що містить невелике кількість елементів. Таке розчленування зазвичай провадиться джерелом повідомлення. Оскільки всі можливі повідомлення дискретного джерела утворюють злічену множину і можуть бути пронумеровані, ці числа можна виразити в зручній системі чисельності та розглядати кожен цифру номера як елементарне повідомлення.

Отже, кожне повідомлення a з множини A може бути подане у вигляді послідовності елементів x множини X : $a = (x_1, x_2, \dots, x_B)$, де B - довжина повідомлення в алфавіті X . Це спрощує задачу створення кодової таблиці і зводить її до відповідності обмеженому числу елементарних повідомлень множини X відповідним їм сигналам з множини Z .

У великих алфавітів символів зазвичай вдаються до додаткового перетворення: переходять від алфавіту символів X з об'ємом l до нового алфавіту символів Y з об'ємом $k < l$. Правило перетворення елементарних повідомлень алфавіту X (цифр, літер, знаків) в символи алфавіту Y і навпаки називається кодуванням. Кодування в узькому розумінні слова, яким ми будемо виключно користуватися надалі, визначається як відображення дискретних повідомлень послідовністю заздалегідь обраних символів. Важливо відзначити, що, на відміну від розчленування повідомлення на елементарні повідомлення (символи), яке тісно пов'язано з самим джерелом інформації, метод кодування обумовлений не лише особливостями джерела інформації, але і в деяких випадках властивостями каналу зв'язку.

Один з основних параметрів коду - його основа, яка дорівнює основі обраної системи числення і відповідає об'єму кодового алфавіту, тобто кількості різних символів у коді k . Кожному елементарному повідомленню (символу) відповідає певна послідовність кодових символів, яку називають кодовою комбінацією. Таким чином, в результаті кодування дискретна інформація представляється у вигляді послідовностей чисел, тобто у цифровій формі. Ось чому дискретну інформацію часто називають цифровою інформацією.

При виборі основи системи числення, тобто основи коду, враховують простоту, зручність і економічність реалізації цифрового представлення інформації під час її передачі через канали зв'язку. Оскільки для представлення чисел в системах числення з різною основою r використовується різна кількість розрядів i , то логічно вважати оптимальною систему числення t_u , в якій для запису певного найбільшого числа $N/\text{макс}$ використовується мінімальна кількість елементів. Оскільки

$$N_{\text{макс}}(n) = n^t - 1 \quad (2.1)$$

$$t = \ln[N_{\text{макс}}(n) + 1] / \ln n \quad (2.2)$$

$$v = (n / \ln n) \ln[N_{\text{макс}}(n) + 1] \quad (2.3)$$

$$\frac{dv}{dn} = \ln[N_{\text{макс}}(n) + 1] \frac{\ln n - 1}{(\ln n)^2} = 0 \quad (2.4)$$

Для знаходження $v_{\text{мін}}$ продиференціюємо (2.3) і прирівняти похідну нулю

$$n_{\text{out}} = e \approx 2,72 \quad (2.5)$$

Трійкова система ($n = 3$) є найближчою до оптимальної, із невеликими відхиленнями від оптимального випадку систем із основою $p = 2$.

Двійкові коди, які мають основу 2, є найбільш поширеними кодами в технології передачі дискретної інформації. Проте також використовуються мультиосновні коди (наприклад, трійкові) з основою більше 2, хоча менше часто. Двійкові коди широко використовуються завдяки своїй простоті, надійності та швидкій роботі елементів двійкової логіки. Вони також менш чутливі до зовнішніх перешкод і змін напруги живлення.

Двійкова арифметика також є простою, що є важливим фактором. Елементи двійкового коду складаються з символів: одиниці (1) і нуля (0). Ці символи використовуються для представлення даних в двійковій числовій системі і називаються бітами. Кодування повідомлень виконується за допомогою кодера, спеціального пристрою, який є частиною джерела повідомлень. Аналогічно, отримувач використовує декодер для ідентифікації кожної отриманої кодової комбінації сигналу з її відповідним елементом повідомлення (символом).

Процес формування сигналу, який включає в себе конвертацію повідомлення в сигнал, також включає в себе модуляцію, крім кодування. Дискретна модуляція - це процес перетворення послідовності кодових символів в послідовність елементів сигналу. Зворотний процес відповідно називається демодуляцією. Енкодер джерела повідомлень виконує первинне кодування та первинну модуляцію. Термін "первинне" підкреслює те обставину, що сигнали можуть піддаватися додатковому кодуванню та модуляції під час передачі через канал зв'язку, як показано нижче.

Модуляція включає зміни в одному чи кількох параметрах несучого сигналу. У каналах зв'язку як несучий часто використовуються синусоїдальні коливання або періодичні послідовності імпульсів. Книга в основному акцентує увагу на каналах, що використовують синусоїдальні коливання та періодичні послідовності імпульсів як несучий сигнал.

Важливо відзначити, що у кодерах джерел дискретних повідомлень практично виключно використовується постійний струм як несучий сигнал. Під час модуляції кожен елемент коду (кодовий символ) перетворюється в сегмент несучого сигналу тривалістю T , який називається одиничним елементом (як показано на рис. 2.3). Набір одиничних елементів, що відповідає одному інформаційному символу, називається кодовою комбінацією. При використанні коду з основою r модульований параметр може приймати лише r фіксованих дискретних значень — значущих позицій. Дискретну модуляцію іноді називають маніпуляцією. Моменти, де відбуваються значущі зміни положення між одиничними елементами, називають значущими моментами (позначені літерою 'a' на рис. 2.5).

Швидкість модуляції, тобто кількість одиничних елементів, переданих за 1 секунду, визначається за формулою $(B = 1/T)$. Одиницею швидкості модуляції є бод (Bd), що відповідає передачі одного одиничного елемента за секунду. Швидкість модуляції є однією з ключових характеристик джерела інформації (його кодера). Передачу інформації також характеризує інформаційна швидкість або швидкість передачі даних (V), що вказує на кількість інформації, яка надходить у систему зв'язку від джерела інформації до його отримувача за одну секунду.

Символ первичного алфавіта	Е	К	Н	Р
Двоичне число	10000	11110	00110	01010
Кодова комбінація				

Рисунок 2.5 – Приклади комбінацій п'ятиелементного коду при використанні як переносника постійного струму

Інформаційна швидкість, вимірювана у бітах на секунду (біт/с), залежить від різноманітних факторів, таких як швидкість модуляції, статистичні властивості джерела, тип каналу, система сигналів, шум в каналі та методи прийому.

Важливо відзначити, що інформаційну швидкість не слід плутати зі швидкістю модуляції, і один байт не повинен вважатися рівним одному біту на секунду. Кількісно ці швидкості співпадають лише для симетричних двійкових каналів без шумів. В симетричному каналі без шумів інформаційна швидкість дорівнює швидкості модуляції, помноженій на рівень модуляції. Це означає, що один сигнальний блок несе певну кількість бітів інформації за одну секунду. Наприклад, при передачі на чотири рівні модуляції рівень модуляції дорівнює 2, що призводить до інформаційної швидкості 2 біта на секунду. Проте взагалі інформаційна швидкість може бути як більшою, так і меншою за швидкість модуляції.

2.5 Канали передачі дискретної інформації

Передача дискретної інформації передбачає наявність каналу, джерела та отримувача. Система включає методи перетворення повідомлень в сигнали та їх відновлення при отриманні. На рис. 2.6 зображено загальну схему цієї системи зв'язку. Канал передачі дискретної інформації означає комбінацію технічних засобів та фізичного середовища, призначених для передачі сигналів. Існує чотири типи каналів зв'язку, які класифікуються в залежності від типу переносника та структури передаваних сигналів.

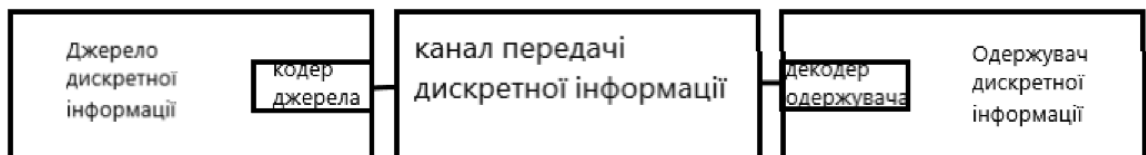


Рисунок 2.6 – Схема системи зв'язку при передачі дискретної інформації в загальному вигляді

1. Неперервно-неперервний вказує на комунікаційний канал із неперервним носієм та неперервними сигналами як на вході, так і на виході. Прикладом є телефонний канал зв'язку, створений у системі частотного розподілу.

2. Неперервно-дискретний вказує на комунікаційний канал із дискретним носієм та неперервними сигналами на вході і неперервними сигналами на виході. Прикладом є телефонний канал зв'язку, створений у сучасній системі розподілу.

3. Дискретно-неперервний, тобто неперервний носій і дискретні сигнали на вході та виході каналу. Типовим представником є канал передачі даних, створений у системі частотного розподілу.

4. Дискретно-дискретний вказує на комунікаційний канал із дискретним носієм та дискретними сигналами на вході і виході. Прикладом є канал передачі даних, створений у системі часового розподілу.

У цьому контексті важливо розрізнити два часто сплутувані поняття: передачу дискретної (цифрової) інформації та дискретний (цифровий) метод передачі. Згідно з вищевикладеним передача дискретної інформації може здійснюватися як за допомогою дискретного методу (четвертий тип каналу), так і за допомогою неперервного методу (третій тип каналу). Передача неперервної інформації також може здійснюватися як за допомогою неперервного методу (перший тип каналу), так і за допомогою дискретного методу (другий тип каналу). У цьому тексті акцент робиться на двох типах каналів (третьому та четвертому), які пов'язані із передачею дискретної інформації (рисунок 2.7).

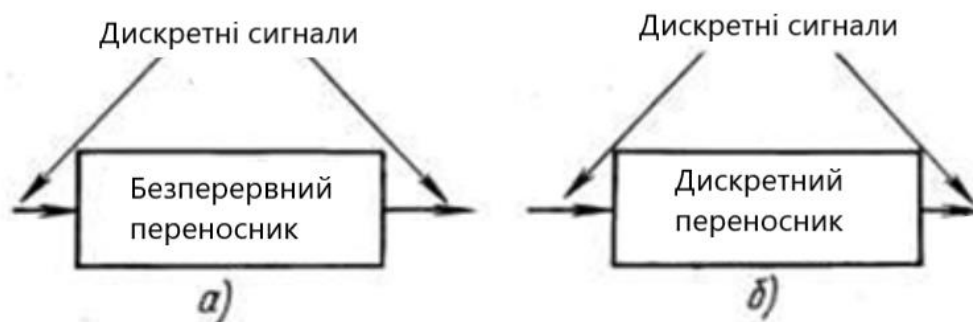


Рисунок 2.7 – Дискретно безперервний (а) та дискретний (б) канали

Як вже зазначалося, кодер джерела інформації перетворює послідовність елементів повідомлення в послідовність кодованих елементів, пов'язуючи кожен кодовий символ u_i з певним елементом сигналу. Цей елемент сигналу визначається протягом обмеженого інтервалу часу T та представлений певною функцією $g(i)$. Таким чином, вихідний сигнал кодера джерела зазвичай складається з послідовності окремих елементів постійного струму. Однак у більшості випадків такий початковий сигнал не може бути переданий безпосередньо через канал зв'язку. Наприклад, в дискретно-неперервних каналах потрібно виконати спектральне відповідність характеристик дискретного джерела інформації та неперервного переносника в каналі.

Це пов'язано з тим, що основна частина енергії послідовності двійкових імпульсів потрапляє в область низьких частот, яка не проходить через канал. Спектральна та амплітудна відповідність сигналів джерела та каналу здійснюється в пристрої перетворення сигналів (ППС), який є одним із фундаментальних компонентів передавача та приймача. Він здійснює спектральне та амплітудне відповідності сигналів джерела та каналу, перетворюючи сигнали джерела в лінійні сигнали та лінійні сигнали в сигнали для прийому інформації.

2.6 Висновки по розділу 2

1. Незважаючи на труднощі, які чекають на розробників Li-Fi, перспективи впровадження цих мереж дуже вражаючі, враховуючи отримані в лабораторіях результати. У деяких застосуваннях ця технологія вже довела свою життєздатність. Швидкість передачі даних та їхній рівень безпеки в Li-Fi вже дуже високі.

2. Проте, як і у будь-якої іншої технології, у Li-Fi мереж є свої плюси та мінуси. Важливо розглядати радіочастотні та світлові мережі не як конкурентів один одному, а як союзників. Важливо розглядати їх як технології, що доповнюють одна одну і можуть успішно існувати у різних сценаріях використання.

3 ПОБУДУВАННЯ ОПТИЧНОЇ ЛОКАЛЬНОЇ ЗАВАДОСТІЙКОЇ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ

3.1 Програмне забезпечення для емуляції Li-Fi

Технологія Li-Fi - це вид видимого світла, яка використовує світлодіоди (LED) як джерело передачі даних. Очікується, що Li-Fi займе важливе місце в технології бездротових мереж, забезпечуючи доступ до Інтернету високої швидкості та великої пропускної здатності. Це може стати загальноживаною технологією для надання доступу до Інтернету замість Wi-Fi в місцях, де радіохвилі є незручними, таких як лікарні та літаки. У цій роботі запропоновано та оцінено комплексну модель системи Li-Fi, реалізовану за допомогою Simulink®. Модель обладнана дзеркалом та тонкою конвексною лінзою для підвищення ефективності системи Li-Fi за рахунок відбиття та фокусування світлового променя, що випромінюється світлодіодами. Результати отримані під час випробувань оцінки показують, що вихідний сигнал моделі запропонованої системи Li-Fi значно вищий, ніж у базової системи Li-Fi. Таким чином, використовуючи запропоновану комплексну модель, можна реалізувати більш ефективні системи Li-Fi.

З інноваціями у сфері технологій Інтернет став неот'ємною частиною повсякденного життя. Використання Інтернету стало загальноживаним завдяки тому, що комп'ютери, телефони, телевізори та багато інших пристроїв обладнані приймачами Wi-Fi. Wi-Fi використовує радіохвилі для передачі даних. Радіохвилі відповідають діапазону частот від 3 Гц до 300 ГГц у в *electromagnetic spectrum*. З інтенсивністю використання радіохвиль зростає пропускна здатність пристроїв Wi-Fi, оскільки ця полоса частот заповнюється [1]. Також існують місця, де використання радіохвиль є неприйнятним. Wi-Fi не підходить для використання в лікарнях через можливий негативний вплив на здоров'я людей, які піддаються дії радіохвиль (утворення пухлин, рак тощо). Разом з тим радіохвилі можуть заважати обладнанню, що використовується в лікарнях. Крім того, окрім

медичного обладнання, радіохвилі не є придатними для використання в повітряних судах через питання безпеки та можливу інтерференцію з обладнанням [2-3].

Одним із рішень цих обмежень є технологія Li-Fi (Light Fidelity). Запропонована німецьким фізиком Гаральдом Хаасом, технологія Li-Fi передає дані за допомогою світлодіодної (LED) лампи, яка блимає настільки швидко, що для людського ока це невидимо [4]. Використовуючи видимий спектр світла для передачі даних, технологія Li-Fi відповідає частотному діапазону від 430 ТГц до 790 ТГц. Це означає, що комбінований розмір інфрачервоного і видимого спектрів світла приблизно в 2600 разів більший за весь спектр радіочастот у 300 ГГц [5]. У результаті ця широка пропускна здатність розглядається як альтернатива обмеженій пропускній здатності радіохвиль [6]. Li-Fi також переважає у сенсі швидкості Інтернету. Дослідники з Оксфордського університету досягли двосторонніх швидкостей 224 Гбіт/с. Використовуючи світлодіоди та приймачі з різними полями зору, дослідження досягло швидкостей підключення до Інтернету 224 Гбіт/с та 112 Гбіт/с для поля зору 60° та 36° на відстані 3 метрів. Ці швидкості значно вищі, ніж ті, які пропонує поточна технологія Wi-Fi (приблизно 600 Мбіт/с)[1]. Оскільки система Li-Fi використовує видиме світло, вона не взаємодіє з обладнанням. Крім того, оскільки світло не може пройти через стіни в закритому просторі, доступ до Інтернету не може бути наданий в інші області. Хоча це може здатися негативним ефектом, це важливо з точки зору безпеки. Порівняно з Wi-Fi, Li-Fi має багато переваг у відношенні до великої пропускної здатності, безпеки для здоров'я та швидкості [7]. Загалом Li-Fi є вигідною альтернативою Wi-Fi.

Основна концепція передачі даних полягає в тому, щоб чергувати вмикання та вимикання світла. Це означає, що цифрова інформація '1' передається, коли світло увімкнене, і цифрова '0', коли світло вимкнене. Інтенсивність світлодіода модулюється настільки швидко, що це непомітно для людського ока, і світло здається постійним [8-9].

У останніх дослідженнях було розроблено кілька моделей для опису та моделювання систем Li-Fi. У джерелі [10] була розроблена модель Li-Fi, яка включає стандартну схему трансцера з використанням MATLAB®. У дослідженні порівнювалася технологія Wi-Fi та Li-Fi за критеріями швидкості передачі даних, втрати пакетів та затримки, і виявлено перевагу технології Li-Fi. Джерело [11] представляє Li-Fi як систему зв'язку з її технікою модуляції та аналізує систему, схему якої моделюється за допомогою. Дослідження [12] моделює систему Li-Fi з урахуванням фонового шуму в Optisystem 15. Проводилися симуляції для оцінки впливу фонового світла на зв'язок Li-Fi та продуктивності приймача при фоновому шумі від різних джерел. У джерелі [13] була розроблена прототипна модель системи моніторингу здоров'я Li-Fi для передачі даних від датчика FBG, який тримає пацієнт, до оптичного приймача, встановленого в стелю кімнати пацієнта через різні канали поширення. Стаття презентує модель системи Li-Fi для передачі аудіосигналів, яка була розроблена з мінімальною кількістю електричних елементів [14].

Метою цієї роботи є реалізація та оцінка більш вдосконаленої та ефективної моделі системи Li-Fi. Для підвищення ефективності порівняно з попередніми моделями Li-Fi [10-11] в модель системи Li-Fi в Simulink® додаються різні компоненти, такі як дзеркала та лінзи. Очікується, що фокусування світла, випромінюваного світлодіодом, на фотодіод буде супроводжуватися збільшенням амплітуди вихідного сигналу [10, 15].

Робота організована наступним чином: у розділі 2 коротко представлено основні концепції архітектури Li-Fi та взаємодії світла з дзеркалами та лінзами.

Li-Fi можна уявляти як Wi-Fi на основі світла. Коротко кажучи, Li-Fi використовує світло за допомогою високошвидкісних світлодіодів замість радіохвиль для передачі даних [16].

Основна Li-Fi система складається з двох основних частин. Приймачеві та передавальні кола фізично відокремлені та віддалені одне від одного. Однак порожній оптичний канал зв'язку (канал Li-Fi) з'єднує ці дві основні частини [17-19]. Блок-схема основної Li-Fi системи показана на рисунку 3.1.

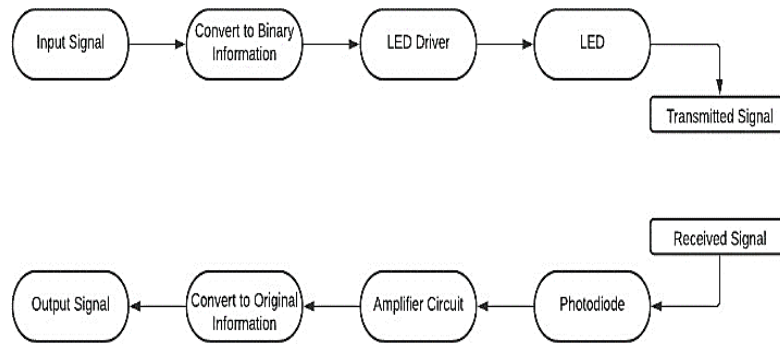


Рисунок 3.1 – Блок-схема базової системи Li-Fi

Формула закону квадрата відстані застосовується

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}, \quad (3.1)$$

де I_1 і I_2 - інтенсивності світла світлодіода на відстанях d_1 та d_2 від фотодіода, відповідно.

Комунікаційний канал може містити кілька джерел оптичного шуму. Протягом дня найважливішим джерелом шуму є сонце. Інші джерела шуму включають передавачі в комуніках видимим світлом або будь-яке джерело світла із або без можливості передачі даних. У відкритих додатках комуніках видимим світлом непередбачуваність погодних умов є ще більшою. Водяні частки, спричинені дощем, снігом чи густим туманом, можуть викликати розсіювання світла, що містить дані, і впливати на зв'язок видимим світлом [20].

3.2 Взаємодія світла з дзеркалом і лінзою

Дзеркала і глянцеві поверхні відбивають більшу частину падаючого на них світла за законами відображення. Подія відбиття проілюстрована на рисунку 3.2.

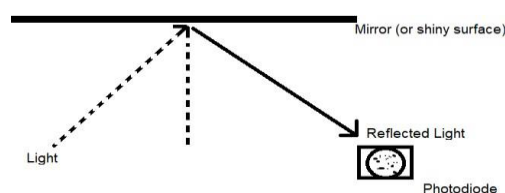


Рисунок 3.2 – Ілюстрація дзеркального відбиття

В системі Li-Fi з дзеркалом вхідне світло відбивається від поверхні і направляється на фотодіод. Закон Снелла описує відбиття та відхилення світла. Згідно з законом Снелла, відношення синусів кутів падіння і відбиття дорівнює відношенню фазових швидкостей у двох середовищах, або оберненому відношенню показників заломлення:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.2)$$

де θ_1 – кут падіння, θ_2 – кут відбиття, обидва вимірюються відносно нормалі до межі; v_1 та v_2 – швидкості вхідного та вихідного світла; n_1 та n_2 – показники заломлення відповідних середовищ [21].

Любий промінь, що йде паралельно головній осі збиральної лінзи, заломлюється лінзою і проходить через фокусний пункт F' з іншого боку лінзи. Діаграма на рисунку 3.3 показує поведінку двох променів, які наближаються паралельно до головної осі. У цьому випадку точка, де збігаються обидва промені, відома як фокусний пункт F' лінзи. У системі Li-Fi фотодіод має конкретний кут огляду. Він не може бачити промені світла, які знаходяться поза цим полем огляду. Коли фотодіод розташований в точці F' , інтенсивність світла, що падає на фотодіод, збільшується [21].

Лінзи складаються з двох кривих рефрактивних поверхонь. Рефрактивна сила P або обернена фокусна відстань f (відстань між лінзою та фокусним пунктом) лінзи в повітрі визначається загальним рівнянням лінзи:

$$P = \frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)d}{nR_1R_2} \right] \quad (3.3)$$

де n — показник заломлення матеріалу лінзи, d — відстань уздовж оптичної осі між двома поверхнями лінзи, відома як товщина лінзи, а R_1 і R_2 — радіуси кривизни двох поверхонь.

3.3 Впровадження комплексної системи Li-Fi за допомогою Simulink®

Модель Simulink® для базової системи Li-Fi, зображеної на малюнку 1, показана на рисунку 3.3.

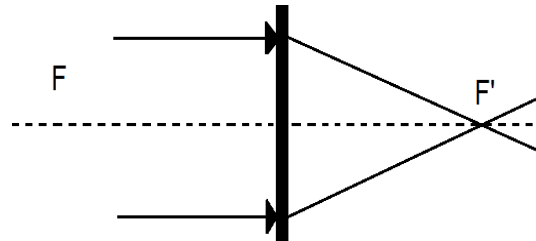


Рисунок 3.3 – Рух світла через збиральну лінзу

Модель складається з передавального розділу, який містить генератор квадратних хвиль для представлення перетворення вхідного сигналу в двійкову інформацію, перемикаючий коло для приводження світлодіода в дію та світлодіода, який передає інформацію світлом. Передавач слідує за оптичним каналом, який виступає як середовище, через яке світло поширюється та використовується для передачі інформації на бік отримувача.

Далі йде розділ приймача, який включає фотодіод, який перетворює оптичну потужність в електричний сигнал, і підсилювальне коло, яке використовується для посилення перетвореного електричного сигналу [10-11].

3.4 Модель Li-Fi системи з дзеркалом у Simulink®

Модель Li-Fi системи з дзеркалом у Simulink® показана на Рис. 3.5. Модель включає в себе модель, розроблену для базової Li-Fi системи в попередньому розділі, та модель дзеркала, представленого функцією Matlab®, організованою відповідно до рівняння (3.2), яке направляє світло від LED до фотодіоду. Під час моделювання дзеркала в Simulink®, коефіцієнт преломлення повітряного середовища, коефіцієнт преломлення дзеркала, яке використовується для відбиття світла, та кут дзеркала встановлені відповідно на 1,75 та 30°. Значення, використані для симуляції, базуються на діапазоні 300-1500 лк, який дослі-

дження в [22] надає для належного освітлення офісу світлодіодами, та кутах дзеркал, які використовуються для підвищення ефективності системи. Значення можуть змінюватися в моделі в залежності від вимог та застосування.

3.5 Модель Li-Fi системи з тонкою збільшувальною лінзою в Simulink®

Хоча світло, що видається світлодіодом, випромінюється у всі частини середовища (кімната, офіс, салон літака та ін.), воно не рівномірно розподілене у всіх точках, і фотодіод може виявити вхідні дані лише під певним кутом огляду. Хоча тонка збільшувальна лінза не може зібрати всі випромінювані світлом на фотодіод, світло поза полем зору може бути сфокусоване на фотодіод. Модель Simulink® для Li-Fi системи з тонкою збільшувальною лінзою показана на Рис. 6. Модель включає в себе модель, розроблену для базової Li-Fi системи та модель тонкої лінзи, представлену функцією Matlab®, організованою відповідно до рівняння (3.3), яке фокусує розсіяне світло на фотодіод. Значення в моделі можуть змінюватися в залежності від вимог та застосування.

3.6 Модель Comprehensive Li-Fi системи в Simulink®

Коли тонка збільшувальна лінза та дзеркало використовуються разом, розсіяне світло відхиляється, і на фотодіод фокусується більше світла. У цьому випадку світло, відбите від дзеркала та тонкої збільшувальної лінзи, падає безпосередньо на фотодіод. В результаті очікується подальше збільшення сигналу на виході системи. Модель Simulink®, яка включає як тонку збільшувальну лінзу, так і дзеркало для повної Li-Fi системи, показана на рисунку 3.4.

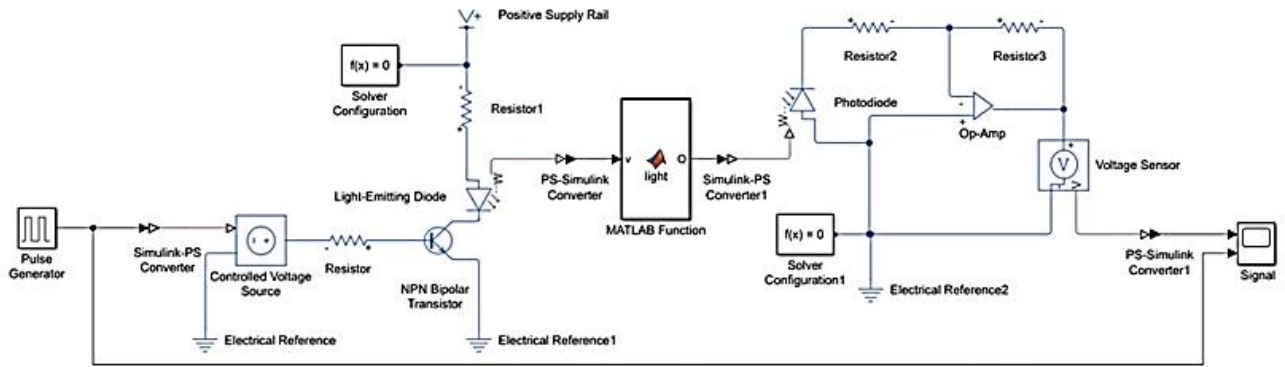


Рисунок 3.4 – Модель Simulink® базової системи Li-Fi

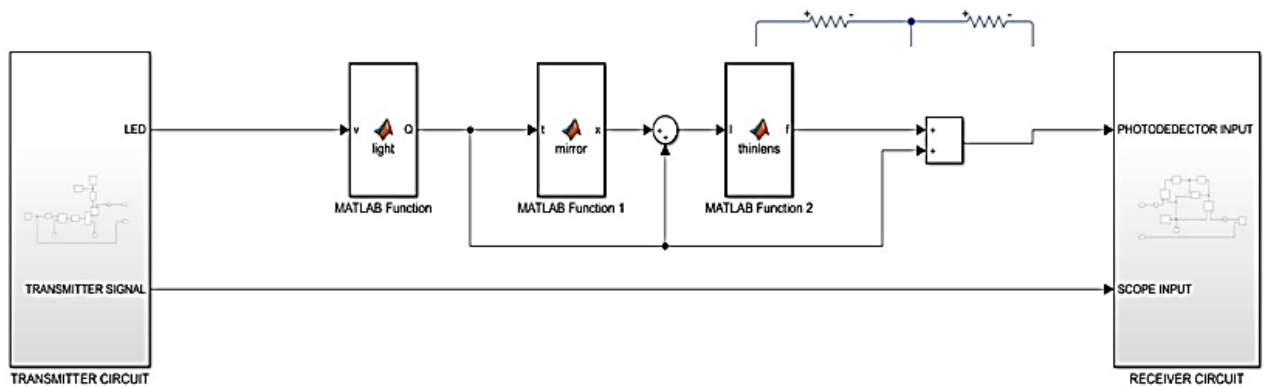


Рисунок 3.5 – Модель Simulink® системи Li-Fi із дзеркалом

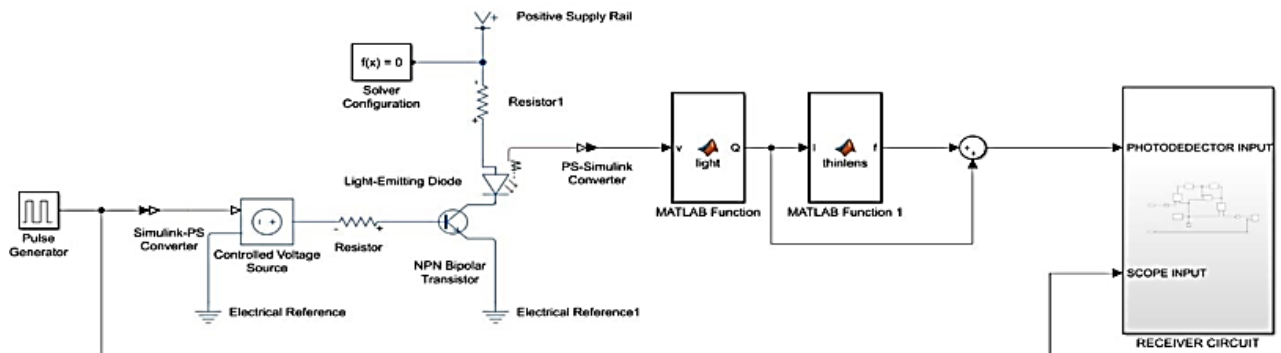


Рисунок 3.6 – Модель Simulink® системи Li-Fi з тонкою опуклою лінзою

3.7 Перевірка продуктивності

Реалізовані моделі оцінюються моделюванням. Працездатність моделей перевіряється шляхом подачі вхідного сигналу з амплітудою 3,3 В та отримання вихідного сигналу. На рисунку 3.8 показані форми сигналу передавача та приймача (вхідні та вихідні сигнали системи) сигнали для моделі Simulink® базової системи Li-Fi.

Як показано на рисунку 3.8, сигнал 3,3 В, відправлений з передавача, отримується як 1,213 В в приймачі.

На рисунку 3.9 показані форми хвиль передавача та приймача (вхідні та вихідні сигнали системи Li-Fi) для Simulink®-моделі системи Li-Fi з дзеркалом.

Як можна побачити на рисунку 3.9, сигнал 3,3 В, відправлений з передавача, отримується як 1,396 В в приймачі. Сигнал, отриманий в приймачі, збільшується під впливом дзеркала.

На рисунку 3.10 показані форми хвиль передавача та приймача (вхідні та вихідні сигнали системи Li-Fi) для Simulink®-моделі системи Li-Fi з тонкою конвексною лінзою. Як можна побачити на рисунку 3.10, сигнал 3,3 В, відправлений з передавача, отримується як 1,549 В в приймачі. З ефектом фокусування, створеним тонкою конвексною лінзою, сигнал, отриманий в приймачі, збільшується.

На рисунку 3.11 показані форми хвиль передавача та приймача (вхідні та вихідні сигнали системи Li-Fi) для Simulink®-моделі комплексної системи Li-Fi.

Як показано на рисунку 3.11, сигнал 3,3 В, відправлений з передавача, отримується як 2,687 В в приймачі. Використовуючи як дзеркало, так і тонку конвексну лінзу в моделі, сигнал, отриманий на виході приймача, значно збільшується.

Порівняння реалізованих моделей системи Li-Fi в Simulink® за вихідним сигналом показано в таблиці 3.1.

Отже, при порівнянні запропонованих моделей вихідного сигналу Li-Fi системи можна виокремити збільшення вихідного сигналу приблизно на 15% у системі Li-Fi з дзеркалом, приблизно на 28% у системі Li-Fi з тонкою конвексною лінзою та приблизно на 122% у комплексній системі Li-Fi порівняно з базовою системою Li-Fi. Крім того, комплексна система Li-Fi перевершує систему Li-Fi з дзеркалом і систему Li-Fi з тонкою конвексною лінзою на 93% і 74% відповідно. Навіть за використання усієї системи Li-Fi зі збільшенням виграшу одиниці, отримано вищий амплітудний сигнал порівняно з дослідженням [11], де використовується підсилювач з коефіцієнтом підсилення.

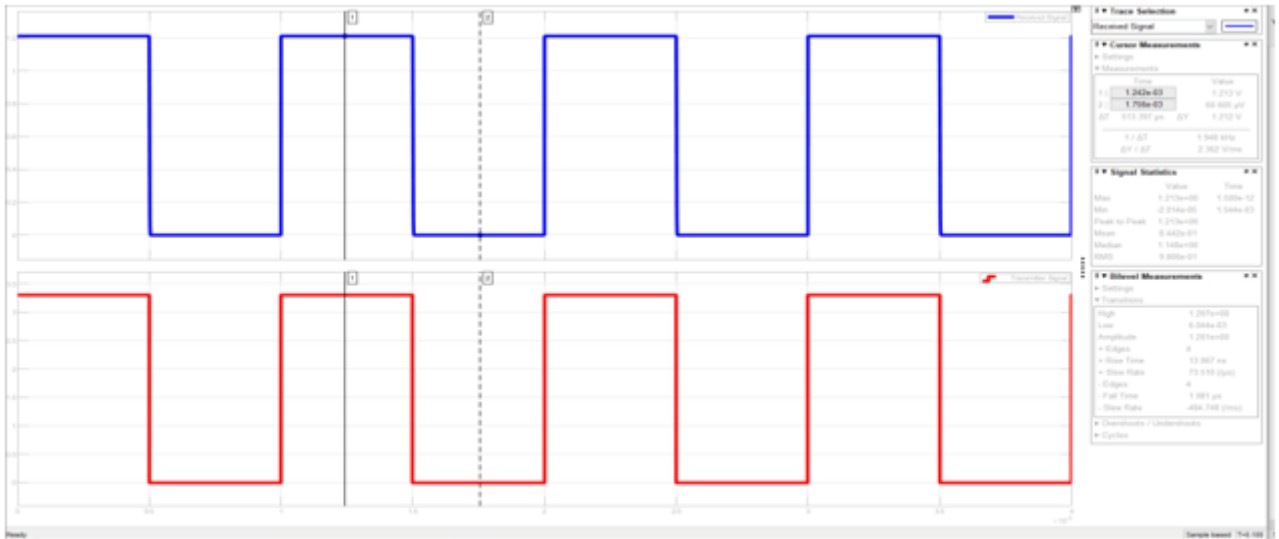


Рисунок 3.8 – Передані та отримані сигнали для моделі Simulink® базової системи Li-Fi

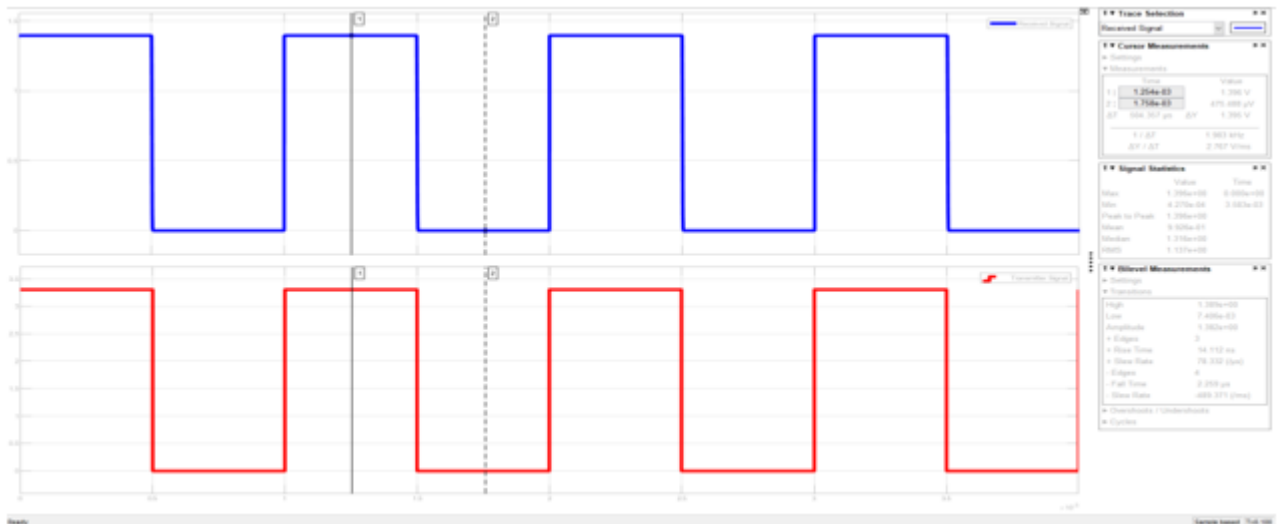


Рисунок 3.9 – Передані та прийняті сигнали для моделі Simulink® системи Li-Fi із дзеркалом

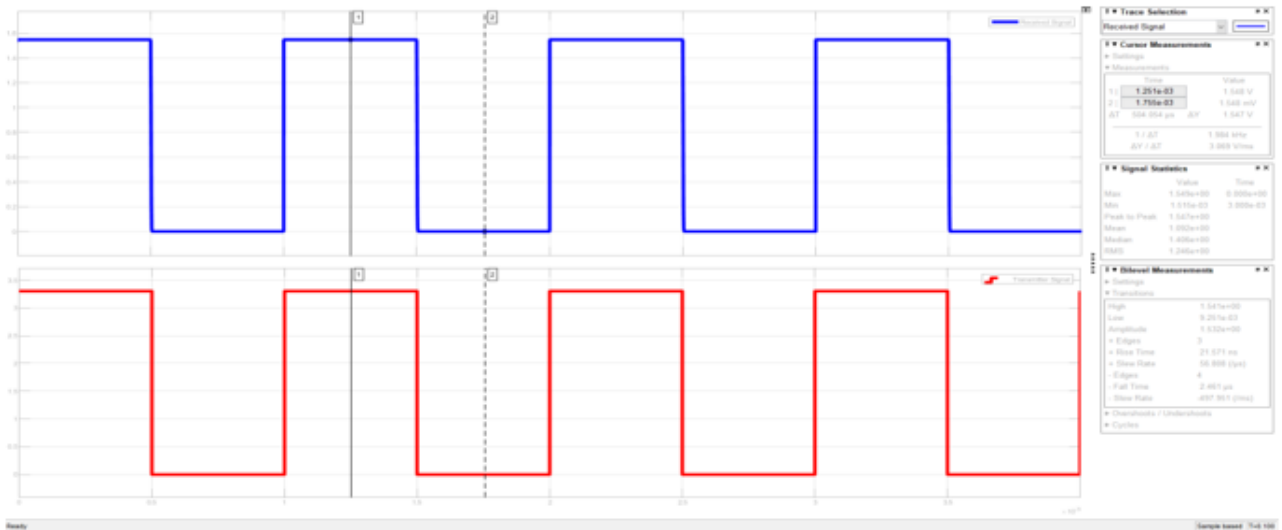


Рисунок 3.10 – Переданий і прийнятий сигнали для моделі Simulink® системи Li-Fi з тонкою опуклою лінзою

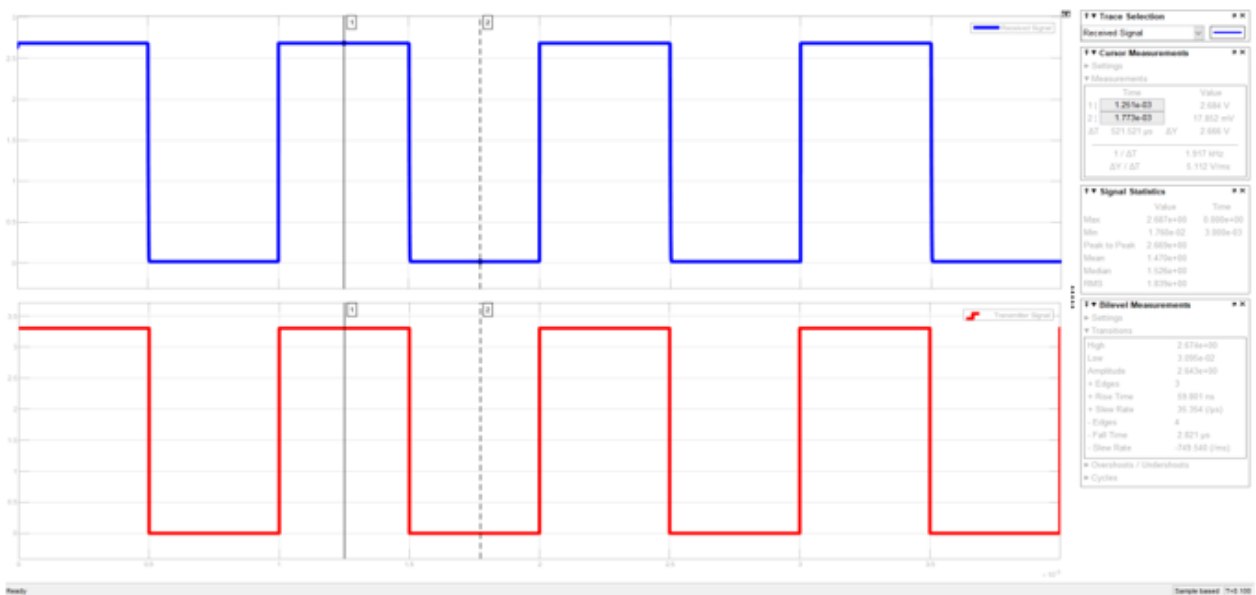


Рисунок 3.11 – Передані та отримані сигнали для моделі Simulink® комплексної системи Li-Fi

Таблиця 3.1 - Порівняння моделей реалізованої системи Li-Fi Simulink®

Модель	Переданий сигнал (V)	Отриманий сигнал (V)
Базовий	3.3	1.213
Дзеркало	3.3	1.396
Опукла лінза	3.3	1.549
Комплексний	3.3	2.687

3.8 Висновки по розділу 3

1. Розроблено комплексну модель системи Li-Fi. Перед запропонованою комплексною моделлю було реалізовано дві моделі Li-Fi системи в Simulink®, які включають в себе використання дзеркала та тонкої конвексної лінзи.

2. Продуктивність моделей порівнюється з базовою моделлю системи Li-Fi в літературі з точки зору вихідного сигналу. Запропонована комплексна модель показує дуже високу ефективність. Спостерігається збільшення вихідного сигналу на 122% порівняно з базовою моделлю. Крім того, вихідний сигнал, отриманий в моделях лише з дзеркалом та лише з тонкою конвексною лінзою, показує збільшення на 15% та 28% відповідно порівняно з базовою моделлю.

3. Запропонована модель становить основу для подальшого покращення ефективності існуючих систем Li-Fi та пропонує новий підхід для високоефективних застосувань в технології Li-Fi.

ВИСНОВКИ

Незважаючи на труднощі, які чекають на розробників Li-Fi, перспективи впровадження цих мереж дуже вражаючі, враховуючи отримані в лабораторіях результати. У деяких застосуваннях ця технологія вже довела свою життєздатність. Швидкість передачі даних та їхній рівень безпеки в Li-Fi вже дуже високі.

Проте, як і у будь-якої іншої технології, у Li-Fi мереж є свої плюси та мінуси. Важливо розглядати радіочастотні та світлові мережі не як конкурентів один одному, а як союзників. Важливо розглядати їх як технології, що доповнюють одна одну і можуть успішно існувати у різних сценаріях використання.

В роботі розглянуто технологію Li-Fi, починаючи з принципів її роботи. Визначено області застосування, зокрема водне середовище, де система проявляє переваги. Досліджено вибір обладнання для мережі бездротового зв'язку Li-Fi, зокрема автоматизовану систему підводного зв'язку з використанням технології Li-Fi та підтримкою Інтернету речей та GPS-позиціонування.

Окремий аспект присвячено порівнянню технологій Li-Fi і Wi-Fi, висвітлені можливості та перспективи мереж Li-Fi. Розглянуто процес перетворення повідомлень на сигнали, а також розподіл каналів передачі дискретної інформації.

Другий розділ завершено висновками, які стисло узагальнюють отримані результати.

Третій розділ розглядає побудову оптичної локальної завадостійкої мережі зв'язку. Розглянуте програмне забезпечення для емуляції Li-Fi, взаємодія світла з дзеркалом і лінзою, впровадження комплексної системи Li-Fi за допомогою Simulink®.

Розроблено моделі Li-Fi систем з дзеркалом і тонкою збільшувальною лінзою в Simulink®. Проведена перевірка продуктивності системи.

Висновки третього розділу підкреслюють ключові аспекти побудованої оптичної мережі, вказуючи на досягнуті результати та можливі напрямки подальших досліджень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. 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.
2. Палл, М. Л., Wi-Fi - важлива загроза здоров'ю людини. Екологічні дослідження, 2018. 164: с. 405-416.
3. Леба, М., С. М. Піуреан і А. К. Іоніка, Li-Fi - шлях до нового способу зв'язку, у CISTI2017: Лісабон, Португалія. с. 1-6.
4. 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.
5. Хаас, Х., LiFi - технологія 5G як парадигма. Огляд в фізиці, 2018. 3: с. 26-31.
6. Хан, Л. У., Видиме світлове зв'язку: застосування, архітектура, стандартизація та наукові виклики. Цифрові комунікації та мережі, 2017. 3(2): с. 78-88.
7. 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.
8. Абдалла, А. М., Х. Родрігез, І. Ельфєргані та А. Тейшейра, Оптична та бездротова конвергенція для мереж 5G. 2019, Wiley-IEEE Press.
9. Альбрахім, Л. І., Л. Х. Алхудайті, А. А. Альдхафїан, М. Р. Альдхафїан і Г. М. Балївах, Створення ієрархічної архітектури Інтернету речей на основі Li-Fi. IEEE Access, 2018. 6: с. 40811-40825.
10. Арїнзе, С. Н., Г. Н. Онох і Д. О. Абонї, 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.
11. Джордж, Р., С. Вайдьянатан, А. С. Раджпут і К. Дїпа, LiFi для міжавтомобільного зв'язку - огляд. Procedia Computer Science, 2019. 165: с. 25-31.

12. 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.
13. 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.
14. Валковскі, Т. і К. Димитров, Низькобюджетне лабораторне середовище для використання оптичних методів передачі аудіосигналів, у ICEST2020: Ніш, Сербія. с. 65-68.
15. 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.
16. 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.
17. Госвами, П. і М. К. Шукла, Проектування Li-Fi трансивера. Бездротова інженерія та технологія, 2017. 8(4): с. 71-86.
18. Чевік, Т. і С. Йільмаз, Огляд систем видимого світла. Міжнародний журнал комп'ютерних мереж і зв'язку, 2015. 7(6): с. 139-150.
19. Лю, СВ., Б. Садегі, і Е. В. Найтлі, Можливості включення видимих світлових комунікацій (V2LC) мереж, у VANET2011: Лас-Вегас, Невада, США. с. 41-50.
20. 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.
21. Васан, С., Основи фотоніки та оптики. 2004, Trafford Publishing.
22. 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.