

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки та телекомунікацій

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**ВИКОРИСТАННЯ VLC У СИСТЕМАХ ВНУТРІШНЬОГО
ПОЗИЦЮВАННЯ**

USING VLC IN INDOOR POSITIONING SYSTEMS

спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Телекомунікації та радіотехніка»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЕКРМ-21
Лукомський Іван Володимирович

(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент
Якимчук Наталія Миколаївна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
« ____ » _____ 2025 р.

Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Селепина Йосип Романович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Освітня програма: «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доц. В. ЗАБЛОЦЬКИЙ

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Лукомському Івану Володимировичу

1. Тема кваліфікаційної роботи Використання VLC у системах внутрішнього позиціонування
Керівник роботи: к.т.н., доцент Якимчук Наталія Миколаївна

затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» січня 2025 р. № 20/01-02

2. Строк подання здобувачем роботи: 05.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: сучасні моделі каналів передачі з використанням видимого світла для позиціонування у приміщеннях, характеристики LED-маяків та фотодіодних приймачів, вимоги до точності визначення координат, енергоспоживання та покриття, параметри оптичного каналу, а також можливість реалізації прототипу на доступних апаратних компонентах.

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

Вступ

Розділ 1 Технологія зв'язку на основі видимого світла

Розділ 2 Моделювання каналу у системах позиціонування на основі видимого світла

Розділ 3 Протоколи мультиплексування та модуляції у системах позиціонування VLC

Розділ 4 Дослідження системи позиціонування на основі існуючої інфраструктури

освітлення приміщень

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Презентація PowerPoint 11 слайдів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Якимчук Н. М., доцент</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Якимчук Н. М., доцент</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Якимчук Н. М., доцент</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Якимчук Н. М., доцент</i>		
<i>Висновки</i>	<i>Якимчук Н. М., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>		%	
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Якимчук Н. М., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання 03.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розділ 1 Технологія зв'язку на основі видимого світла</i>	до 13.09.2025 р.	
2.	<i>Розділ 2 Моделювання каналу у системах позиціонування на основі видимого світла</i>	до 27.09.2025 р.	
3.	<i>Розділ 3 Протоколи мультиплексування та модуляції у системах позиціонування VLC</i>	до 18.10.2025 р.	
4.	<i>Розділ 4 Дослідження системи позиціонування на основі існуючої інфраструктури</i>	до 01.11.2025 р.	
5.	<i>Висновки</i>	до 15.11.2025 р.	
6.	<i>Формування переліку використаних джерел</i>	до 23.11.2025 р.	
7.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	до 28.11.2025 р.	
8.	<i>Нормоконтроль</i>	до 01.12.2025 р.	
9.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 05.12.2025 р.	
10.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи магістра до захисту</i>	до 30.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти

_____ Лукомський І. В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ Якимчук Н. М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Лукомський І. В. Використання VLC у системах внутрішнього позиціонування. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Телекомунікації та радіотехніка» спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025. 68 с.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У роботі досліджено VLC-технологію для внутрішнього позиціонування та передачі даних. Розроблено математичну модель каналу, оптимізовано розміщення LED, проаналізовано методи модуляції та реалізовано прийом сигналу камерою з оцінкою BER. Отримані результати підтверджують практичну придатність системи.

Ключові слова: VLC, позиціонування, LED, модуляція, BER.

ANNOTATION

Lukomsky I. Using VLC In Indoor Positioning Systems. Manuscript.

Master's qualifying work of EP «Telecommunications and Radio Engineering» specialty 172 Electronic Communications and Radio Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025. 68 p.

Qualification work consists of an introduction, four sections, conclusions, a references, and appendices. The study investigates VLC technology for indoor positioning and data transmission. A mathematical channel model was developed, LED placement was optimized, modulation methods were analyzed, and signal reception by a camera with BER evaluation was implemented. The obtained results confirm the practical applicability of the system.

Keywords: VLC, Positioning, LED, Modulation, BER.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЯ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ВИДИМОГО СВІТЛА..	9
1.1 Принципи використання технологій видимого світла.....	9
1.2 Склад та функціонування VLC-систем позиціонування.....	13
1.3 Апаратні конфігурації систем позиціонування на основі світлодіодів.....	16
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ У СИСТЕМАХ ПОЗИЦІЮВАННЯ НА ОСНОВІ ВИДИМОГО СВІТЛА.....	25
2.1 Аналітична модель VLC-каналу	25
2.2 Оптимізація розташування світлодіодних джерел у системах зв'язку на основі видимого світла	30
2.3 Дослідження впливу схеми розміщення випромінювачів на точність позиціонування.....	33
2.4 Багатопроміньові ефекти у каналі видимого світла.....	35
РОЗДІЛ 3 ПРОТОКОЛИ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ ТА МОДУЛЯЦІЇ У СИСТЕМАХ ПОЗИЦІОНУВАННЯ VLC.....	36
3.1 Технології мультиплексування.....	38
3.2 Вибір методу модуляції в протоколах мультиплексування.....	40
3.3 Порівняльний аналіз енергетичної ефективності модуляції у VLC.	42
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ НА ОСНОВІ ІСНУЮЧОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ОСВІТЛЕННЯ ПРИМІЩЕНЬ	49
4.1 Архітектура базової VLC для задач внутрішнього позиціонування..	49
4.2 Вимоги та специфікації обладнання системи позиціонування.....	51
4.3 Дослідження впливу параметрів камери на роботу VLC-системи...	58
4.4 Оцінка якості системи локалізації об'єктів.....	62
ВИСНОВКИ.....	67
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68
ДОДАТКИ.....	69

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

VLC (Visible Light Communication) – зв’язок на основі видимого світла

VLP(Visible Light Positioning) – системи позиціонування на основі видимого світла

Li-Fi (Light Fidelity) – бездротова технологія передачі даних через світло

OCC (Optical Camera Communication) – передача даних за допомогою камер

FSO (Free Space Optics) – оптичний зв’язок у вільному просторі

IPS (Indoor Positioning System) – система внутрішнього позиціонування

LED (Light Emitting Diode) – світлодіод

RGB (Red-Green-Blue) – колірна модель для передачі даних

OOK (On-Off Keying) – модулювання ввімкненням та вимкненням сигналу

PWM(Pulse Width Modulation) – модуляція за шириною імпульсу

PPM (Pulse Position Modulation) – модуляція за позицією імпульсу

MPPM (Multipulse PPM) – багатоімпульсна модуляція

EPPM (Expurgated PPM) – оптимізована PPM-форма з обмеженою піковою потужністю

MEPPM (Multilevel EPPM) – багаторівнева модуляція за позицією імпульсу

SNR (Signal-to-Noise Ratio) – відношення сигнал/шум, показник якості оптичного сигналу

BER (Bit Error Rate) – частота бітових помилок

ВСТУП

Сучасні телекомунікаційні системи перебувають у фазі активного переходу до високошвидкісних та енергоефективних технологій зв'язку, здатних забезпечити надійну передачу інформації в умовах зростаючого навантаження на радіочастотний спектр. Одним із перспективних напрямів є зв'язок на основі видимого світла (Visible Light Communication, VLC), який поєднує функції освітлення та передачі даних, не створює електромагнітних завад та потенційно здатний замінити або доповнити традиційний Wi-Fi у приміщеннях. Особливу цінність VLC-технології становлять для систем внутрішнього позиціонування, де використання GPS є неможливим або неефективним.

Використання світлодіодів як випромінювачів та камер мобільних пристроїв як приймачів відкриває можливість створення недорогих, енергоефективних і масштабованих систем позиціонування та передачі даних. Проте точність позиціонування та якість прийому значною мірою залежать від геометрії розміщення джерел світла, режимів модуляції та характеристик каналу поширення сигналу.

Актуальність дослідження полягає у необхідності створення моделі VLC-системи, здатної забезпечувати не лише освітлення, але й точне позиціонування та передачу інформації в реальному часі. Оптимізація енергоспоживання, вибір методів модуляції та дослідження прийому камерою є важливими кроками до впровадження VLC у системи «розумних будівель», промислової автоматизації та IoT-середовищ.

Метою роботи є дослідження систем внутрішнього позиціонування на основі технології VLC, аналіз їх енергетичних та просторових характеристики, а також методів підвищення точності та ефективності передавання й прийому сигналу.

Об'єкт дослідження – системи внутрішнього позиціонування на основі технології VLC.

Предмет дослідження – методи побудови, оптимізації та прийому сигналів у VLC-системах.

Наукова новизна роботи полягає в розробці комплексного підходу до побудови VLC-системи позиціонування, який включає оптимізацію розташування LED-випромінювачів, порівняльний енергетичний аналіз методів модуляції та модель прийому сигналу камерою з оцінкою BER у реальних умовах роботи.

Завдання, які необхідно виконати:

- провести огляд сучасних технологій VLC та систем позиціонування на основі світла;
- розробити математичну модель VLC-каналу та оцінити вплив параметрів LED на характеристику каналу;
- здійснити аналіз розміщення LED-випромінювачів з метою підвищення точності позиціонування;
- виконати порівняльний аналіз методів модуляції систем видимого світла за енергоефективністю;
- дослідити вплив параметрів приймально-передавальних пристроїв на якість локалізації VLC-системи.

Окремі результати роботи були представлені у статті Якимчук Н. М., Лукомський І. В. Порівняльний аналіз енергоефективності методів модуляції у системах зв'язку на основі видимого світла. Перспективні технології та прилади. Луцьк: ЛНТУ, № 27 2025. С. 216-226. DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-29.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЯ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ВИДИМОГО СВІТЛА

1.1 Принципи використання технологій видимого світла

Системи зв'язку на основі видимого світла (Visible Light Communication, VLC) поступово виходять на рівень повноцінної альтернативи або принаймні ефективного доповнення до сучасних технологій бездротового зв'язку, зокрема Wi-Fi. Однією з головних проблем Wi-Fi у сучасних умовах є дефіцит вільних каналів у густонаселених міських районах або у великих житлових комплексах, де спостерігається перенасичення спектру. Натомість технологія VLC використовує оптичний діапазон видимого світла, який не проходить крізь стіни, що забезпечує високу повторну використовуваність каналів та підвищену ізоляцію між зонами передачі сигналу (рис. 1.1).

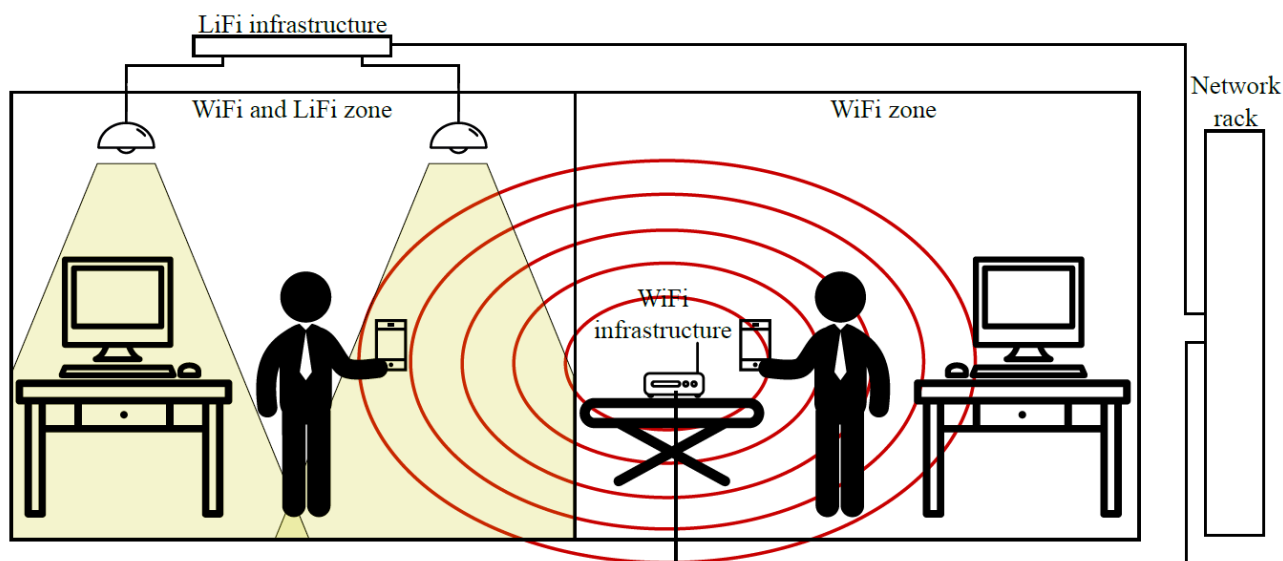


Рисунок 1.1 – Відмінність використання видимого світла та радіохвиль для передавання інформації [4]

Оскільки VLC працює у вільному частотному діапазоні, який наразі не регламентується жорсткими стандартами, розробники мають змогу створювати індивідуальні системи передачі даних різного призначення. Це стимулює активні дослідження та патентну діяльність провідних компаній, що спеціалізуються на

виробництві світлодіодних (LED) джерел світла та інтелектуальних пристроїв.

Однією з ключових переваг VLC є електромагнітна сумісність. Сигнали у видимому діапазоні не створюють перешкод для промислового обладнання або медичних приладів, які є чутливими до радіочастотних полів. У таких середовищах традиційно використовуються проводові рішення (Ethernet або оптоволокно), але вони обмежують мобільність пристроїв. Використання VLC або Li-Fi може забезпечити надійний та безпечний бездротовий зв'язок у цих сферах [9].

Останні стандарти Wi-Fi, зокрема IEEE 802.11ad, переводять роботу систем із діапазону 5 ГГц у 60 ГГц (мм-хвильовий діапазон). Такий перехід забезпечує більшу пропускну здатність, але призводить до значного зростання втрат на шляху поширення, які пропорційні квадрату несучої частоти. Для компенсації втрат необхідно або підвищувати потужність передавачів, або зменшувати відстані між точками доступу, або впроваджувати технології формування променя (beamforming) для фокусування енергії сигналу. Однак, у зв'язку з обмеженнями регуляторів щодо максимальної потужності для систем 4G / 5G, подальше її збільшення малоімовірне. Отже, очікується зменшення розмірів комірок у 5G / 6G мережах і, відповідно, зростання вартості інфраструктури, адже технологія формування променя (beamforming) потребує множинних антен.

На відміну від цього, VLC-технології використовують неліцензований спектр у діапазоні близько 350 ТГц, що практично усуває проблему спектрального дефіциту. Проте через значні оптичні втрати VLC-системи потребують високоякісних оптичних компонентів для забезпечення передачі на великі відстані. Наразі технологія VLC найчастіше застосовується у вільнопросторових оптичних (FSO) системах, які слугують магістральними каналами зв'язку між базовими вузлами інтернет-провайдерів.

Класифікація оптичних технологій зв'язку [2, 5]:

1. VLC (Visible Light Communication) – призначена для систем Інтернету речей (IoT) та машинних комунікацій (M2M), забезпечуючи ультранадійну передачу з малою затримкою (URLLC) у мережах 5G / 6G та Industry 4.0.

2. OCC (Optical Camera Communication) – використовує дисплей як

передавач і камеру як приймач. Цей підхід став можливим завдяки розвитку сенсорів зображення, що мають високу роздільну здатність і частоту кадрів.

3. FSO (Free Space Optics) – базується на лазерних діодах і використовується для магістральних з'єднань у випадках, коли прокладання оптоволокна є недоцільним.

4. Li-Fi (Light Fidelity) – повноцінна бездротова мережа, яка може повністю замінити або доповнити Wi-Fi. Вона використовує видиме світло для прийому і інфрачервоний діапазон для зворотної передачі. Зона покриття Li-Fi обмежується областю освітлення джерела світла.

Технології зв'язку на основі видимого світла (VLC, Li-Fi, OCC, FSO) формують новий напрям розвитку бездротових комунікацій, який поєднує оптичну фізику та телекомунікаційні принципи [4]. Завдяки величезній пропускній здатності, безпечності та електромагнітній сумісності VLC має потенціал стати ключовою технологією для Інтернету речей, промислової автоматизації, медицини та розумних будівель. Проте для широкого впровадження необхідні подальші дослідження, спрямовані на підвищення чутливості приймачів, зниження втрат при поширенні та інтеграцію з існуючими мережами 5G / 6G.

Технологія видимого світлового зв'язку (Visible Light Communication, VLC), окрім використання для передачі даних, відкриває значні можливості для створення систем внутрішнього позиціонування (Indoor Positioning Systems, IPS) [2, 9].

У середовищах, де традиційні системи позиціонування на основі GPS не працюють або дають значну похибку (наприклад, у будівлях, торговельних центрах, лікарнях, фабриках, підземних спорудах), VLC пропонує високоточну, безпечну та енергетично ефективну альтернативу. У VLC-системах позиціонування використовується те, що кожен LED-світильник має відомі координати розташування. Коли світлодіод випромінює світловий сигнал, що містить унікальний ідентифікатор, приймач (наприклад, фотодіод або камера смартфона) фіксує цей сигнал і визначає положення користувача у просторі.

Завдяки використанню світлодіодних (LED) освітлювальних пристроїв як

передавачів сигналів, системи VLC-IPS можуть поєднувати функції освітлення та навігації, забезпечуючи визначення координат користувача з точністю до кількох сантиметрів.

Приклади практичних застосувань [4, 5]:

– навігація у великих будівлях та промислових об'єктах дає змогу відображати маршрут до потрібної точки, використовуватись для точного відстеження руху роботизованих платформ або персоналу в умовах, де радіосигнали нестабільні, а також забезпечувати автоматичне керування освітленням і ресурсами;

– позиціонування на основі видимого світла може використовуватись у зонах, чутливих до радіочастотних випромінювань, наприклад, у лікарнях. Відомо, що сенсори МРТ можуть зазнавати перешкод від радіочастотних пристроїв;

– системи позиціонування на основі VLC можуть застосовуватись також у середовищах, де використання радіохвиль є недоречним – зокрема під водою або в умовах підземного видобутку;

– крім цього, VLC-технологія може бути використана для підтримки концепції Інтернету речей (IoT), оскільки розглядається як одна з провідних технологій бездротового зв'язку майбутнього.

Радіочастотні сигнали більш схильні до втрат, спричинених багатопроменевим поширенням, ніж сигнали видимого світла. Тому системи позиціонування VLC є більш надійними та передбачуваними.

Основна мотивація використання видимого світла для внутрішнього позиціонування полягає у зростаючій популярності світлодіодних (LED) джерел освітлення. LED-освітлення розглядається як основний кандидат на роль джерела світла майбутнього завдяки своїм численним перевагам: екологічності, енергоефективності, низькій вартості та можливості точного керування.

1.2 Склад та функціонування VLC-систем позиціонування

Системи внутрішнього позиціонування на основі світлодіодів за своєю архітектурою подібні до інших технологій, зокрема до систем, що базуються на Wi-Fi.

Розглянемо типовий приклад такої системи в умовах офісного приміщення, торгового залу або коридору, який можна змодельювати у вигляді кубічного простору (рис. 1.2). На стелі розміщено декілька світлодіодних ламп (передавачів), які одночасно виконують функцію освітлення та передачі даних.

На стороні приймача встановлюється оптичний сенсор – фотодіод або камера – на висоті h , м над рівнем підлоги. Цей сенсор виконує роль приймача сигналів, що надходять від LED-передавачів [1].

Кожен світлодіод ($Tx_1 \dots Tx_4$) передає у світловому сигналі ідентифікаційні дані (ID) та координати свого розташування у декартовій системі. Завдяки цьому приймач може оцінити власне положення у приміщенні.

Координатна система приміщення має локальне начало відліку (O), яке, у свою чергу, може бути пов'язане з глобальною системою координат (широта, довгота, висота). Це дає змогу переводити локальні координати користувача у глобальні географічні координати.

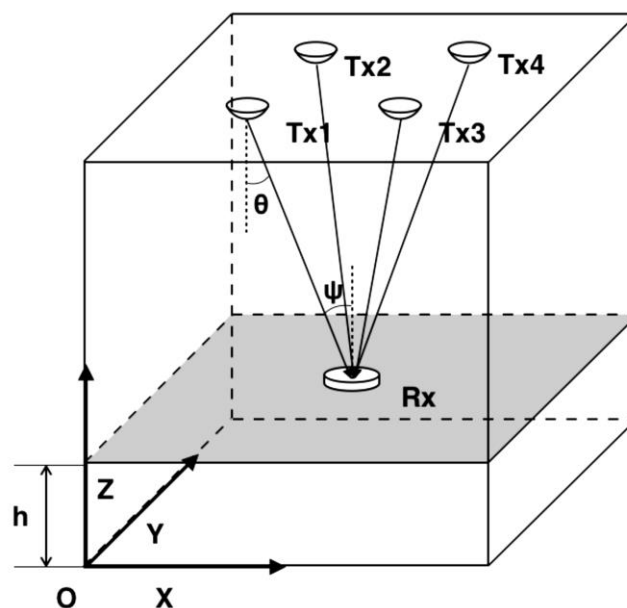


Рисунок 1.2 – Принцип внутрішнього позиціонування на основі світлодіодів [8]

Загальна структура системи (рис. 1.3) складається з двох частин:

1. Інфраструктура (передавач): включає LED-панель, драйвер для керування випромінюванням та процесор для формування пакету даних.

2. Приймальний модуль: містить блок декодування сигналу, модуль оцінки координат та інтерфейс користувача (UI), через який відображається отримане місцеположення.

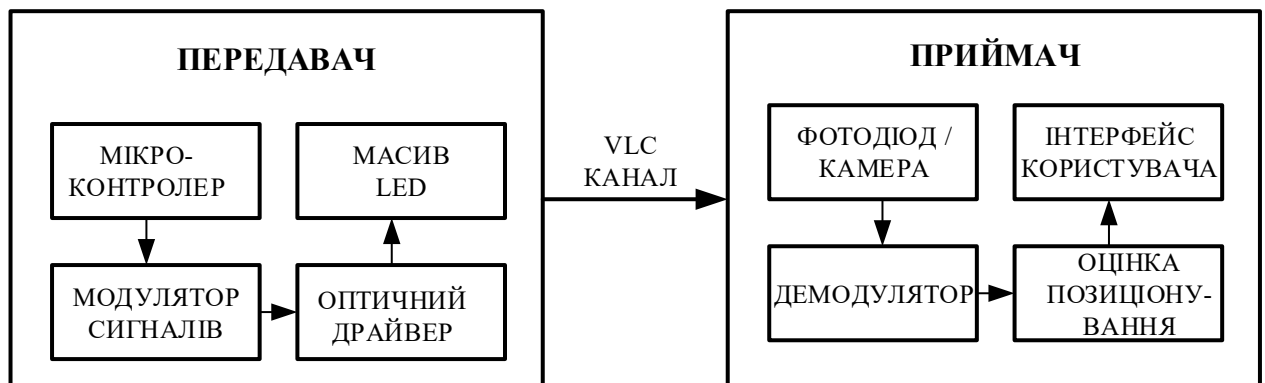


Рисунок 1.3 – Структура системи позиціонування [5]

У більшості систем LED-позиціонування джерелами є білі світлодіоди, які одночасно забезпечують освітлення приміщення. Існують два основні типи білих LED:

– комбіновані RGB-світлодіоди – формують білий колір шляхом змішування червоного, зеленого та синього випромінювань;

– світлодіоди з люмінофором – синє випромінювання покривається жовтим шаром люмінофору, що створює біле світло.

RGB-підхід є складнішим через необхідність стабільного балансу кольорів. Люмінофорні світлодіоди мають меншу смугу пропускання (~2 МГц), тому для покращення якості сигналу застосовують сині фільтри, що відсікають люмінофорний компонент. Однак це може впливати на якість освітлення, тому використовують методи еквалізації передавача або приймача.

Процес позиціонування умовно поділяється на три фази.

Фаза 1. Формування та передача сигналу.

На першому етапі процесор отримує інформаційний пакет від платформи

керування (Access Point, AP) і перетворює його у бінарну послідовність.

Кожен біт цієї послідовності визначає стан напруги – високий або низький – що дозволяє модулювати інтенсивність світлового потоку. Такий принцип модуляції називається On-Off Keying (OOK) або інтенсивною модуляцією (IM).

Типовий пакет містить понад 30 біт і включає:

- преамбулу – вказує приймачу початок пакету;
- ідентифікатор (ID) та координати передавача;
- код перевірки помилок (CRC);
- ознаку завершення пакету.

Якщо в приміщенні встановлено кілька світильників, приймач може одночасно спостерігати декілька джерел сигналу. У такому випадку необхідне застосування протоколів мультиплексування, які дозволяють передавати кілька сигналів через спільний канал. Найпоширенішими є частотне мультиплексування (FDM), при якому кожен передавач використовує свою піднесучу частоту та часове мультиплексування (TDM) – коли передавачі працюють у різні часові інтервали.

Фаза 2. Передача сигналу та особливості каналу.

Для ефективного передавання сигналів через канал VLC необхідна наявність прямої видимості (LOS) між світильником і приймачем. Саме компоненти прямої видимості є основою для алгоритмів позиціювання.

У разі відсутності LOS-сигналів через перешкоди (наприклад, меблі або колони), точність системи зменшується. Крім того, система чутлива до відбиттів сигналів від стін та скла, особливо у кутових зонах приміщення, що створює додаткові джерела похибок.

Фаза 3. Оцінка координат приймача.

Після прийому сигналу система аналізує його параметри, зокрема [8]:

- RSS (Received Signal Strength) – рівень потужності сигналу;
- TOA (Time of Arrival) – час прибуття сигналу;
- AOA (Angle of Arrival) – кут прибуття сигналу.

Ці параметри надходять до модуля позиціювання, де за допомогою

алгоритмів наближення або триангуляції визначаються координати користувача.

Математична модель каналу описує залежність сили світлового сигналу від відстані між передавачем і приймачем, враховуючи такі параметри, як: потужність LED, порядок випромінювання за законом Ламберта, площа фотодіода, кут випромінювання та кут прийому.

Під час оцінювання координат враховуються шуми та завади, а для підвищення точності використовуються методи оптимізації з урахуванням фізичних обмежень, таких як допустимий радіус дії освітлювача або зона переміщення приймача. Алгоритми позиціонування зазвичай інтегруються у навігаційне програмне забезпечення мобільних пристроїв. У практичних реалізаціях LED-позиціонування може поєднуватися з іншими технологіями (Wi-Fi, BLE, UWB), формуючи гібридні системи позиціонування.

Отримані результати відображаються на електронних картах приміщень через інтерфейс користувача.

1.3 Апаратні конфігурації систем позиціонування на основі світлодіодів

Системи позиціонування, що використовують світлодіоди (LED), є одним із перспективних напрямів розвитку оптичних бездротових технологій. Залежно від типу апаратних засобів та принципу вимірювання координат, такі системи поділяють на чотири основні групи (рис. 1.4) [6]:

- системи на основі фотодіодів;
- системи на основі камер;
- гібридні системи;
- зовнішні (outdoor) системи позиціонування.

Системи позиціонування на основі фотодіодів є найпоширенішими завдяки простоті реалізації, низькій вартості та можливості інтеграції в існуючі пристрої.

Фотодіод (або фотоприймач) є сенсором, що перетворює падаюче світлове випромінювання у електричний струм. Отриманий сигнал може містити корисну інформацію про потужність прийнятого сигналу (RSS), різницю часу приходу сигналів (TDOA) або кут прибуття сигналу (AOA) [2].

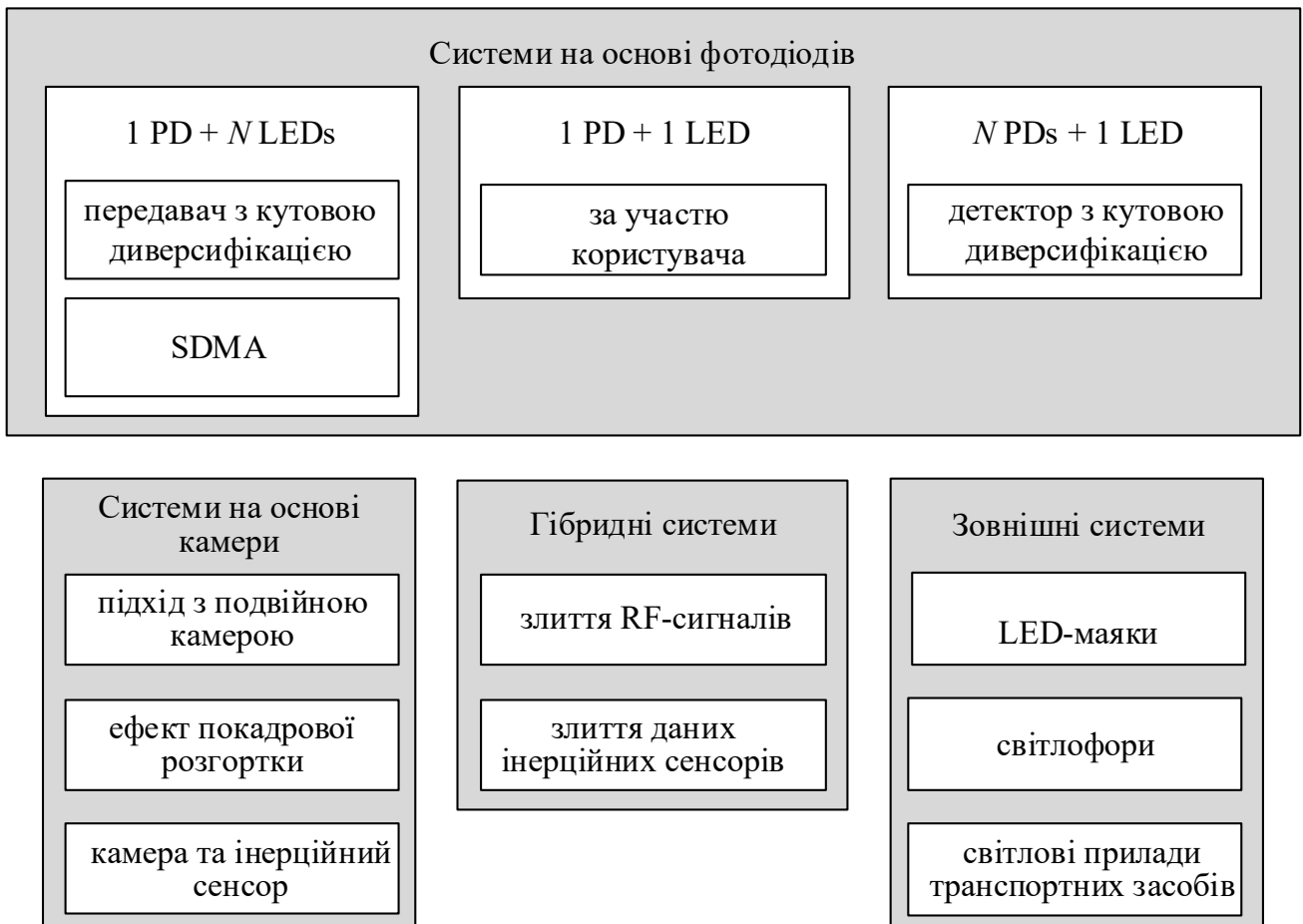


Рисунок 1.4 – Класифікація методів світлодіодного позиціонування [2]

Попри те, що фотодіод забезпечує обмежений обсяг інформації, його перевагами є низька вартість і простота реалізації [1]. Такі сенсори вже використовуються в більшості смартфонів як датчики освітленості для автоматичного регулювання яскравості. Крім того, КМОП-матриці камер фактично є масивами фотодіодів.

Однак через низьку швидкість вибірки оптичного процесора стандартні фотодіоди у смартфонах не можуть бути безпосередньо використані для високочастотних вимірювань. Одним із рішень є підключення зовнішньої світлочутливої плати через аудіороз'єм смартфона з використанням аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) для дискретизації сигналу. З розвитком технологій видимого світлового зв'язку (VLC) очікується, що мобільні пристрої зможуть обробляти високошвидкісні оптичні сигнали без додаткового обладнання.

Найпоширеніша конфігурація системи внутрішнього позиціонування на

основі LED передбачає використання одного фотодіода (PD) і декількох світлодіодів (LED).

Для систем, що реалізують метод RSS, необхідно щонайменше три LED для двовимірного позиціонування [2]. Для методів TDOA потрібні три джерела світла для 2D і чотири для 3D позиціонування. Особливе місце займають системи, засновані на методі AOA (Angle of Arrival) (рис. 1.5).

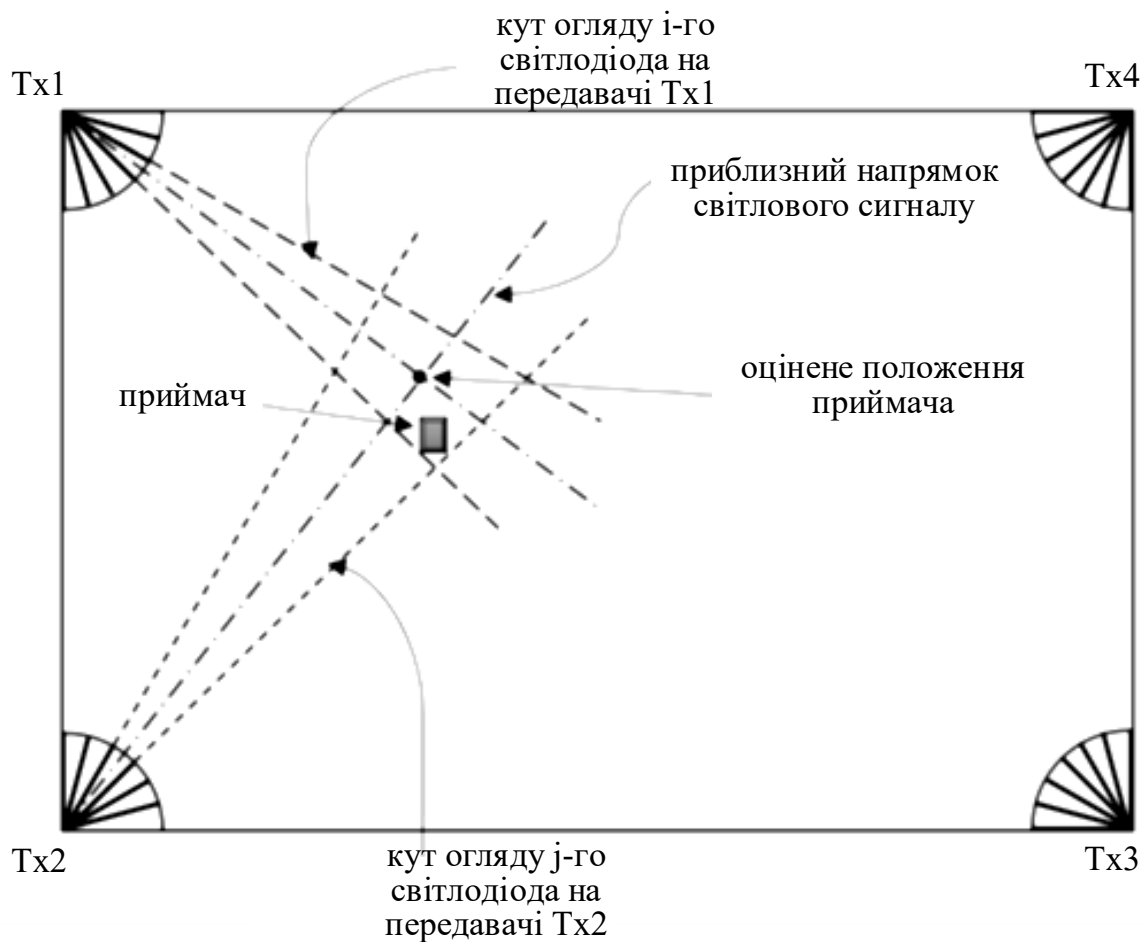


Рисунок 1.5 – Позиціонування на основі одного фотодіода та кількох LED [8]

У таких рішеннях приймач оточений кількома передавачами, кожен з яких складається з декількох елементів світлодіодного масиву з обмеженими кутами огляду. Якщо приймач фіксує сигнал від певного LED, це означає, що він знаходиться в межах його поля зору. Положення приймача визначається перетином полів зору кількох елементів із різних передавачів [1]. Точність позиціонування підвищується зі збільшенням кількості джерел випромінювання.

Одним із різновидів системи «один фотодіод – кілька світлодіодів» є рішення з передавачами з кутовим рознесенням, які складаються з декількох LED і біконвексної лінзи (рис. 1.6). Світлодіоди в межах одного передавача розрізняються за допомогою частотного поділу каналів (FDM). У результаті формується світловий малюнок, що створює на поверхні підлоги множину зон (наприклад, 25 областей). Коли приймач потрапляє в одну з таких областей, він приймає сигнали від певної групи світлодіодів, а його положення визначається як центр цієї області.

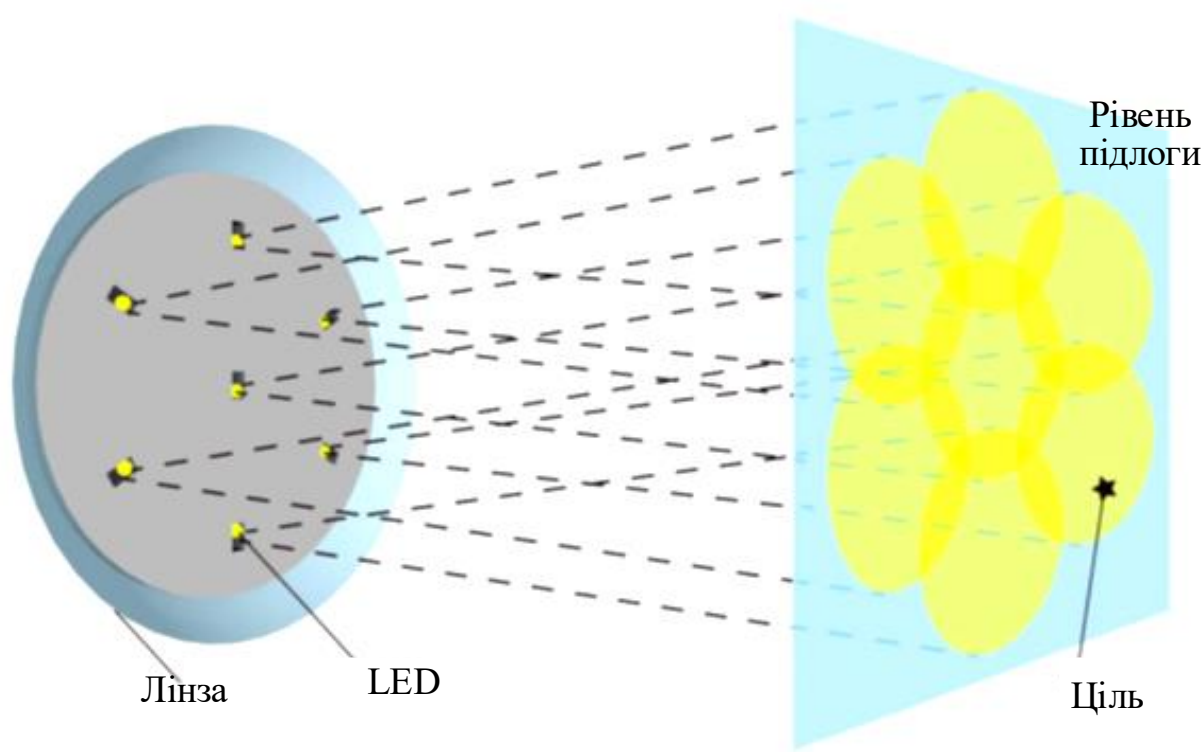


Рисунок 1.6 – Принцип дії передавачами з кутовим рознесенням [8]

Перевага такого підходу полягає в тому, що він не потребує точного знання характеристик передавачів і приймачів (наприклад, вихідної потужності або ламбертівських параметрів випромінювання) і не вимагає моделювання шуму, що підвищує стійкість системи до зовнішніх впливів. Основним недоліком є необхідність використання великої кількості передавачів для досягнення міліметрової точності.

Інший підхід базується на використанні суцільної панелі світлодіодного

масиву, що формує проєкцію на поверхню у вигляді сітки неперекривних зон. Наприклад, матриця 16×16 LED створює 256 окремих ділянок освітлення (пікселів), які майже не перекриваються. Позиціонування у такій системі здійснюється за принципом просторового розподілу сигналів (SDMA) – положення приймача визначається за світлодіодом, сигнал від якого він отримує. Під час експериментів відстежувався рух об'єкта зі швидкістю 333 кадри за секунду. При відстані 40 см у площині 8×8 м² похибка становила лише близько 1,64 пікселя.

1. Позиціонування за допомогою кількох фотодіодів і одного світлодіода [3]. Більш ефективним підходом є використання декількох фотодіодів для визначення положення відносно одного LED-передавача. Одним із перших прикладів такої системи є дисковий приймач із трьома фотодіодами, розміщеними на фіксованих відстанях один від одного (рис. 1.7).

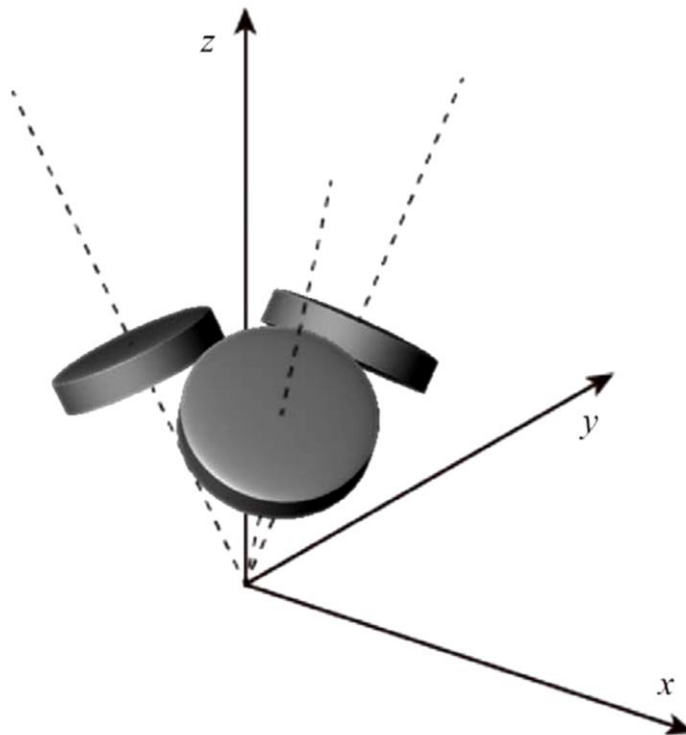


Рисунок 1.7 – Дисковий приймач із трьома фотодіодами [8]

За різницею рівнів сигналу (RSS) обчислювали горизонтальні відстані до джерела світла. Кут повороту пристрою визначався шляхом мінімізації відхилень

RSS між приймачами, а координати розраховувалися як центр трикутника.

Подальші дослідження вдосконалили цю концепцію, використавши нахилені фотодіоди. Така конструкція забезпечує різні кути прийому світла навіть за однакової відстані до передавача. Під час калібрування обчислювали різницю коефіцієнтів підсилення по куту падіння між приймачами. Положення приймача визначалося як точка перетину трьох ліній, що описували цю різницю. У кімнаті розміром $2 \times 2 \times 1$ м³ система досягала точності близько 6 см.

2. Принцип дії камерних систем позиціонування. Камера смартфона, або ж оптичний сенсор зображення, може використовуватись для внутрішнього позиціонування (IPS). Вона послідовно фіксує зображення світлодіодних маяків, а програмне забезпечення аналізує їхнє розташування на знімку для визначення координат приймача. Основна інформація, що використовується в таких системах – кут прибуття сигналу (AOA), який визначається з позицій маяків у координатній системі зображення.

Використання потужності сигналу (RSS) у таких системах є неефективним, оскільки інтенсивність світла на зображенні не може бути точно виміряна без спеціалізованих дорогих сенсорів. Найпоширенішим є підхід із однією камерою, інтегрованою у смартфон, що дозволяє реалізувати систему без додаткового обладнання.

Ключовим принципом камерних IPS є ефект покадрового зчитування, що виникає в CMOS-матрицях при короткому часі експозиції [3]. Коли світлодіоди випромінюють світло, модульоване методом On-Off Keying, камера зчитує зображення построково – по колонках пікселів. Якщо світло вимикається швидше, ніж сенсор встигає зчитати рядок, на зображенні з'являється характерний «штриховий» візерунок із чергуванням світлих і темних смуг (рис. 1.8).

Цей ефект дає змогу зчитувати передану LED інформацію (ідентифікаційний код, координати тощо) безпосередньо із одного кадру. Для цього кожен світлодіод передає свій код за допомогою частотного поділу каналів (FDM) або комбінованих методів модуляції (наприклад, гібрид чистих тонів і Манчестерського кодування).

Обробка зображення включає обрізання, фільтрацію (наприклад, гаусове розмиття), бінаризацію та виявлення контурів. Для коректного розпізнавання необхідне калібрування порогових значень яскравості, оскільки в реальних умовах рівень світла під час «OFF» може бути вищим, ніж очікується через фонове освітлення.

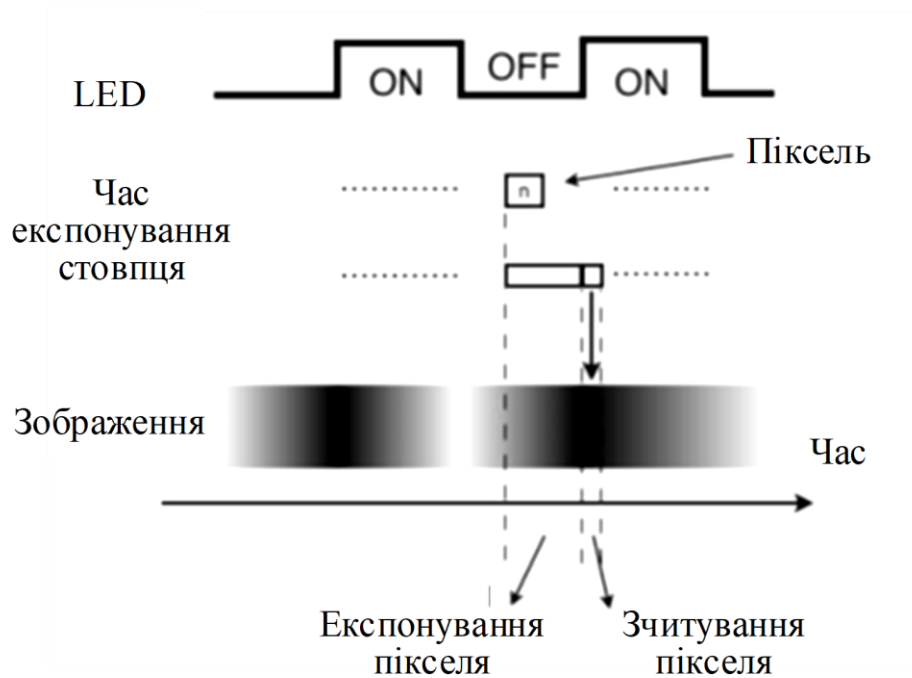


Рисунок 1.8 – Принцип покадрового зчитування, що виникає в CMOS-матрицях при короткому часі експозиції [3]

Для підвищення точності та усунення похибок, пов'язаних із кутом огляду, застосовується схема з двома камерами, розміщеними горизонтально на одній висоті. Світлові сигнали від LED після проходження крізь лінзи проєктуються на сенсори, утворюючи подібні трикутники в обох площинах зображення (рис. 1.9).

Знаючи фокусну відстань, координати проєкцій та базову відстань між об'єктивами, можна обчислити положення LED за принципом тригонометричної трілатерації. На відміну від АОА-методу, цей підхід дозволяє безпосередньо вимірювати відстані між передавачами та приймачем, що підвищує стабільність визначення координат.

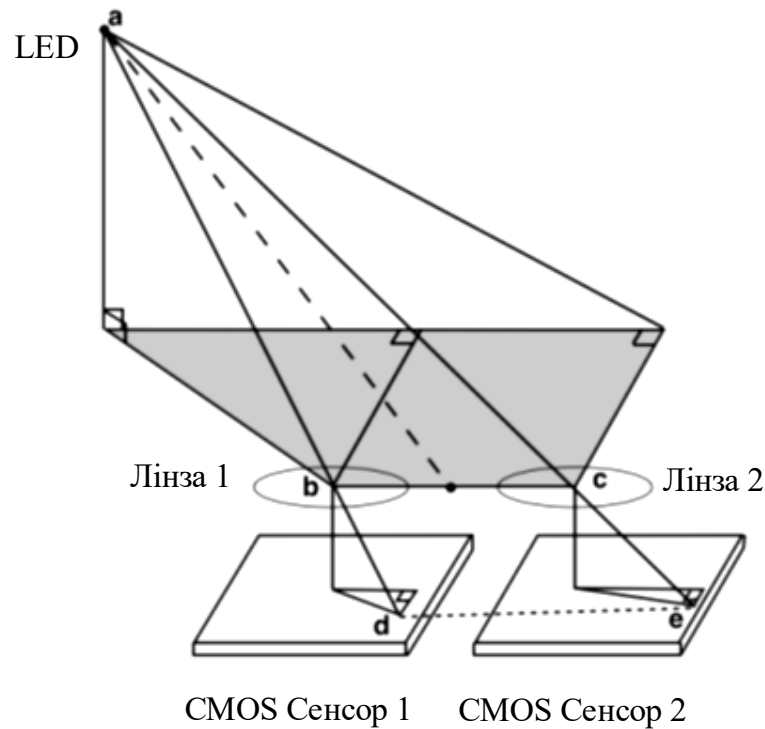


Рисунок 1.9 – Техніка позиціонування з використанням двох камер [8]

3. Гібридні системи позиціонування поєднують технології видимого світлового зв'язку (VLC) з іншими методами – наприклад, радіочастотними системами (RF) або інерціальними сенсорами [6]. Більшість сучасних гібридних систем комбінують LED-сигнали з інерціальними сенсорами – акселерометрами та гіроскопами. Це дає змогу враховувати нахил і обертання приймача, що особливо важливо для тривимірного позиціонування.

Інерціальні сенсори вимірюють положення пристрою у просторі, а LED-маяки уточнюють абсолютні координати. Такий підхід компенсує похибки, які накопичуються в процесі руху. Таке поєднання допомагає подолати типові проблеми LED-позиціонування: неточність параметрів випромінювачів, зміну положення приймача у просторі та затінення світлового сигналу об'єктами.

4. Системи позиціонування у зовнішньому середовищі розробляються для того, щоб забезпечити точнішу навігацію для транспортних засобів і пішоходів, ніж це робить GPS. Хоча і GPS, і видиме світло (VLC) використовують електромагнітні хвилі, підхід до побудови зовнішніх LED-систем суттєво відрізняється від внутрішніх через інші умови середовища, типи освітлення та рух об'єктів.

На відміну від внутрішніх систем, де передавачі (світильники) мають фіксоване положення, зовнішні джерела світла, такі як світлофори, фари автомобілів або вуличні ліхтарі, часто розташовані нерівномірно або перебувають у русі. До того ж, значно сильніше впливають перешкоди від природного освітлення.

Одним із ключових напрямів розвитку є позиціонування «транспорт-інфраструктура» (V2I), де світлофори виступають передавачами даних. Їхні LED-панелі можуть передавати закодовану інформацію, наприклад, про своє місцезнаходження, яку сприймає камера автомобіля. Другий напрям – позиціонування «транспорт-транспорт» (V2V), коли автомобілі обмінюються сигналами через фари та задні ліхтарі. Вимірюючи різницю у часі прибуття сигналів, система обчислює відстань між машинами з точністю до кількох сантиметрів.

Окремі розробки стосуються позиціонування в тунелях, де GPS не працює. Системи VLC у таких умовах комбінують сигнали від інфраструктури та інших автомобілів. Камера виділяє потрібні джерела світла за інтенсивністю, після чого обчислює просторове положення автомобіля.

Інша галузь – позиціонування в підземних шахтах, де радіосигнали нестабільні. Тут VLC-система використовує ідентифікатори світлодіодних ламп, модульованих за схемою вмикання / вимикання (OOK), а фотодіод визначає положення за наближенням до активних джерел. Регулюючи кількість увімкнених ламп, можна змінювати точність позиціонування. Останній напрям – підводне позиціонування, важливе для навігації автономних підводних апаратів (AUV / ROV).

Таким чином, зовнішні LED-системи демонструють значний потенціал для заміни або доповнення GPS у складних умовах – у містах, тунелях, шахтах чи під водою. Попри труднощі, пов'язані з рухомими джерелами світла, сильним зовнішнім освітленням і потребою в швидкій обробці даних, VLC-технології вже забезпечують високу точність і відкривають перспективи для розумних транспортних систем майбутнього [4].

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ У СИСТЕМАХ ПОЗИЦІЮВАННЯ НА ОСНОВІ ВИДИМОГО СВІТЛА

Системи позиціювання на основі видимого світла (Visible Light Positioning, VLP) є перспективним напрямом розвитку сучасних бездротових технологій, що використовують унікальні властивості світлодіодного освітлення для одночасної передачі даних і визначення координат користувача. На відміну від традиційних систем позиціювання, які функціонують у радіочастотному діапазоні, VLP-системи ґрунтуються на оптичній передачі сигналів, що забезпечує високу точність визначення місцеположення, відсутність радіоперешкод і безпечність для людського організму.

Оскільки видиме світло не проходить крізь стіни, а канал передачі формується в межах приміщення, такі системи особливо ефективні для внутрішнього позиціювання – у торгових центрах, лікарнях, офісах, музеях, аеропортах та інших об'єктах із розгалуженою внутрішньою інфраструктурою. Проте фізична природа оптичного каналу накладає свої обмеження: на передавання сигналів впливають геометрія простору, розташування світильників, відбиття від поверхонь, форма випромінювачів і приймачів. Тому точність позиціювання залежить від адекватності моделі, яка описує процес поширення оптичного випромінювання від світлодіода до фотодетектора.

Саме модель каналу визначає зв'язок між потужністю прийнятого сигналу, кутами випромінювання і приймання, а також характеристиками оптичних елементів. Розуміння цих процесів є ключем до створення ефективних алгоритмів позиціювання, оптимізації апаратної частини системи та забезпечення високої просторової роздільної здатності.

2.1 Аналітична модель VLC-каналу

Передача сигналу у системах видимого світла відбувається у вигляді модуляції інтенсивності випромінювання LED-джерел, що охоплює довжини

хвиль від 380 до 750 нм та сприймається фотодетектором приймача. На відміну від радіохвиль, світлові сигнали не поляризуються і не проникають крізь непрозорі об'єкти, тому зв'язок між передавачем і приймачем зазвичай реалізується по прямій лінії видимості (рис. 2.1).

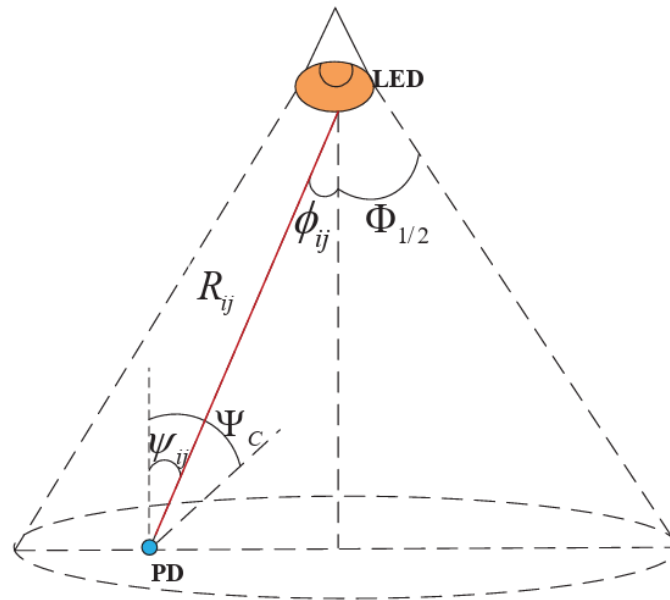


Рисунок 2.1 – Типова LOS-модель VLP каналу [8]

Випромінювання світлодіода має певну діаграму спрямованості, яку найчастіше описують ламбертівським законом. Згідно з цим законом, інтенсивність випромінювання є максимальною вздовж нормалі до поверхні випромінювача і зменшується пропорційно косинусу кута між напрямком випромінювання та цією нормаллю. Тобто світлодіод можна розглядати як ламбертове джерело, що рівномірно розсіює енергію в межах заданого просторового сектора.

Для систем позиціонування це означає, що сигнал, прийнятий фотодетектором, залежить не лише від відстані між світильником і приймачем, а й від просторового розташування обох елементів відносно один одного. Кут випромінювання та кут приймання формують основні геометричні параметри каналу, а їх точне врахування дає можливість визначити реальну інтенсивність оптичного потоку на вході детектора.

Математична модель, що описує потужність сигналу, який досягає приймача, враховує як геометричну структуру системи, так і властивості оптичних компонентів. У найпоширенішій формі вона має вигляд виразу (2.1) [8]:

$$P_i(\theta, \psi) = \frac{(m_i+1)A_R P_{T_i}}{2\pi D_i^2} \cos^{m_i}(\theta) \cos^M(\psi) T_s(\psi) g(\psi), \quad (2.1)$$

де D_i – відстань між i -м світлодіодом і приймачем;

A_R – ефективна площа фотодетектора;

P_{T_i} – оптична потужність джерела;

θ – кут випромінювання;

ψ – кут падіння на приймач;

$T_s(\psi)$ – коефіцієнт пропускання оптичного фільтра;

$g(\psi)$ – коефіцієнт підсилення концентратора;

m та M – ламбертівські порядки для джерела та приймача відповідно.

Порядок ламбертівського розподілу визначає ступінь концентрації випромінювання. Чим більшим є m , тим вузькою стає діаграма спрямованості, тобто світло сконцентроване у більш вузькому конусі [8]. Для практичного розрахунку порядки m і M визначаються напівкутами випромінювання $\theta_{1/2}$ і приймання $\psi_{1/2}$:

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos\theta_{1/2})}, \quad M = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos\psi_{1/2})}. \quad (2.2)$$

У разі відсутності лінзи на приймачі коефіцієнти $T_s(\psi)$ і $g(\psi)$ приймають значення одиниці. Зі збільшенням площі приймального фотодетектора A_R зростає чутливість системи, адже більша площа сприймає більше світла. Водночас надмірне збільшення A_R знижує швидкодію через підвищення паразитної ємності, що обмежує смугу пропускання. Таким чином, площа детектора визначається як компроміс між чутливістю та частотною характеристикою системи.

Для побудови адекватної моделі каналу необхідно експериментально

визначити ламбертівські параметри випромінювача і приймача. Це досягається шляхом вимірювання інтенсивності світлового потоку при різних кутах падіння та випромінювання. Щоб отримати M , необхідно виміряти інтенсивність світла під кількома кутами падіння на певній відстані, суворо дотримуючись кута опромінення на рівні 0° , щоб зафіксувати значення $\cos^m(\theta)$, як показано на рисунку 2.2. Потім результат порівнюється з діаграмою спрямованості Ламберта.

Аналогічно, m оцінюється шляхом вимірювання інтенсивності світла під різними кутами опромінення з кутом падіння $\psi = 0^\circ$.

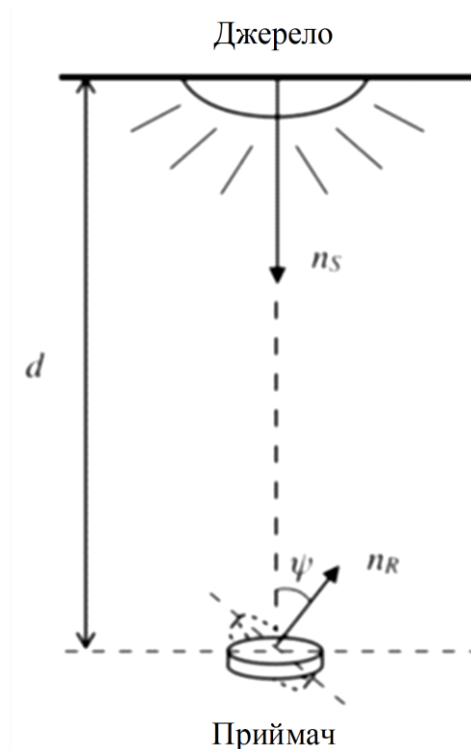


Рисунок 2.2 – Вимірювання інтенсивності світлового потоку при різних кутах падіння та випромінювання [8]

У типовому експерименті приймач обертається навколо світлодіода, а рівень сигналу реєструється на фіксованій відстані. Отримані результати порівнюють із теоретичною ламбертівською кривою, що дозволяє уточнити значення параметрів m і M (рис. 2.3).

Дослідження показали, що для типових комерційних LED-джерел порядок m коливається від 1 до 3, а для фотодетекторів із оптичними лінзами порядок M може сягати 2 або більше. При цьому спостерігається гарне узгодження між

вимірними даними та теоретичними кривими, що підтверджує достовірність ламбертівської моделі для опису каналу в умовах прямої видимості.

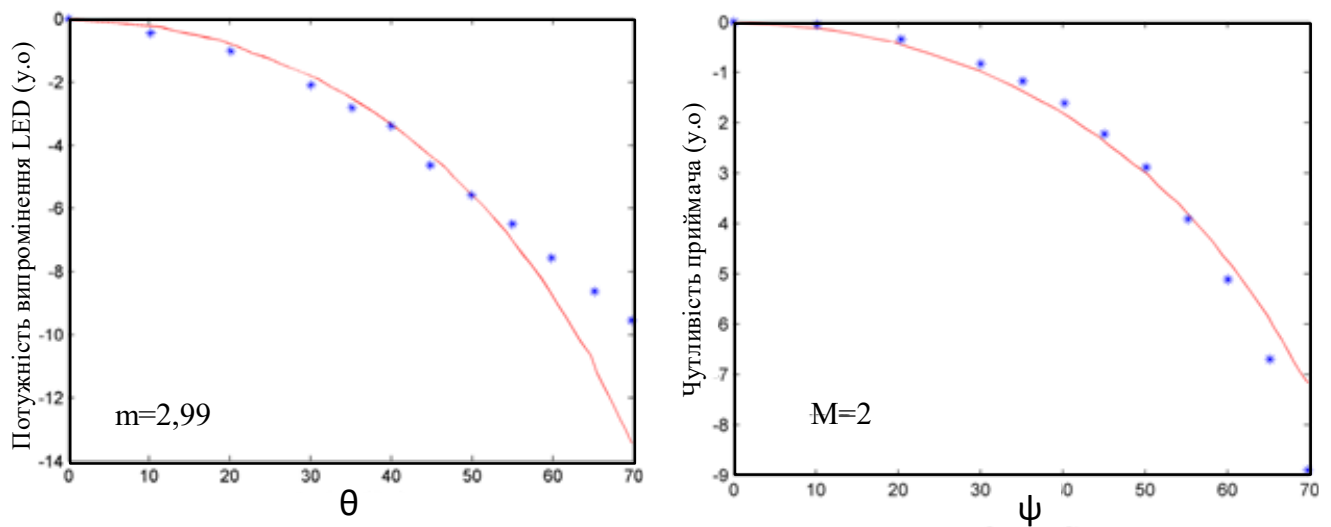


Рисунок 2.3 – Зв'язок між потужністю прийнятого світла та кутами. (а) Діаграма спрямованості Ламберта опорних світлодіодів та (б) кутове сприйняття приймача.

Обидві криві апроксимовані функцією Ламберта (червона суцільна лінія) [6]

Одним із ключових факторів, що впливають на точність оцінювання відстані між приймачем і джерелом, є значення параметра m . При збільшенні m світловий потік стає більш спрямованим, що підвищує відношення сигнал/шум і, відповідно, точність оцінки координат. У межах експериментальних досліджень показано, що при зростанні m з 30 до 80 середньоквадратична похибка оцінки відстані зменшується майже в п'ять разів. Проте в умовах великих кутів випромінювання ($45\dots60^\circ$) надмірне збільшення m може спричинити зворотний ефект – сигнал на периферії зони покриття суттєво послаблюється, що призводить до зниження точності позиціонування.

Таким чином, значення ламбертівського порядку повинно бути обране з урахуванням просторової геометрії системи та розподілу світильників у приміщенні. Для алгоритмів трилатерації або мультилатерації похибка у визначенні відстані безпосередньо впливає на точність відновлення координат у двовимірному та тривимірному просторі.

Реальні світлодіоди зазвичай мають оптичні лінзи, що формують діаграму

випромінювання. Геометрія лінзи, показник заломлення матеріалу та розташування світлодіодного кристалу істотно впливають на форму розподілу інтенсивності. Для опису таких систем класична ламбертівська модель модифікується, вводячи експоненційні функції для врахування оптичного підсилення.

Відповідно до узагальненої моделі, потужність прийнятого сигналу описується виразом [6]:

$$P_r = \left(\frac{P_t}{d^2}\right) C_{opt} G_t(\theta) G_r(\psi), \quad (2.3)$$

де $G_t(\theta) = \exp\left(-\frac{\theta S_t}{k_t}\right)$;

$G_r(\psi) = \exp\left(-\frac{\psi S_r}{k_r}\right)$;

S_t і S_r – коефіцієнти, які визначають нахили експоненційних характеристик, що залежать від форми лінз.

Така модель точніше описує поведінку реальних світлодіодів і приймачів, особливо у випадках, коли їхня діаграма спрямованості відхиляється від ідеального ламбертівського профілю.

2.2 Оптимізація розташування світлодіодних джерел у системах зв'язку на основі видимого світла

Постановка задачі полягає у визначенні координат та потужності випромінювання кількох світлодіодів, встановлених на стелі приміщення, таким чином, щоб середня освітленість у робочій площині відповідала нормативним значенням, розподіл освітлення був рівномірним, а сумарне енергоспоживання системи було мінімальним. Додатково передбачається, що умови освітлення мають забезпечувати достатній рівень сигналу для фотодіодного приймача VLC-системи, який розташований у межах того ж простору.

Для спрощення моделі приймаються такі припущення. Простір

розглядається як прямокутна кімната з рівною робочою площиною, на якій розміщуються точки спостереження (області вимірювання освітленості). Світлодіоди закріплені на стелі на однаковій висоті (рис. 2.4). Враховується лише прямий (LOS) компонент поширення світла без урахування багаторазових відбиттів від стін та стелі.

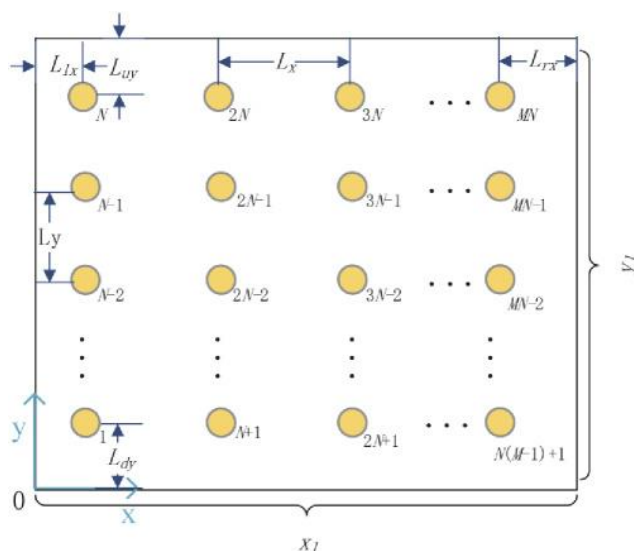


Рисунок 2.4 – Розміщення LED передавачів

Кожен світлодіод вважається ламбертовим джерелом, інтенсивність випромінювання якого описується законом (2.4):

$$I(\phi) = I_0 \cos^m(\phi), \quad (2.4)$$

де I_0 – інтенсивність випромінювання в напрямку нормалі;

ϕ – кут випромінювання;

m – порядок ламбертового випромінювання, що залежить від напівкута розкриття променя.

Освітленість у довільній точці площини визначається сумою внесків від усіх джерел за виразом (2.5):

$$E = \sum_{i=1}^N \frac{I_i \cos^m(\phi_i) \cos(\psi_i)}{d_i^2}, \quad (2.5)$$

де d_i – відстань від i -го LED до точки спостереження;

ψ_i – кут між нормаллю до площини та напрямком на джерело.

Потужність кожного світлодіода (P_i) пропорційна його інтенсивності, тому цільова функція мінімізації формулюється як:

$$\min \sum_{i=1}^N P_i, \quad (2.6)$$

за умов забезпечення мінімального рівня освітленості E_{min} у всіх точках площини та мінімальної нерівномірності розподілу освітленості.

Для оцінювання рівномірності використовують дисперсію або стандартне відхилення від середнього значення освітленості.

Для реалізації цієї задачі пропонується алгоритм, який складається з кількох основних етапів. На початковому етапі задаються геометричні параметри приміщення, висота розміщення джерел, оптичні характеристики LED та кількість точок спостереження на робочій площині. Далі формуються кілька варіантів початкового розташування світлодіодів. Для кожного з варіантів обчислюється розподіл освітленості в заданих точках за наведеною моделлю. Після цього виконується аналіз середньої освітленості, рівномірності та сумарної потужності випромінювачів. У разі невиконання умов освітлення положення або потужність джерел коригуються. Алгоритм може реалізовуватись як послідовний перебір варіантів, так і за допомогою чисельної оптимізації, наприклад методом градієнтного спуску або простих генетичних алгоритмів.

Очікуваним результатом роботи є отримання набору координат і потужностей світлодіодів, що забезпечують нормативну освітленість (наприклад, 300 лк для офісного приміщення) при мінімальному енергоспоживанні. Додатковим результатом є побудова карти розподілу освітленості, яка дозволяє наочно оцінити рівномірність освітлення в просторі. У разі розширення моделі може бути додано розрахунок оптичного сигналу, що надходить на фотодіод приймача, для перевірки забезпечення необхідного співвідношення сигнал/шум.

2.3 Дослідження впливу схеми розміщення випромінювачів на точність позиціонування

Розглянули три типові конфігурації чотирьох LED: симетрична сітка 2×2, розміщення в кутах (із невеликим відступом), та скупчення в центрі (рис. 2.5).

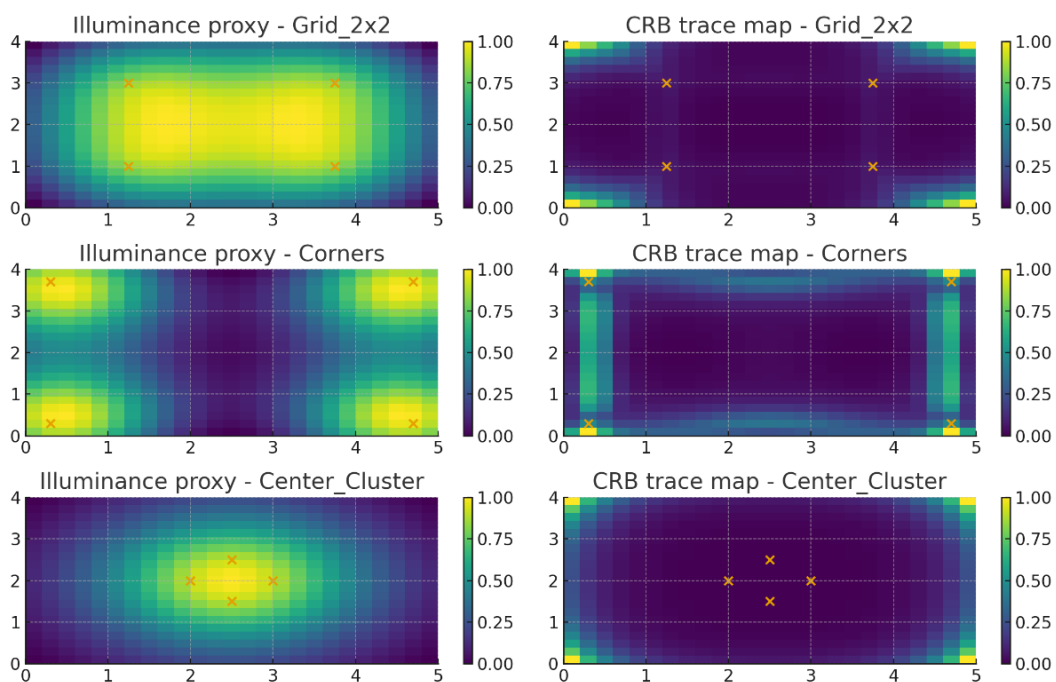


Рисунок 2.5 – Дослідження конфігурації 4 LED

Визначена фізична модель прийнятої моделі LOS з ламбертівським профілем (параметр m для $\theta_{1/2}=60^\circ$). Параметри моделі: $\Phi_v=1200$ лм, $A_R=1\cdot 10^{-4}$ м², висота розташування джерел $h=2.2$ м, рівень вимірювань на висоті 0.8 м. Для спрощення аналізу реальна освітленість (у люксах) замінена проксі-показником – відносною інтенсивністю сигналу, пропорційною прийнятій потужності P_r .

Побудовано карти «освітленості» на робочій площині. На графіках освітленості подано просторовий розподіл відносної інтенсивності випромінювання на робочій площині аудиторії, отриманий як функція прийнятої потужності P_r від кожного світлодіодного передавача. Червоні та жовті ділянки відповідають зонам з максимальною інтенсивністю сигналу (найвищою освітленістю); зелені та сині області позначають зони, де сигнал слабший, тобто

рівень освітлення знижується.

Отримано карти точності позиціювання (CRB Trace) на основі коваріаційної матриці оцінювача. CRB trace є сумою власних значень матриці коваріації оцінок координат – тобто мірою очікуваної середньої квадратичної похибки позиціювання. Чим менше значення CRB trace, тим вища потенційна точність визначення положення приймача.

Проведено спрощену Monte-Carlo перевірку: для кожної конфігурації згенеровано множину випадкових місць приймача та вимірювань із доданим гаусовим шумом; позиція оцінювалась нелінійним найменшими квадратами (RSS→LS). Отримано середнє значення помилки (RMSE) для кожної конфігурації.

Порівнюючи обидва набори графіків (Освітленості та точності позиціонування), можна дійти висновку, що рівномірність освітлення безпосередньо корелює з рівномірністю точності позиціонування.

Таким чином, оптимальним розташуванням LED-передавачів для приміщення площею до 20 м² є сітчасте (Grid 2×2) розміщення, яке гарантує не лише комфортне освітлення, а й мінімальну середню похибку визначення координат у системах позиціонування на основі видимого світла.

Отже, можна зробити висновок, що розрахунок карти освітленості дасть точні значення інтенсивності світлового потоку у кожній точці простору (у люксах), які можна інтерпретувати як пропорційні оптичній потужності сигналу у фотодіоді. Для задач позиціювання на основі видимого світла (VLP / VLC-позиціювання) у фазі попереднього планування можуть бути корисні програмні додатки, які дозволяють розраховувати освітленість приміщень з урахуванням геометрії та розташування LED/лумінарів. Наприклад, за допомогою програм DIALux чи Relux (професійне планування освітлення та датчиків) можна:

- визначити, які зони в приміщенні будуть «сильно освітлені» (місця з високим потенційним оптичним потоком) і якими зонами слід уникати;
- розмістити LED таким чином, щоб покрити максимальну площу з хорошим освітленням, мінімізувати «мертві зони»;

– отримати карту освітленості, яку можна накласти на модель сигналу (де освітленість –пропорційна інтенсивності, яку може сприймати фотодіод);

– використовувати ці дані як вхідні параметри для власних симуляцій оптичного каналу (розрахунок сигнал/шум, атенюація з відстанню, кутові залежності).

Для повноцінного дослідження позиціювання необхідно доповнити результати від освітлювальних розрахунків власними моделями (наприклад, модель LOS, падіння сигналу, кутові коефіцієнти) та алгоритмами позиціювання.

Розроблена модель може бути застосована для оптимізації розташування світильників у системах «розумного освітлення» та інтегрованих VLC-системах зв'язку. Така оптимізація дозволяє не лише знизити енергоспоживання, але й підвищити ефективність використання освітлювального обладнання, забезпечуючи баланс між комфортом освітлення та якістю передавання даних.

2.4 Багатопроменеві ефекти у каналі видимого світла

У реальних приміщеннях оптичний сигнал доходить до приймача не лише прямим шляхом, але й через численні відбиття від стін, підлоги, меблів чи інших поверхонь. Ці відбиті компоненти можуть як підсилювати, так і спотворювати основний сигнал. Вплив багатопроменевості залежить від коефіцієнтів відбиття матеріалів, їхньої фактури та кольору [8].

У більшості систем VLP основний внесок у формування сигналу робить прямий промінь, тоді як відбиті сигнали враховують як додатковий шум або систематичну похибку. Проте у приміщеннях із сильно відбивними поверхнями цей ефект може бути суттєвим, тому для підвищення точності позиціювання використовують складні моделі, що враховують багатопроменеве поширення, наприклад за допомогою методів трасування променів або статистичних підходів.

Урахування багатопроменевих компонент дозволяє отримати реалістичні оцінки потужності сигналу, але водночас значно ускладнює розрахунки. Тому практичні системи часто поєднують спрощену ламбертівську модель для прямої компоненти та емпіричні поправки для відбитих сигналів.

РОЗДІЛ 3

ПРОТОКОЛИ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ ТА МОДУЛЯЦІЇ У СИСТЕМАХ ПОЗИЦІОНУВАННЯ VLC

3.1 Технології мультиплексування VLC

Технологія зв'язку на основі видимого світла довела, що світлодіоди (LED) можуть одночасно виконувати функції освітлення та передавання інформації. Однак ефективність сучасних LED-орієнтованих IPS обмежується смугою демодуляції VLC, особливо у багатоджерельних сценаріях, де багатопроменеве передавання створює суттєві труднощі для приймачів із обмеженими обчислювальними можливостями, таких як CMOS-камери (Complementary Metal Oxide Semiconductor) [3]. Для вирішення цих проблем було розроблено низку методів мультиплексування – часовий (TDM), частотний (FDM), поляризаційний та просторовий поділ каналів. Їх використання дозволяє здійснювати паралельну передачу даних та, відповідно, підвищувати пропускну здатність системи.

У системах позиціонування на основі LED, випромінювачі передають модульовані сигнали, що містять ідентифікатор, координати та потужність випромінювання. Ця інформація використовується приймачем для обчислення відстані до кожного світлодіода. Оскільки кілька джерел світла можуть одночасно передавати власні пакети даних з високою швидкістю модуляції, постає потреба у використанні спеціальних протоколів мультиплексування, які забезпечують правильне виділення та обробку інформації кожного джерела.

Розглянемо основні типи протоколів мультиплексування.

1. Частотне мультиплексування (FDM). Протокол FDM (Frequency Division Multiplexing) розділяє загальну смугу пропускання VLC-середовища на серію неперекривних підсмуг частот, кількість яких відповідає числу активних світлодіодів. Кожна підсмуга використовується для передавання окремого сигналу.

Схематично така структура наведена на рисунку 3.1 (а).

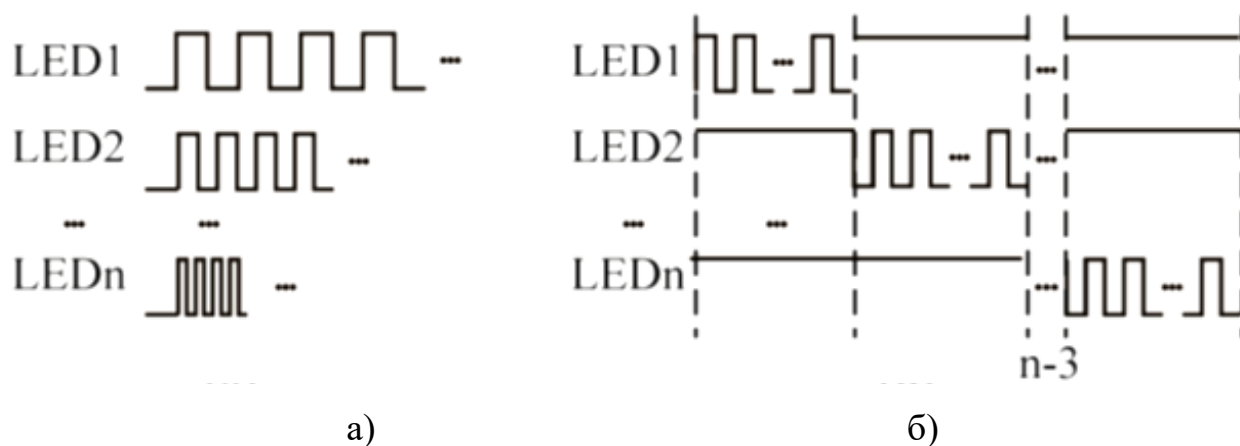


Рисунок 3.1 – Послідовності кадрів для протоколів мультиплексування

а) частотне; б) часове [8]

Для підвищення незалежності сигналів у системах FDM застосовується ортогональне частотне мультиплексування (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing), добре відоме у бездротових системах зв'язку, таких як 4G. OFDM використовує велику кількість взаємно ортогональних піднесучих сигналів, що дозволяє ефективно працювати в умовах вузькосмугових завад або багатопроменевого загасання. Такий підхід успішно використовується у системах локалізації на основі LED.

2. Часове мультиплексування (TDM). Протокол TDM (Time Division Multiplexing) розділяє весь час передачі на кілька часових інтервалів (тайм-слотів). У кожному слоті сигнал одного LED активний лише в межах цього інтервалу. Світлодіоди синхронно перемикаються між слотами на обох кінцях лінії передачі, як показано на рисунку 3.1 (б).

Методи позиціонування, що використовують TDM, суттєво залежать від точності синхронізації між LED-джерелами та приймачами. У стандарті IEEE 802.15.7 передбачено синхронізацію кадрів даних, яка допомагає узгоджувати годинники передавачів і приймачів. Проте на практиці складно досягти ідеальної синхронізації, оскільки LED не можуть приймати сигнали одне від одного.

Для усунення потреби в повній синхронізації використовується

модифікований протокол ALOHA – Basic Framed Slotted ALOHA (BFSA). Цей протокол передбачає структуру кадру, що складається з фіксованої кількості часових слотів, кількість яких зазвичай значно перевищує кількість передавачів (рис. 3.2). Кожен передавач випадковим чином обирає один слот у межах кадру для передачі своїх даних.

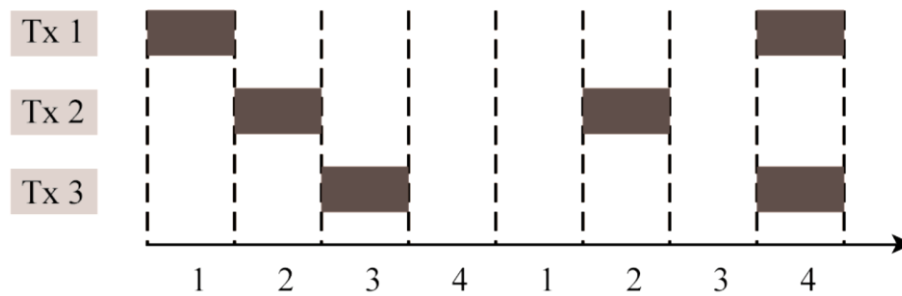


Рисунок 3.2 – протокол ALOHA [8]

Такий підхід зменшує ймовірність колізій сигналів і дозволяє підтримувати ефективну роботу системи навіть без централізованої синхронізації.

3.2 Вибір методу модуляції в протоколах мультиплексування

Модуляція у системах VLC має суттєві відмінності від модуляції у традиційних радіочастотних системах [7]. У радіочастотних каналах інформація може кодуватися за фазою та амплітудою сигналу, проте у випадку видимого світла такі методи непридатні. Це пов'язано з тим, що світловий потік не може змінювати фазу або амплітуду у звичному радіочастотному сенсі, оскільки фотодетектори сприймають лише інтенсивність випромінювання, а не його фазу.

Отже, у VLC модуляція досягається шляхом зміни інтенсивності світла, де рівень яскравості світлодіода відповідає інформаційному вмісту переданого сигналу. Такий принцип отримав назву модуляції за інтенсивністю із подальшою детекцією прямого випромінювання.

Під час розробки схеми модуляції для VLC необхідно враховувати два основні фактори [2, 7]:

1. Уникнення видимого мерехтіння. Одним із головних завдань є запобігання видимому мерехтінню, адже основна функція світлодіодів – це енергоефективне освітлення.

Для уникнення дискомфорту зорового сприйняття частота перемикання сигналу має бути понад 200 Гц, а у високошвидкісних системах може досягати 10 МГц. Такий підхід дозволяє передавати дані без погіршення якості освітлення для користувача.

2. Збереження якості яскравості. Протоколи мультиплексування не повинні негативно впливати на яскравість освітлення, тому вибір методу модуляції має враховувати цю вимогу. Різні види діяльності потребують різного рівня освітленості. Наприклад, для звичайної візуальної активності у громадських приміщеннях необхідно 30...100 люкс. Залежність між вимірним рівнем освітленості M_L та сприйманою яскравістю P_L описується рівнянням [7]:

$$P_L(\%) = 100 \times \sqrt{\frac{M_L(\%)}{100}}. \quad (3.1)$$

Таким чином, дизайн модуляції повинен забезпечувати можливість димування – плавного регулювання яскравості без спотворення переданих даних.

Розглянемо основні використовувані методи модуляції [2]. Одним із найпростіших і найпоширеніших методів є модуляція ввімкнення / вимкнення (On-Off Keying, ООК) [7]. У цьому методі біт «1» передається шляхом вмикання світлодіода, а біт «0» – його вимкненням. На практиці LED не вимикається повністю, а лише зменшує інтенсивність випромінювання, що забезпечує комфортне освітлення. Перевагами ООК є простота реалізації та низька обчислювальна складність, однак обмеженням є низька швидкість передавання даних, особливо у випадку використання білих світлодіодів із жовтим люмінофором, який має повільну часову реакцію. Застосування фільтрації та аналогового вирівнювання дозволило підвищити швидкість передавання до понад 100 Мбіт/с, проте принципово метод залишається малоефективним для високошвидкісних систем.

Для підвищення ефективності було запропоновано імпульсні методи модуляції, у яких інформація кодується параметрами імпульсів, такими як ширина або положення у часі. Модуляція за шириною імпульсу (Pulse Width Modulation, PWM) регулює тривалість імпульсу відповідно до рівня яскравості. Це дозволяє не лише передавати дані, а й реалізовувати функцію димування, тобто регулювання освітленості у межах 0...100%. Недоліком PWM є низька швидкість передачі (до кількох кілобіт за секунду), тому у подальших роботах вона поєднувалася з іншими методами, наприклад, із дискретною багатотональною модуляцією (Discrete Multitone, DMT), що дозволило одночасно керувати освітленням і передавати дані на вищих швидкостях.

Суттєвим кроком уперед у розвитку VLC стала модуляція зі зсувом кольору (Color Shift Keying, CSK), запропонована у стандарті IEEE 802.15.7. Її суть полягає у зміні відносних інтенсивностей трьох кольорових компонентів – червоної, зеленої та синьої – у джерелі світла типу RGB. Комбінація цих інтенсивностей створює біле світло, але одночасно передає інформацію через зміни координат кольору у колірному просторі. При цьому використовується хроматична діаграма (рис. 3.3), де координати x і y відповідають параметрам кольору, сприйманим людським оком (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Центральні, кодові та хроматичні координати, що використовуються сімома смугами, які застосовуються в CSK [7]

Діапазон (нм)	Код	Центр (нм)	Координати (x, y)
380...478	000	429	(0,169; 0,007)
478...540	001	509	(0,011; 0,733)
540...588	010	564	(0,402; 0,597)
588...633	011	611	(0,669; 0,331)
633...679	100	656	(0,729; 0,271)
679...726	101	703	(0,734; 0,265)
726...780	110	753	(0,734; 0,265)

На відміну від систем, що базуються на білих світлодіодах із жовтим

люмінофором, CSK забезпечує значно більшу швидкість передавання даних, оскільки кожен колірний канал може використовуватися як незалежний носій інформації. CSK є перспективним методом, оскільки дозволяє досягти високих швидкостей передавання без погіршення якості освітлення.

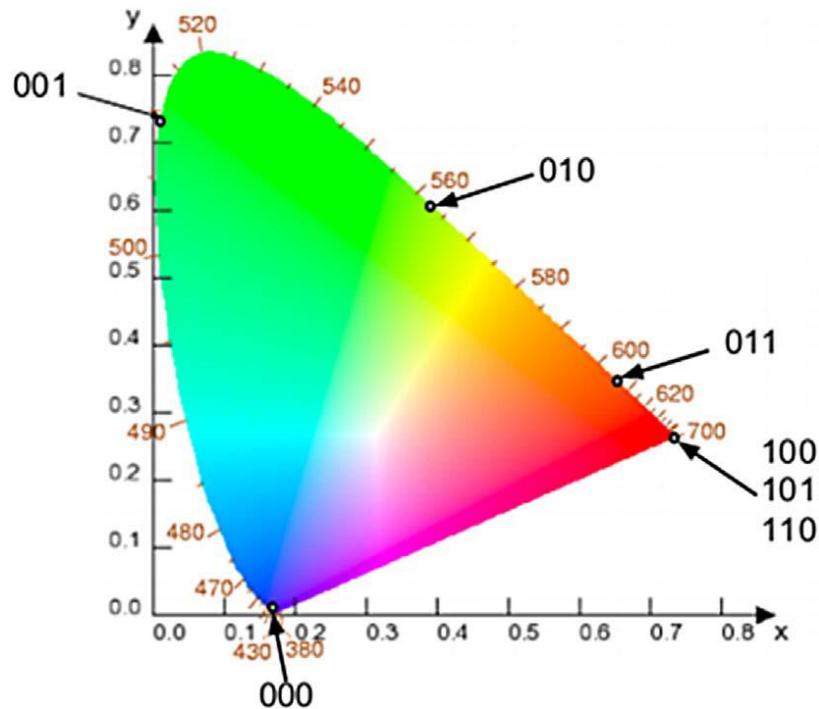


Рисунок 3.3 – Хроматична діаграма CSK [7]

Іншим поширеним методом є модуляція за позицією імпульсу (Pulse Position Modulation, PPM), у якій часова тривалість символу ділиться на рівні інтервали, а передавання здійснюється в одному з них. Такий підхід має високу енергетичну ефективність, але страждає на низьку швидкість передачі, оскільки в кожному символі використовується лише один імпульс. Для подолання цього обмеження було розроблено модифікації: багатоімпульсну PPM (MPPM), яка передбачає кілька імпульсів у межах одного символу, що підвищує спектральну ефективність; виключену PPM (EPPM), створену для систем, обмежених піковою потужністю; та багаторівневу EPPM (MEPPM), яка додатково збільшує щільність передавання інформації. Порівняльний аналіз цих методів показує, що вони забезпечують високу стійкість до мерехтіння та нелінійностей світлодіодів, водночас зберігаючи можливість регулювання яскравості (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Аналіз ефективності видів модуляції за позицією імпульсу [7]

Метод модуляції	Підтримка димування	Спектральна ефективність	Сприйнятливість до мерехтіння	Вплив нелінійності LED
MPPM (Multipulse PPM)	Так	< 1	Низька	Низький
ERPM (Expurgated PPM)	Так	< 1	Низька	Низький
MEPPM (Multilevel ERPM)	Так	2...3	Дуже низька	Низький

Традиційна модуляція за позицією імпульсу (PPM, Pulse Position Modulation) передбачає використання високої напруги для представлення логічної «1». Оскільки інтенсивність світла пов'язана з робочим циклом сигналу, надто розріджена послідовність даних у PPM може призводити до зниження середньої яскравості.

Щоб усунути цей недолік, застосовується інверсна модуляція з лінійним положенням імпульсу (I-LPPM, Inverted Linear Pulse Position Modulation), у якій позиція імпульсу PPM інвертується. Це забезпечує збільшення середньої переданої потужності світлодіода і, відповідно, підвищує якість освітлення.

Крім цього, стандарт IEEE 802.15.7 визначає змінну модуляцію за позицією імпульсу (VPPM, Variable Pulse Position Modulation), що дозволяє уникнути ефекту мерехтіння; реалізувати механізм регулювання яскравості (dimming control). Попри переваги, VPPM наразі застосовується лише в обмеженій кількості систем позиціонування, і потребує подальших наукових досліджень для підвищення ефективності її використання у VLC-технологіях.

3.3 Порівняльний аналіз енергетичної ефективності модуляції у VLC

Енергоефективність у VLC оцінюється через відношення кількості переданих бітів до спожитої енергії, виражене у бітах на джоуль, або через енергію на біт E_b , що визначається за формулою (3.2):

$$E_b = \frac{P_{el}^{сep}}{R_b}, \quad (3.2)$$

де $P_{el}^{сep}$ – середня електрична потужність LED системи;

R_b – швидкість бітів.

Оскільки у VLC сигнал формується зміною інтенсивності світлового потоку, оптична потужність, яка досягає фотоприймача, визначається як функція геометрії простору, властивостей джерел та фотоприймача. Для однорідного набору N LED джерел з ламбертівським розподілом інтенсивності можна записати у вигляді (3.3):

$$P_s = \sum_{i=1}^N \frac{(m+1)A_R P_{T_i}}{2\pi D_i^2} \cos^m(\theta_i) \cos^M(\psi_i) T_s(\psi_i) g(\psi_i), \quad (3.3)$$

де D_i – відстань між i -м світлодіодом та приймачем;

A_R – ефективна площа фотодетектора;

P_{T_i} – оптична потужність джерела;

θ – кут випромінювання;

ψ – кут падіння на приймач;

$T_s(\psi_i)$ – коефіцієнт пропускання оптичного фільтра;

$g(\psi_i)$ – коефіцієнт підсилення концентратора;

m та M – ламбертівські порядки для джерела та приймача відповідно.

Електричний струм на виході фотодетектора визначається:

$$I_s = R \cdot P_r = R(P_s + P_{bg}), \quad (3.4)$$

де R – чутливість фотодіода, А/Вт;

P_s, P_{bg} – оптична потужність, що надходить від джерела (сигнальна складова) та потужність фонового освітлення.

Співвідношення сигнал/шум, SNR, в приймачі визначається через сумарну

дисперсію шуму σ_n^2 визначається наступним чином:

$$SNR = \frac{(R \cdot P_s)^2}{\sigma_n^2}. \quad (3.5)$$

Шумова модель включає стрілочний, термічний та темновий шуми:

$$\sigma_n^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{therm}^2 + \sigma_{dark}^2, \quad (3.6)$$

$$\sigma_{shot}^2 = 2qRP_sB, \quad (3.7)$$

$$\sigma_{therm}^2 = \frac{4kTB}{R_l}, \quad (3.8)$$

$$\sigma_{dark}^2 = 2qRP_{bg}B, \quad (3.9)$$

де q – заряд електрона;

k – стала Больцмана;

T – температура (300 К);

B – смуга частот приймача ($B \approx R_b/2$);

R_l – еквівалентний опір навантаження.

Вимоги по SNR для кожної модуляції визначають, яка оптична (і отже електрична) потужність потрібна для досягнення цільового BER. Різні моди мають різні вимоги: у загальному, багаторівневі / мультисимвольні методи (CSK з багатоточковою констеляцією) потребують вищого SNR ніж просте дворівневе ООК для однакового BER.

Оцінка необхідної електричної потужності здійснюється як:

1. Для ООК методу. Символ «1»: LED випромінює ($P_{on}=P_t$). Символ «0»: ($P_{off}=0$). При випадкових 0/1 з ймовірністю $D=0,5$ середня оптична потужність N LED джерел:

$$\bar{P}_t^{OOK} = NP_tD. \quad (3.10)$$

Електрична потужність (за ефективністю LED η):

$$P_t^{OOK} = \bar{P}_t^{OOK} / \eta. \quad (3.11)$$

2. При використанні PWM інформація кодується шириною імпульсу; при тій самій середній яскравості PWM може застосувати вищий піковий струм, але середня оптична потужність для заданого рівня освітленості однакова. Для енергетичного аналізу при тому ж середньому освітленні: $\bar{P}_{el}^{PWM} \approx \bar{P}_t^{OOK}$, але спектральні властивості та SNR на біт можуть відрізнятися (через ширину імпульсу / частоту PWM і ширину каналу).

3. Для CSK передача символів за зміною відносної інтенсивності каналів різних кольорів (наприклад RGB). Загальна оптична потужність розподіляється по кольорах.

Для даного середнього освітлення сумарна оптична потужність може бути такою ж, як у OOK, але щоб досягти того ж BER, CSK зазвичай вимагає вищого SNR (внаслідок меншого мінімального евклідового відстані констеляції у відтінковому просторі), отже потребує більшої потужності (або кращого приймача).

Розглянемо приклад розрахунку для моделі з чотирьох світлодіодів, розміщених у вигляді квадратної решітки в межах одного приміщення. Розглянуто режим мультиплексування AllSame – усі LED передають однакову інформацію; сигнали сумуються на приймачі, що покращує SNR. Для досягнення цільового рівня бітової похибки ($BER \approx 10^{-6}$) приймемо як необхідне опорне значення $SNR = 10$ для всіх методів модуляції.

Порівняльний аналіз виконано при однаковому середньому рівні освітленості, що дозволяє об'єктивно оцінити енергоефективність кожної схеми без спотворення освітлювальних характеристик. Для базових умов: кімната 4x4 м; LED розташовані у сітці на стелі (висота 3,0 м) у точках (1,1), (1,3), (3,1), (3,3) в метрах; фотоприймач розміщений у центрі кімнати на висоті 0,85 м (робоча поверхня); вертикальна відстань від LED до приймача $z = 3,0 - 0,85 = 2,15$ м.

Параметри LED приймача: пікова оптична потужність одного LED $P_t = 0,5$ Вт (оптична); кут напівсили $\theta_{1/2} = 60^\circ$, (тоді Ламбертівський порядок $m = 1$); площа фотодіода $A_{pd} = 1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$; чутливість фотодіода $R = 0,4 \text{ А/Вт}$; оптичний фільтр і концентратор з параметрами: $T_s = 1$, $g = 1$; LED електрооптична ефективність $\eta = 0,30$ (30%), бітрейт $R_b = 10 \text{ Мбіт/с}$; умовна дисперсія шумового струму $\sigma_n = 10^{-6} \text{ А}$; усі 4 LED передають однаково (симетрично).

Результати узагальнено у вигляді показників в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Енергетика випромінювання для трьох видів модуляції

Модуляція	Середня опт. потужн., Вт	Середня ел. потужн., Вт	Енергія на біт, Дж/біт	Ефективність, біт/Дж
OOK	1,0	3,333	$3,33 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^6$
PWM	$\approx 1,0$	$\approx 3,333$	$\approx 3,33 \cdot 10^{-7}$	$\approx 3,0 \cdot 10^6$
CSK	2,0	6,667	$6,67 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^6$

За однакового середнього освітлення OOK і PWM дають схожу енергоефективність, бо середня оптична потужність однакова. PWM може мати інші переваги / недоліки (легкість димування, простота апаратної реалізації).

CSK у загальному випадку буде менш енергоефективним (менше біт/Дж) якщо для досягнення того ж BER вимагає вищого SNR (а отже і більшої оптичної потужності). Однак CSK дає додаткові переваги (мультиканальна передача, кольорові констеляції, сумісність з RGB-освітленням), тому вибір – компроміс між енергією і спектральною / просторовою ефективністю.

Встановлено ключові фактори, що впливають на показники ефективності в практичних застосуваннях числа: ефективність LED η , чутливість фотоприймача R , площа фотодіода A_{pd} , рівень шуму, бітрейт, спосіб мультиплексування (якщо LED несуть різні дані), затінення та рефлексії (множинні відбиття від поверхонь кімнати підвищують P_r і поліпшують енергоефективність). Було отримано залежності середньої електричної потужності системи від ключових параметрів для трьох видів модуляції для забезпечення цільового SNR (рис. 3.4).

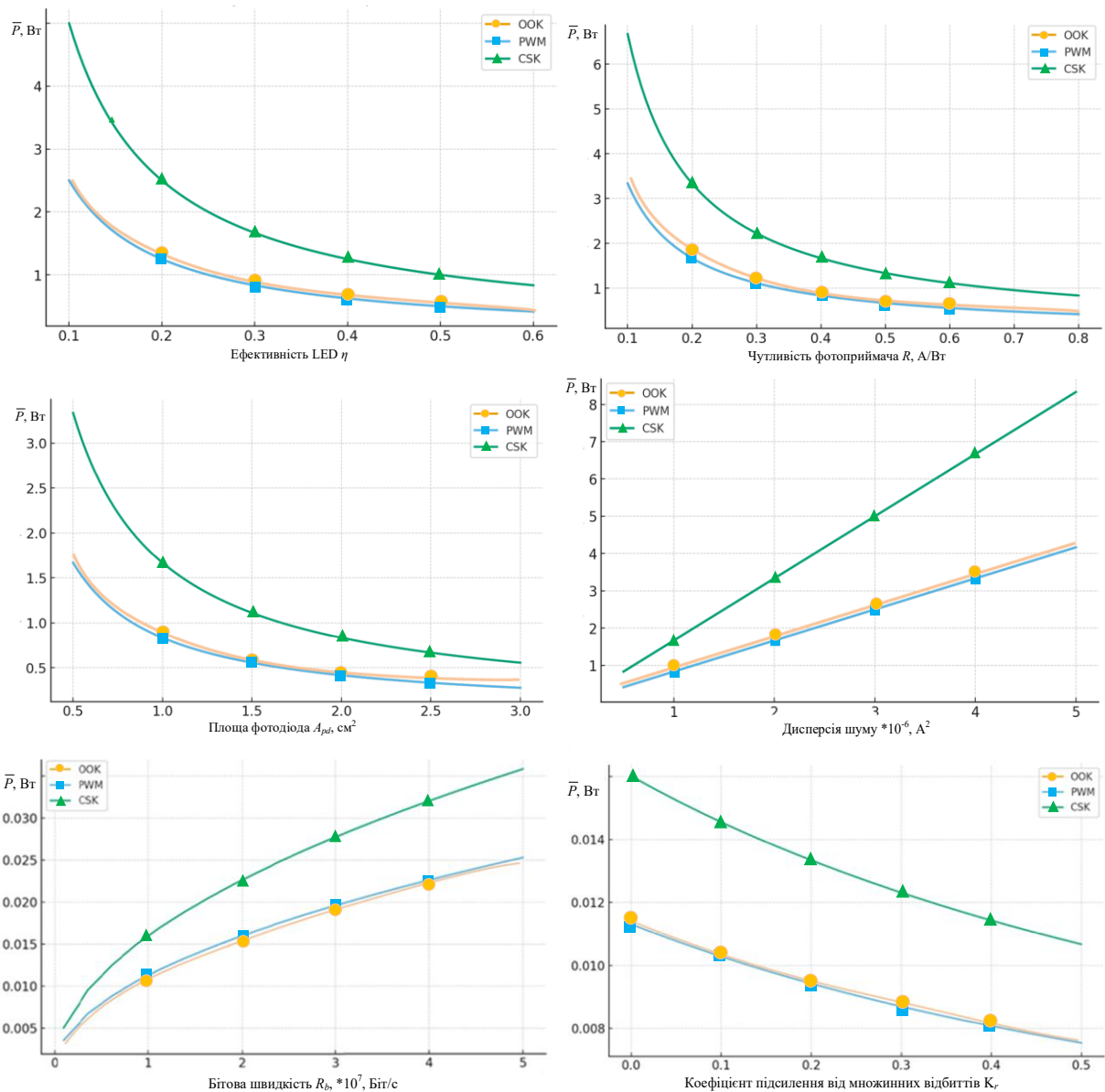


Рисунок 3.4 – Залежність середньої електричної потужності системи від ключових параметрів VLC-системи

Аналіз показує, що:

- CSK потребує значно більшої потужності для досягнення заданого BER, що пояснюється вищими вимогами до SNR через використання багаторівневої констеляції кольорів;
- OOK і PWM демонструють близькі показники, оскільки їхні SNR-вимоги ідентичні, а відмінність полягає лише у часовому співвідношенні імпульсів;
- підвищення ефективності світлодіодів η або чутливості фотоприймача R прямо зменшує необхідну електричну потужність;
- збільшення площі фотодіода A_{pd} покращує збір оптичної потужності,

проте надмірне зростання може збільшити шум і є обмеженим технологічно;

- зростання швидкості передавання R_b або ширини смуги B веде до зростання шумів і, відповідно, до потреби у вищій потужності;

- вплив затінення та відбиттів має критичний характер – зменшення K_0 через часткове перекриття променів може підвищити необхідну потужність на порядок.

В загальному аналіз підтверджує наступні положення:

- модуляція у VLC базується на зміні інтенсивності світла, а не фази чи амплітуди, як у радіочастотних системах;

- основними вимогами до модуляції є регулювання яскравості (dimming) та усунення мерехтіння (flickering);

- найпоширенішою схемою є ООК, що забезпечує простоту реалізації, але має обмеження за швидкістю через фізичні властивості світлодіодів. Крім того, ООК є менш завадостійкою у присутності фонових джерел освітлення, оскільки не забезпечує достатнього динамічного діапазону;

- з енергетичної точки зору, PWM може бути ефективнішою за ООК, оскільки дозволяє зменшити енергоспоживання через контроль середнього рівня випромінювання, не втрачаючи інформаційної цілісності сигналу. Проте обмеження швидкодії світлодіодів і спотворення, спричинені нелінійністю їхньої характеристики, знижують ефективність PWM при високих швидкостях передачі;

- енергетична ефективність CSK значною мірою залежить від спектральної чутливості фотоприймача, а також від обраної точки білого балансу. Завдяки використанню багаторівневої структури сигналу CSK може забезпечити вищу пропускну здатність при менших енергетичних витратах у порівнянні з ООК, однак вимагає складніших схем керування та калібрування джерел випромінювання;

- у цілому, результати розрахунків підтверджують, що для енергоефективних VLC-систем доцільно використовувати прості двійкові методи модуляції (ООК або PWM) у поєднанні з високоефективними світлодіодами та оптимізованими фотоприймачами.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ НА ОСНОВІ ІСНУЮЧОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ОСВІТЛЕННЯ ПРИМІЩЕНЬ

4.1 Архітектура базової VLC для задач внутрішнього позиціонування

Сучасний розвиток інтелектуальних будівель та технологій Інтернету речей (IoT) зумовлює потребу у високоточних системах внутрішнього позиціонування, які здатні працювати там, де традиційні радіочастотні рішення, такі як GPS чи Wi-Fi, втрачають ефективність. Проектування систем видимого світлового зв'язку, що використовують вже існуючу інфраструктуру світлодіодного освітлення, що дає можливість одночасно виконувати функції освітлення та передачі інформації, робить такі системи енергоефективним і економічно доцільним засобом внутрішнього позиціонування.

Перевагою цього підходу є можливість інтеграції у вже встановлену освітлювальну інфраструктуру без необхідності додаткових радіочастотних каналів. Це мінімізує рівень електромагнітних перешкод та забезпечує відповідність санітарним нормам щодо впливу випромінювання на людину [9]. Таким чином, VLC-технологія є ключовим елементом у створенні адаптивних та безпечних систем навігації всередині будівель і може бути ефективно застосована у торгових центрах, музеях, лікарнях, логістичних складах та інших інтелектуальних просторах.

Архітектура базової системи видимого світлового зв'язку (VLC) для задач внутрішнього позиціонування, у якій використовується існуюча інфраструктура LED-освітлення, зображена на рисунку 4.1 [5]. Основою підходу є присвоєння унікального ідентифікаційного коду кожному кластеру світлодіодів. Розумні мобільні пристрої, зокрема смартфони з CMOS-камерою, використовуються для зчитування та декодування цих кодів [3]. Після розпізнавання ID-сигналу система звертається до бази даних, визначає місцеположення користувача у просторі і надає йому навігаційні вказівки до цільового місця призначення.

У межах дослідження приймається припущення, що у приміщенні одночасно працюють два або більше джерел світла, причому оптимальним є

використання щонайменше чотирьох випромінювачів. Важливо, що ці джерела є видимими та чітко розрізняваними при їх захопленні камерою смартфона [6].

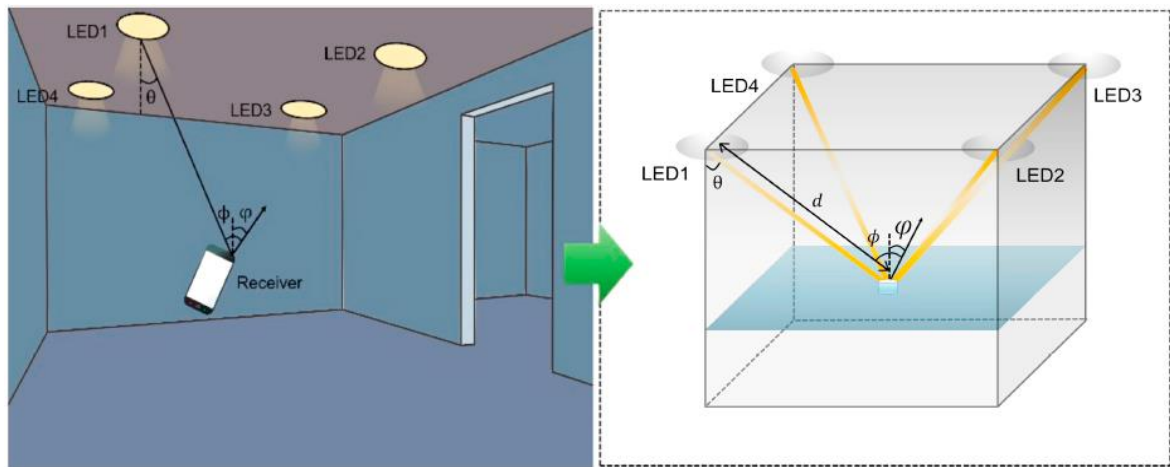


Рисунок 4.1 – Модель системи внутрішнього позиціонування [5]

Коли смартфон переміщується крізь область покриття випромінювача, сигнал передавача проєктується на камеру. Незважаючи на те, що частота передавання значно перевищує кадрову частоту камери, декодування стає можливим завдяки ефекту «покадрового зчитування». CMOS-сенсори, що застосовуються у таких камерах, не експонують зображення одночасно по всьому кадру, а по чергово зчитують по одній або кількох вертикальних колонках. Тобто коли світлодіод увімкнений, камера фіксує яскраві пікселі, а коли вимкнений – темні смуги (рис. 4.2).

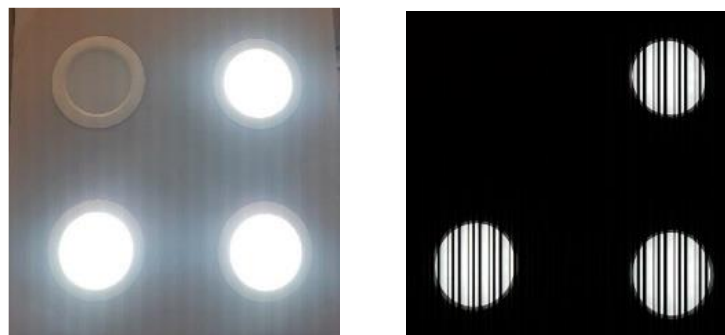


Рисунок 4.2 – Джерела світла та зображення, що отримує сенсор

У результаті при впливі джерела світла із модуляцією на зображенні формуються чергування яскравих та темних смуг. Геометричні параметри цих

смуг залежать від часу зчитування сенсором та від частоти передавання сигналу світлодіодом. Для аналізу отриманого сигналу застосовується алгоритмічно організований потік оброблення зображень, у якому детектується передавач та виділяється область інтересу (RoI) для кожної лампи. Інформація, отримана від усіх джерел світла, агрегується у єдиний результат, що відповідає визначеному місцеположенню користувача у приміщенні. Для цього після того як програма розпізнала код лампи, смартфон шукає його у базі даних, де збережено координати кожної лампи. Тож смартфон визначає позицію у приміщенні та може навіть побудувати маршрут до необхідного місця.

Таким чином, LED-інфраструктура перетворюється на просторово-орієнтовану систему передачі даних, яка виконує функції позиціонування без необхідності у використанні радіочастотних засобів, що суттєво знижує рівень електромагнітних перешкод та підвищує енергоефективність системи.

Наведена система може застосовуватися у широкому спектрі задач внутрішнього позиціонування. Використовуючи звичайні світлодіодні світильники як маяки та камеру смартфона як приймач, вона забезпечує точне визначення місцеположення й орієнтації користувача без додаткової інфраструктури. Такий підхід підходить для навігації в торгових центрах, аеропортах, музеях, лікарнях, великих офісах, складів і робототехнічних систем. Система також може підтримувати навігацію для людей з обмеженим зором, забезпечувати контекстну інформацію про об'єкти в приміщенні та інтегруватися в системи безпеки чи моніторингу об'єктів.

4.2 Вимоги та специфікації обладнання системи позиціонування

4.2.1 Передавальний комплекс VLC-системи

Для реалізації системи видимого світлового зв'язку пропонується передавальний комплекс на основі комерційного обладнання LED-освітлення. До складу передавача входять стельові світлодіодні світильники, LED-панелі та мікроконтролер (рис. 4.3), який виконує функції керування передаванням інформації. Кожен світлодіодний модуль у системі виконує роль передавача, а

його випромінювання модулюється відповідно до обраного способу кодування даних.

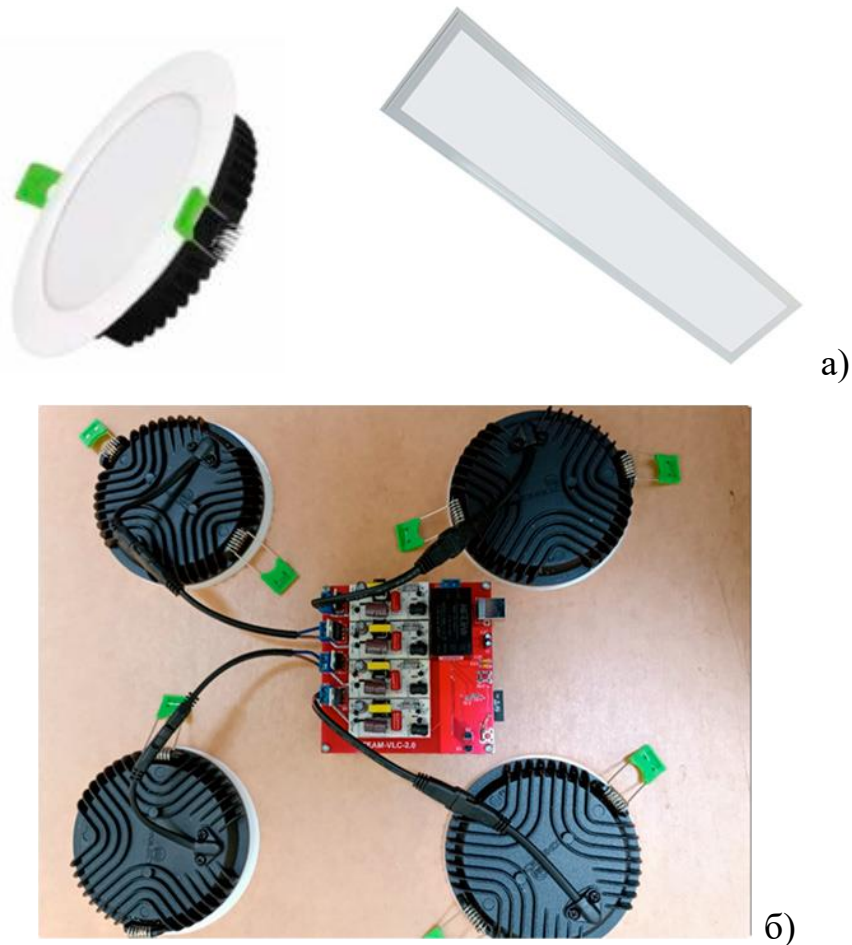


Рисунок 4.3 – а) LED панелі, б) драйвер-передавач для LED ламп

У дослідженнях VLC найпоширенішим методом модуляції є ООК, що характеризується простотою реалізації та можливістю безпосереднього перетворення інформаційних бітів у стани вмикання та вимикання світла. У цьому випадку логічна «1» відповідає активному стану LED, тоді як логічний «0» його згасанню. Модульоване випромінювання фіксується камерою смартфона у вигляді чергування світлих та темних смуг, з яких надалі методом оброблення зображення виконується демодуляція сигналу.

Проте базова ООК-модуляція має суттєві обмеження: за тривалої послідовності бітів «0» і «1» виникає небажаний ефект мерехтіння, що негативно позначається на зоровому комфорті та знижує швидкість передавання даних. Зменшити цей вплив можна шляхом підвищення частоти перемикавання, однак

цього недостатньо при передачі довгих ID-кодів. Ефективним рішенням є застосування манчестерського кодування, у якому кожен інформаційний біт перетворюється на пару символів: «0» кодується як «01», а «1» як «10». Такий підхід забезпечує відсутність надмірно довгих повторів однакових символів і стабільну світлову динаміку, що суттєво знижує ризик мерехтіння.

Крім того, манчестерське кодування забезпечує рівномірний розподіл логічних «0» та «1» незалежно від властивостей інформаційної послідовності, навіть якщо дані попередньо зашифровані. Порівняння ООК-модуляції та її поєднання з манчестерським кодуванням наведено на рисунку 4.4. У випадку чистого ООК довга послідовність нульових бітів створює помітне мерехтіння, тоді як манчестерське представлення дозволяє цього уникнути і водночас зберігає сумісність із базовим апаратним забезпеченням LED-світильників.

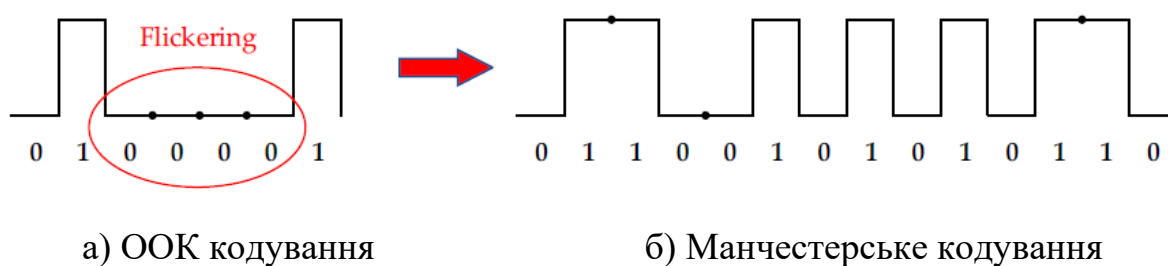


Рисунок 4.4 – Застосування Манчестерського коду для уникнення мерехтіння [8]

У системі ООК-модуляції світлодіодний випромінювач вмикається та вимикається відповідно до послідовності бітів, що містяться в пакеті даних. Формування сигналу базується на властивостях механізму покадрового зчитування, який характерний для CMOS-сенсорів камер смартфонів [3]. Кількість бітів та логічна структура пакета визначаються обраним способом декодування, однак принцип передачі залишається незмінним: кожен пакет повторюється кілька разів, що дозволяє компенсувати можливі втрати даних під час зчитування.

Тривалість пакета обмежується таким чином, щоб щонайменше один його повний період був зафіксований камерою на зображенні одного світлодіода. Це є критичною вимогою, оскільки у разі потрапляння неповного пакета процес

декодування стане неможливим. Тому структура пакета сформована з префіксу та корисного навантаження (рис. 4.5). Перші шість бітів є фіксованими та виконують функцію преамбули, тоді як наступні n бітів містять інформаційне повідомлення, закодоване за допомогою манчестерського кодування.

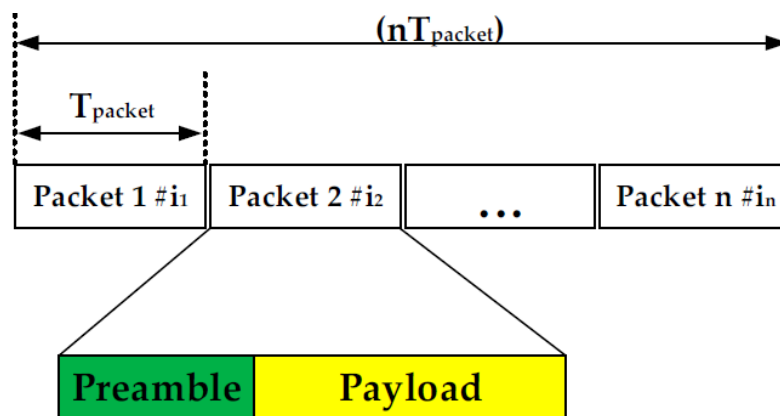


Рисунок 4.5 – Структура пакету даних

Використання постійної шестибітної преамбули має дві ключові функції: по-перше, вона допомагає визначити робочу частоту передавання, по-друге дозволяє оцінити відстань між випромінювачем та камерою.

Під час використання VLC-системи зі смартфоном як приймачем зміна відстані між LED-джерелом та CMOS-камерою впливає на геометричний розмір світлодіода на зображенні, що може позначитися на якості зчитування сигналу (рис. 4.6). Преамбула дає змогу системі адаптуватися до цих змін, виконуючи калібрування та забезпечуючи стійкість модуляції в умовах різних просторових конфігурацій.



Рисунок 4.6 – Зображення LED для різних дистанцій: а) 50 см, б) 200 см

Таким чином, стандартизована структура пакета не лише забезпечує коректне декодування ID-коду, але й виконує роль механізму самокалібрування VLC-системи, що є критично важливим для точного внутрішнього позиціонування у динамічному середовищі.

Додатковим критерієм коректної роботи VLC-системи є вибір частоти миготіння світлодіода [2]. З огляду на вимоги безпеки зору, згідно зі стандартом IEEE 802.15.7, частота перемикання LED не повинна бути нижчою за 200 Гц. Однак експериментальні дослідження показують, що для гарантованого формування принаймні одного повного пакета даних на зображенні LED при відстані 50 см мінімальна частота модуляції повинна становити не менше 800 Гц. У такому режимі випромінювання не створює візуально помітного мерехтіння, забезпечуючи водночас достатню щільність інформаційного потоку для декодування. Саме тому критично важливо, щоб кількість послідовних бітів «0» у передаваному повідомленні не перевищувала трьох, оскільки надмірне згасання світла може спричинити втрату інформації або порушення стабільності модуляції.

Використання фіксованого шестибітного преамбульного поля узгоджується зі стандартом IEEE 802.15.7, який регламентує структуру PHY-рівнів I, II та III. Повне демодуляційне розпізнавання пакета можливе лише за умови збереження допустимої відстані між LED та камерою, оскільки максимальна межа визначається моментом, коли один кадр камери містить достатню кількість пакетів для одночасного аналізу. У процесі оброблення камера безперервно захоплює освітлювач, а алгоритм обробки виконує пошук шестибітної преамбули, після чого розпочинається демодуляція корисного навантаження.

Схема формування інформаційного пакета наведена на рисунку 4.7. Спочатку генерується ID-код із 2 або 4 бітів, після чого застосовується манчестерське кодування, що подвоює тривалість послідовності – відповідно до 4 або 8 бітів. Перед передаванням до цієї послідовності додається преамбула з 6 бітів, що формує повний пакет на 10 або 14 бітів. На цьому етапі модуль ESP32 відіграє роль драйвера освітлювальної системи, генеруючи сигнал із точною частотною та часовою структурою, необхідною для розпізнавання камерами зі CMOS-сенсорами.

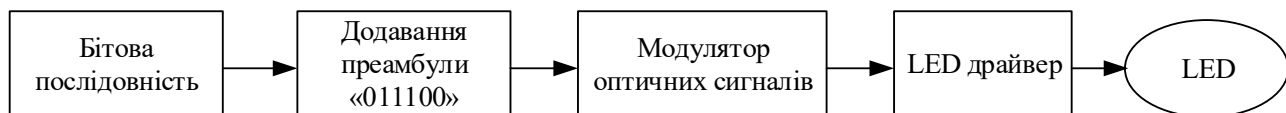


Рисунок 4.7 – Процес модуляції сигналу передавача

Механізм роботи CMOS-матриці визначає специфіку формування та декодування світлового сигналу в системах VLC [3]. Під час зчитування зображення камера проходить через два ключові етапи: експонування кадру та послідовне зчитування даних рядок за рядком. Такий принцип покадрового зчитування створює умови, за яких модуляція світлодіода під час експозиції призводить до появи характерних темних і світлих смуг на зображенні (рис. 4.8). Яскравість цих смуг відповідає логічним станам переданих бітів: темні смуги відповідають логічному нулю, а світлі – логічній одиниці.

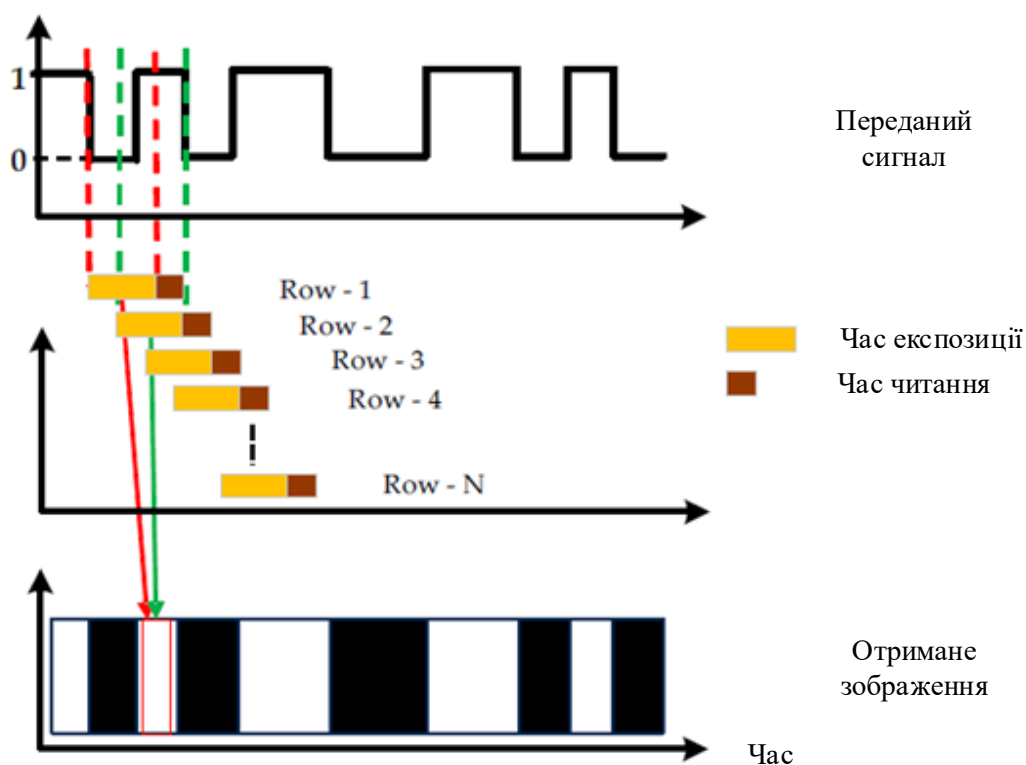


Рисунок 4.8 – Принцип покадрового зчитування CMOS-сенсора [3]

У разі використання ООК-модуляції ширина світлих і темних смуг є однаковою, тоді як для манчестерського кодування можливі ділянки, де два послідовні біти мають однакове значення. У такому випадку ширина смуги

подвоюється. Наприклад, якщо стандартна ширина смуги становить 10 пікселів, то для манчестерського коду «011001» ширина смуг у CMOS-зображенні становитиме 10, 20, 20 та 10 пікселів відповідно до зміни бітів у послідовності. Така закономірність є ключовою для демодуляції сигналу методами оброблення зображення, оскільки дозволяє точно визначити границі бітів навіть за змінної відстані до LED.

Тривалість зчитування одного рядка пікселів залежить від швидкості аналого-цифрового перетворювача (ADC) та кількості сенсорних елементів у матриці. Протягом зчитування аналоговий сигнал кожного рядка перетворюється на цифровий, після чого дані передаються на процесор для подальшого аналізу. Висока швидкість ADC та оптимальний вибір частоти модуляції LED дозволяють синхронізувати процес передавання світлових імпульсів із процесом розгортки CMOS-сенсора, забезпечуючи надійне декодування даних навіть при динамічному переміщенні приймача [3].

Таким чином, механізм покадрового зчитування, який зазвичай вважається обмеженням для відеозйомки, у VLC-технології перетворюється на перевагу, що дозволяє використовувати камеру як високоточний оптичний приймач сигналів позиціонування.

4.2.2 Приймальний комплекс VLC-системи

Активне використання смартфонів дозволяє використовувати вбудовану камеру смартфона як оптичний сенсор для приймання світлових сигналів. Для цього існує ряд програмних приймачів у вигляді мобільних додатків, зокрема на платформі Android Studio. Усі ключові налаштування камери виконуються програмно, без втручання в апаратне забезпечення, що дозволяє адаптувати систему до широкого спектра мобільних пристроїв.

Після запуску додаток автоматично вимикає режим автоматичного балансування білого. Це рішення дозволяє максимально зменшити час експозиції, що є необхідним для чіткого розмежування світлодіодної області та фону. Зменшення експозиції знижує рівень шуму та значно покращує контрастність яскравих і темних смуг, що є критичним для правильної інтерпретації бітів у процесі декодування. Режим автоматичного фокусування забезпечує коректне

фокусування на кожному кадрі, що запобігає розмиттю контурів світлодіода та підвищує точність аналізу ширини смуг, пов'язаних із логічними «0» та «1».

Таким чином, смартфон у VLC-системі виконує функцію адаптивного оптичного приймача, здатного працювати в режимі реального часу й забезпечувати стабільне декодування навіть за умов змінної відстані або переміщення користувача. Реалізація програмного налаштування камери дозволяє масштабувати систему без потреби додаткових апаратних модифікацій, що суттєво розширює можливості її впровадження в інтелектуальних будівлях.

4.3 Дослідження впливу параметрів камери на роботу VLC-системи

Параметри налаштування приймача є критичними для якості розпізнавання зображень і залежать від умов використання – статичний режим з нерухомим користувачем і режим руху користувача. Розглянемо 4 основні параметри налаштування камери для цих випадків [9].

1. Частота кадрів. Частота кадрів камери є одним із ключових параметрів, що визначають швидкість передавання даних у системі VLC. Вона прямо впливає на доступний бітрейт, який можна описати співвідношенням (4.1) [8]:

$$R_{bps} = R_{fps} \times N_{bpf}, \quad (4.1)$$

де R_{bps} – швидкість передавання даних (біт/с);

R_{fps} – частота кадрів камери;

N_{bpf} – кількість бітів, які можна закодувати в одному кадрі.

Збільшення частоти кадрів безпосередньо підвищує пропускну здатність VLC-повідомлення, що особливо важливо у системах навігації в реальному часі.

Дослідження залежності між частотою кадрів камери та максимальною бітовою швидкістю VLC-системи показано на рисунку 4.9.

Зі зростанням частоти кадрів камера здатна фіксувати більше унікальних світлових станів за секунду, тому пропускну здатність каналу помітно

збільшується. Водночас на графіку видно, що збільшення кількості бітів на кадр підсилює цей ефект, розширюючи можливості системи без зміни апаратних параметрів камери. Графік ілюструє, що високі значення частоти камери R_{fps} значно покращують продуктивність VLC-каналу, дозволяючи будувати більш ефективні та швидкодіючі системи внутрішнього позиціонування.

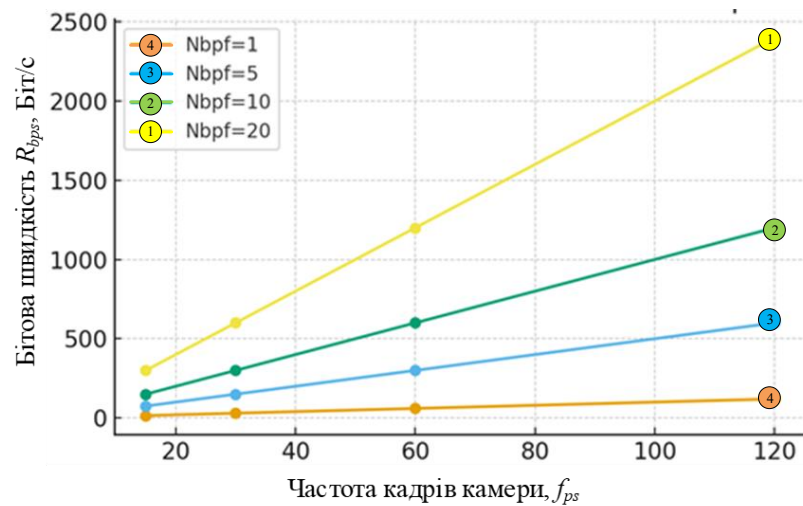


Рисунок 4.9 – Залежність швидкості передавання даних від частоти кадрів камери

2. Витримка. У смартфонах застосовується електронна витримка, що керує часом увімкнення сенсора. Витримка безпосередньо впливає на співвідношення сигнал/шум (SNR) окремих пікселів (рис. 4.10).

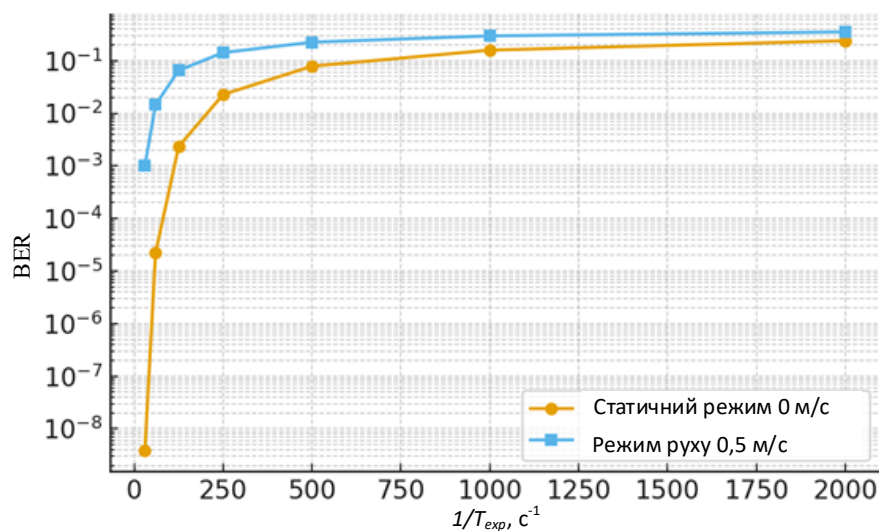


Рисунок 4.10 – Залежність значення BER від витримки увімкнення сенсора

Чим довший час експозиції, тим більше світла накопичує сенсор,

підвищуючи яскравість зображення та рівень SNR. Проте для рухомих об'єктів надмірна витримка призводить до розмиття. У VLC-системах з високочастотним мерехтінням світлодіодів важливо чітко фіксувати світлі й темні смуги. Тому час експозиції навмисно зменшують, щоб «заморозити» рух і забезпечити правильне декодування сигналу тоді як для статичних умов припустимі довші експозиції завдяки покращенню SNR.

3. Швидкість покадрового зчитування. У камерах смартфонів застосовується покадрове зчитування сенсора і цей параметр є критичним для VLC. Він визначає, скільки пікселів відповідає мінімальній ширині світлої/темної смуги, тобто «товщині біта». Оскільки виробники не надають цієї величини, її можна оцінити за формулою (4.2):

$$N_{pixel/bit} = T_{clock}/T_{roll}, \quad (4.2)$$

де T_{clock} – період передавання біта;

T_{roll} – час зчитування сенсора.

Відповідно до критерію Найквіста для коректного передавання високошвидкісних сигналів $T_{clock} \geq 2T_{roll}$. Цей параметр визначає максимальну швидкість VLC.

Дослідження залежності між часом зчитування сенсора смартфона та товщиною біта у вигляді кількості пікселів, які формують світлу або темну смугу показане на графіку рисунка 4.11. Із зменшенням часу зчитування сенсор проходить через кожний рядок швидше, тому один біт займає більшу кількість пікселів, що робить його ширшим і легшим для надійного декодування. При збільшенні T_{roll} кількість пікселів на біт різко зменшується, стискаючи структуру сигналу та ускладнюючи розпізнавання смуг, особливо в умовах шуму або руху смартфона.

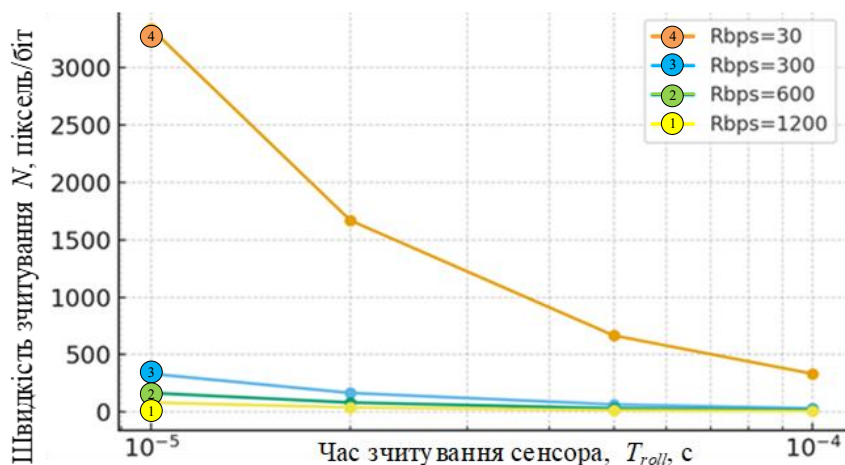


Рисунок 4.11 – Залежність між часом зчитування сенсора та товщиною біта

4. Фокусна відстань. Фокусна відстань – це відстань між точкою фокусування об’єктива та сенсором камери. Вона визначає масштаб відображення джерела світла на знімку. Зв’язок між геометричними параметрами описується співвідношенням та зображено на рисунку 4.12 [8]:

$$\frac{h_{LED}}{H_{LED}} = \frac{f}{d}, \quad (4.3)$$

де f – фокусна відстань камери;

d – відстань до світлодіода-передавача;

H_{LED} – реальний розмір LED-джерела;

h_{LED} – його розмір на зображенні.

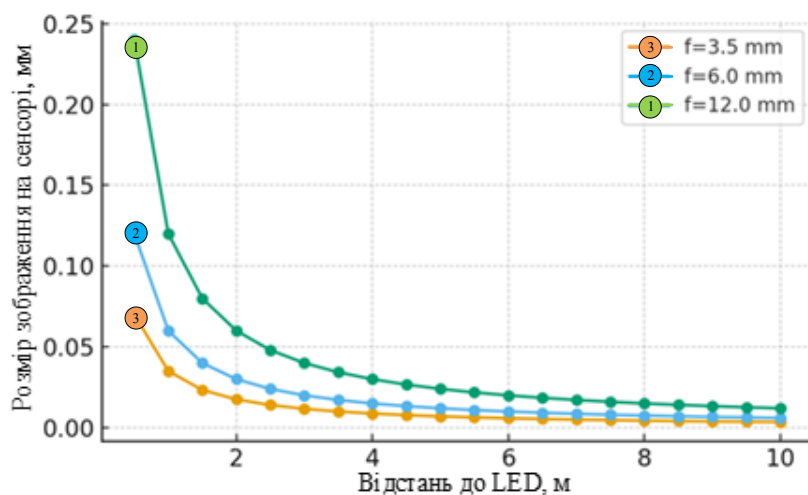


Рисунок 4.12 – Розмір зображення LED при зміні фокальної відстані

Цей параметр важливий для задач позиціонування, оскільки впливає на точність оцінки відстані та розташування світильників у кадрі.

У сукупності вибір параметрів камери суттєво визначає ефективність системи VLC, її пропускну здатність, стійкість до рухів та точність декодування сигналів у задачах внутрішнього позиціонування.

4.4 Оцінка якості системи локалізації об'єктів

Оцінювання якості внутрішнього позиціонування зі смартфоном як приймачем ґрунтується на аналізі світло-темних смуг, які формуються ролінг-затвором у момент зчитування миготіння LED. Для оцінювання якості прийому достатньо використовувати три ключові показники: бітову швидкість R_b , співвідношення сигнал/шум SNR та кількість бітових помилок BER у VLC-системах.

1. Показник SNR визначає здатність камери надійно виділити корисну інформацію на тлі шумів матриці, освітлення та руху. SNR визначають за співвідношенням між середньою інтенсивністю яскравих смуг та рівнем шуму сенсора, який оцінюють через дисперсію значень пікселів у темних і світлих областях. Середня інтенсивність світлих I_{br} та темних смуг I_{dk} розраховується за формулами (4.4) [2]:

$$I_{br} = \frac{1}{N_b} \sum p_i, \quad I_{dk} = \frac{1}{N_d} \sum p_i \quad (4.4)$$

де p_i – значення яскравості окремого пікселя;

N_b, N_d – кількість пікселів у світлих і темних зонах.

Відповідно, дисперсія пікселів у світлих σ_{br}^2 і темних областях σ_{dk}^2 :

$$\sigma_{br}^2 = \frac{1}{N_b-1} \sum (p_i - I_{br})^2, \quad \sigma_{dk}^2 = \frac{1}{N_d-1} \sum (p_i - I_{dk})^2. \quad (4.5)$$

Загальний шум розраховується як:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sigma_{br}^2 + \sigma_{dk}^2}{2}}. \quad (4.6)$$

Тоді значення співвідношення сигнал/шум:

$$SNR = \frac{I_{br} - I_{dk}}{\sigma}, \quad SNR_{дБ} = 20 \log_{10}\left(\frac{I_{br} - I_{dk}}{\sigma}\right). \quad (4.7)$$

Чим більшою є SNR, тим надійніше камера ідентифікує межі смуг, а отже тим кращим є декодування. Для кожної смуги розраховують локальний SNR, після чого усереднюють його для всього кадру або вибраної ROI-області. Це дозволяє порівнювати якість прийому в різних умовах освітлення, відстані чи зміні параметрів камери.

3. BER безпосередньо відображає ефективність декодування. Оцінка рівня бітових помилок BER виконується шляхом порівняння розпізнаної послідовності бітів із еталонною, яка передається світлодіодним маяком у вигляді фіксованого ідентифікатора або короткого пакета. Зчитаний кадр спочатку проходить бінаризацію, сегментацію смуг та визначення меж кожного біта за товщиною в пікселях. Після реконструкції послідовності здійснюється побітове порівняння з відомим кодом. BER визначають як відношення кількості помилково декодованих бітів до загальної довжини пакета [2]:

$$BER = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbb{I}(b_i \neq \hat{b}_i), \quad (4.8)$$

де b_i , \hat{b}_i – еталонний та закодований біт;

N – кількість переданих бітів;

$\mathbb{I}(\ast)$ – індикатор, що дорівнює 1, якщо біт відрізняється, і 0 якщо ні.

3. Бітова швидкість визначає пропускну здатність каналу і прямо залежить від частота кадрів камери та кількості бітів, що кодуються в одному кадрі. Якщо смуга має товщину n_{pix} пікселів, а швидкість зчитування рядка камери T_r , тоді ефективна тривалість одного біта:

$$T_{bit} = n_{pix} \cdot T_r. \quad (4.9)$$

Тоді бітова швидкість:

$$R_b = \frac{1}{T_{bit}} = \frac{1}{n_{pix} T_r}. \quad (4.10)$$

Такий підхід дозволяє точно оцінити вплив експозиції, FPS, швидкості ролінг-затвора та умов руху смартфона на якість прийому. Якщо система працює в реальному часі, BER визначають як ковзне середнє за кількома послідовними кадрами, що згладжує вплив випадкових шумових сплесків.

Важливо, що SNR і BER взаємопов'язані: низький SNR призводить до розмиття меж або втрати контрасту смуг, що автоматично підвищує BER. Тому оцінювання обох параметрів є необхідним для вибору оптимальних режимів камери, таких як коротка витримка для рухомих сценаріїв чи більший f_{PS} для збільшення бітової швидкості і для забезпечення стабільного позиціонування у приміщенні з використанням VLC.

На основі аналізу вибраних параметрів приймача обчислено характерні конфігурації параметрів камери смартфона. У таблиці 4.1 визначено основні параметри приймача (частота кадрів камери f_{PS} , кількість бітів, закодованих у кожному кадрі N_{bpf} , бітова швидкість передавання даних R_b , час витримки (експозиції) камери T_{exp} , час зсуву рядка (ролінг-затвор) T_{roll} , кількість задіяних пікселів у приймальній зоні (розмір світлової смуги) n_{pix} , розраховані значення SNR та наближене значення BER за прийнятою моделлю модуляції, оцінено за яких параметрів система VLC демонструє прийнятний рівень точності декодування, тобто BER нижче 10^{-3} .

Аналіз показує закономірності системи: максимально низькі значення BER досягаються при великій різниці яскравостей між світлими й темними смугами та при малому внутрішньому шумі матриці, що формує високе значення SNR.

У статичних сценаріях (наприклад, сценарії 1, 6, 12) поєднання високої контрастності, великої кількості пікселів на біт і помірної або високої частоти кадрів дає дуже високий SNR і практично нульовий BER, отже прийом є надійним.

Таблиця 4.1 – Оцінка конфігурацій параметрів камери приймача

№	f_{PS}	N_{bpf}	R_b , біт/с	T_{exp} , мс	T_{roll} , мкс	n_{pix}	SNR дБ	BER	Оцінка
1	60	2	120	1,0	10	200	29,54	$3,7e^{-05}$	Yes
2	60	2	120	0,8	10	100	20,00	$6,4e^{-03}$	No
3	30	1	30	2,0	20	50	12,04	$7,9e^{-02}$	No
4	60	2	120	10,0	10	50	13,15	$1,15e^{-02}$	No
5	120	1	120	0,5	5	150	23,50	$1,6e^{-04}$	Yes
6	120	2	240	0,6	5	300	24,08	$1,2e^{-04}$	Yes
7	30	1	30	20,0	40	40	3,46	$1,03e^{-01}$	No
8	90	1	90	0,3	8	120	14,90	$2,4e^{-02}$	No
9	90	2	180	0,2	8	120	18,66	$1,95e^{-03}$	No
10	60	2	120	1,5	10	180	12,04	$7,9e^{-02}$	No
11	240	1	240	0,2	3	250	21,34	$3,9e^{-04}$	Yes
12	24	1	24	5,0	50	400	33,98	$\sim 0,0e^{+00}$	Yes

Навпаки, випадки з поєднанням низької контрастності та великого шуму (сценарії 2, 3, 10) демонструють істотне зростання BER, навіть якщо f_{PS} або N_{bpf} забезпечують потрібний бітрейт. Це підкреслює, що бітрейт сам по собі не гарантує покращення прийому без забезпечення адекватного SNR. Рух приймача вносить додаткове погіршення: навіть у відносно сприятливих початкових умовах (сценарій 4) помітне зростання BER відбувається через ефект розмиття, що зменшує ефективний SNR. Водночас у сценаріях з високою частотою кадрів і малою витримкою (5, 11) вплив руху мінімізується, тому прийом залишається стабільним і BER тримається нижче 10^{-3} .

З проведеного аналізу випливають можна зробити висновки для практичного застосування в проектуванні VLC-систем. По-перше, при налаштуванні системи потрібно орієнтуватися не лише на підвищення частоти кадрів камери або кількості бітів, але й на забезпечення високої контрастності та низького рівня шуму матриці: збільшення яскравості передавача, оптимізація оптики для збільшення числа пікселів на LED-образ і використання алгоритмів

шумоподавлення часто дають більший ефект, ніж просте підвищення f_{PS} . По-друге, у сценаріях руху оптимальним рішенням є зменшення витримки та застосування високої частоти кадрів, що дозволяє «заморозити» смуги ролінг-затвором і зберегти високу просторову дискретизацію біта; це підтверджують конфігурації 5 і 11, де навіть за руху SNR лишається достатнім для $BER < 10^{-3}$. По-третє, існують межі, які не варто перебільшувати: занадто коротка витримка у поєднанні з високим внутрішнім шумом може знизити SNR і підвищити BER, тому підбір витримки повинен враховувати фактичний рівень освітлення й чутливість сенсора.

На основі табличних даних можна практично визначити критичні діапазони параметрів: для більшості завдань внутрішнього позиціонування бажано тримати SNR лінійно вище приблизно 10...15 (відповідно $\sim 20...24$ дБ) щоб мати запас щодо $BER < 10^{-3}$ за реальних умов. Для статичної камери можливе використання довших витримок, що підвищує SNR і стимулює зменшення BER. У таких умовах навіть за помірних частот кадрів (60-90 f_{ps}) і середніх значень N_{bpf} досягається стабільний прийом.

Для рухомої камери ситуація суттєво відрізняється: тривала експозиція призводить до розмиття світло-темних смуг, які є носіями даних, а отже до різкого зростання BER. У цьому режимі ефективний прийом можливий лише за коротких витримок і швидкого ролінг-затвора, що забезпечує достатню товщину біта і зберігає структуру VLC-сигналу.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі магістра виконано комплексне дослідження систем внутрішнього позиціонування на основі технології VLC.

1. Проведено огляд сучасних технологій VLC / OCC / Li-Fi та систем позиціонування. Встановлено, що VLC має значний потенціал завдяки високій пропускну здатності, безпечності та можливості суміщення освітлення з передачею даних.

2. Створено математичну модель VLC-каналу з урахуванням ламбертівського випромінювання, площі фотодетектора, фільтрів та кутів прийому. Отримані залежності освітленості, потужності та рівня фонового шуму дозволили оцінити вплив геометрії приміщення та параметрів LED на характеристику каналу. Модель є придатною для подальшої оптимізації та практичного проектування.

3. Досліджено вплив конфігурації випромінювачів на точність позиціонування. Розглянуто три схеми розташування LED. Побудовано карти освітленості, що дозволяють кількісно оцінити точність позиціонування у просторі.

4. Проведено порівняльний аналіз методів модуляції (OOK, PWM, CSK, PPM та їх модифікації). Визначено, що CSK потребує більшої потужності через кольорову констеляцію, тоді як PWM та OOK мають близькі енергетичні показники. PPM-модифікації демонструють високу стійкість до нелінійностей та можливість регулювання яскравості.

5. Проаналізовано камероорієнтований прийом VLC-сигналу для систем з існуючим світлодіодним освітленням. Виконано аналіз якості системи внутрішнього позиціонування на основі розрахунку параметрів приймача. Показано, що оптимізація параметрів камери дозволяє забезпечити стабільний прийом даних позиціонування.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bastiaens S., Alijani M., Joseph W., Plets D. Visible light positioning as a next-generation indoor positioning technology: a tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. V. 26 (4), 2024. PP. 286-2913.
2. Cheng H., Xiao C.X., Ji Y.Q., Ni J., Wang T. A Single LED Visible Light Positioning System Based on Geometric Features and CMOS Camera. *IEEE Photonics Technology Letters*. 32 (17), 2020. PP. 1097-1100.
3. Martinek R., Danys L., Jaros R. Adaptive Software Defined Equalization Techniques for Indoor Visible Light Communication. *Sensors* 20, Article 1618, 2020. 23 p.
4. Rahman A. B. M. M., et al. Recent advances in indoor localization via visible lights. *Sensors (MDPI)*, 3, 20 (5): 1382, 2020.
5. Wang R., Niu G., Cao Q., Chen C, S. Ho S.-W. A Survey of Visible-Light-Communication-Based Indoor Positioning Systems. *Sensors*, Vol. 24, No. 16, Article 5197, 2024. 26 p.
6. Yu, T.-C.; Huang,W.-T.; Lee,W.-B.; Chow, C.-W.; Chang, S.-W.; Kuo, H.-C. Visible Light Communication System Technology Review: Devices, Architectures, and Applications. *Crystals*, 11, № 1098, 2021. 28 p.
7. Zhao L., et al. Visible Light Indoor Positioning System Based on Pisarenko Harmonic Decomposition and Neural Network. *Chinese Journal of Electronics*, vol. 33, no. 1, 2024. PP. 195-203.
8. Zia M. T. Visible Light Communication Based Indoor Positioning System. *TEM Journal*. Volume 9, Issue 1, 2020. PP. 30-36.
9. Лебедева-Дичко А., Шило Г. Оптимізація сенсорного покриття в гібридних системах позиціювання. *Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика*. Вип. 7, № 1, 2025. С. 300-309.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А
Публікації здобувача



"ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ" Луцьк, 2025. Випуск №27

Маркіна Л. М., Чорнобай М. В., Сацик В. О., Смолянкін О. О. КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ І КОНТРОЛЮ АКАДЕМІЧНОЇ УСПІШНОСТІ СТУДЕНТІВ.....	113
Марчук В. І., Денисюк В. Ю., Пилипець М. І. ПРОЄКТУВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КУПОЛОПОДІБНОГО ТИПУ ДЛЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ.....	122
Мережа А. С., Пташенчук В. В. СИСТЕМА БАГАТОТОЧКОВОГО ВІМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПРИ ШЛІФУВАННІ.....	133
Микитюк М. П., Островський І. П. ДОСЛІДЖЕННЯ НАДПРОВІДНОСТІ В НАНОСТРУКТУРАХ VI_2SE_3	139
Новосад К. С., Никируй Л. І., Яремій І. П., Федосов С. А. АНАЛОГОВІ І ЦИФРОВІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ОПТИЧНОГО ДІАПАЗОНУ.....	145
Олещук Т. С., Гуменюк Л. О. МОДЕЛЬ РОБОТИ СУПЕРМАРКЕТУ З ДИНАМІЧНИМ КЕРУВАННЯМ ЧЕРГАМИ.....	151
Пилипець М. І., Денисюк В. Ю. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОКООРДИНАТНИХ П'ЄЗОПРИВОДНИХ СКАНЕРІВ.....	156
Сацик В. О., Маркіна Л. М., Копчунь А. О., Сацик О. В. АНАЛІЗ РОБОТИ ТА НАЛАШТУВАННЯ PID-РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМАХ СТАБІЛІЗАЦІЇ БПЛА НА БАЗІ ПРОШИВКИ BETAFLIGHT.....	165
Смолянкін О. О., Маркіна Л. М. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА БАЗІ RASPBERRY PI З ВИКОРИСТАННЯМ ГЛИБОКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ТА NODE-RED.....	175
Татарчук Д. Д., Богдан О. В., Діденко Ю. В., Лупина Б. І., Жеребець О. М. МІКРОМЕХАНІЧНИЙ КАЛОРИМЕТРИЧНИЙ СЕНСОР КОЛІВАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ЧАСТИНОК ГАЗУ ДЛЯ ПАСИВНОГО АКУСТИЧНОГО ПЕЛЕНГАТОРА БПЛА.....	180
Тимків П. О., Гевко О. В., Петров В. В. ІНТЕГРОВАНА ПУПІЛОМЕТРІЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ.....	187
Уніят С. В., Хвостівський М. О. АДАПТИВНИЙ ФАЗОВО-КОРЕЛЯЦІЙНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ВІДНОВЛЕННЯ СЕРЦЕВО-СУДИННОЇ СИСТЕМИ ПІСЛЯ ФІЗИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА ПУЛЬСОВИМИ СИГНАЛАМИ.....	195
Чалий В. Д., Мороз С. А., Лишук В. В., Приступа С. О., Євсюк М. М. ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТИПІВ ДАВАЧІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ.....	203
Шишковський С. О., Гуменюк Л. О. МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ ТА МАРШРУТИЗАЦІЇ ВОЛОНТЕРІВ ПІД ЧАС КАТАСТРОФ.....	210
Якимчук Н. М., Лукомський І. В. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ МОДУЛЯЦІЇ У СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ВИДИМОГО СВІТЛА.....	216
Янюк Д. В. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ ВЕЛИЧИНИ АВТОМАТИЧНОЇ ПОДАЧІ ДОВГОМІРНОЇ ПРУТКОВОЇ ЗАГОТОВКИ У ВЕРСТАТ.....	227

УДК 621.391.7

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-29

Якимчук Н. М., Лукомський І. В.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ МОДУЛЯЦІЇ У СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ВИДИМОГО СВІТЛА

В статті представлено результати теоретичного та аналітичного дослідження енергетичної ефективності основних методів модуляції у системах зв'язку на основі видимого світла (Visible Light Communication, VLC). Розроблено уніфіковану методику оцінювання показників енергоефективності, яка враховує вплив ключових параметрів системи – ефективності світлодіодів, чутливості фотоприймача, площі детектора, рівня шумів та множинних відбиттів від поверхонь. Проведено порівняльний аналіз трьох типових методів модуляції: On-Off Keying (OOK), Pulse-Width Modulation (PWM) та Color-Shift Keying (CSK) при фіксованому рівні освітленості. Встановлено, що OOK та PWM забезпечують близькі значення енергетичної ефективності, тоді як CSK, потребуючи більших енергетичних витрат, має перевагу в спектральній ефективності та потенціалі для високошвидкісної передачі даних. Врахування фонових шумів та геометричних характеристик середовища дозволило уточнити умови, за яких зростає або знижується ефективність системи. Результати дослідження мають практичне значення для проектування енергоощадних VLC-систем нового покоління, що поєднують функції освітлення та передачі інформації з мінімальними витратами енергії.

Ключові слова: Li-Fi, VLC, модуляція, On-Off Keying (OOK), Pulse-Width Modulation (PWM), Color-Shift Keying (CSK), енергоефективність, SNR, фотодетектор, світлодіод.

Постановка проблеми. Технології зв'язку на основі видимого світла (Visible Light Communication, VLC) стрімко розвиваються як перспективна альтернатива традиційним радіочастотним системам. Використання світлодіодів у ролі передавачів дає змогу забезпечити одночасно функції освітлення та передачі даних, проте вимагає адаптації методів модуляції до специфіки оптичного середовища. На відміну від радіочастотних каналів, у VLC-системах інформація може передаватися лише зміною інтенсивності світла, оскільки фотоприймачі реагують на потік випромінювання, а не на його фазу чи амплітуду. Це накладає обмеження на вибір модуляційних методів і створює низку технічних викликів, пов'язаних з уникненням мерехтіння, збереженням якості освітлення та забезпеченням енергетичної ефективності.

Одним із ключових питань є досягнення компромісу між швидкістю передачі даних, стійкістю до шумів та споживанням енергії. Різні методи модуляції – такі як On-Off Keying (OOK), Pulse-Width Modulation (PWM) і Color-Shift Keying (CSK) – демонструють суттєві відмінності за спектральною ефективністю та енергетичними характеристиками. Тому дослідження енергоефективності цих методів є важливим для розробки високопродуктивних VLC-систем нового покоління. Оптимізація модуляції дозволяє мінімізувати енергоспоживання при збереженні необхідної якості зв'язку, що має особливе значення для побудови екологічно ефективних бездротових технологій освітлення та позиціонування.

Аналіз останніх досліджень. Вже упродовж тривалого часу зростає інтерес до технологій VLC / Li-Fi, що обумовлено їхнім потенціалом поєднувати освітлення й високошвидкісну передачу даних. Сучасні огляди узагальнюють прогрес у цифровій обробці сигналів, апаратних рішеннях та експериментальних демонстраціях, які дозволяють досягати високих пропускних здатностей за допомогою LED і спеціалізованих приймачів [1], [2]. Разом з цим література показує, що практичне розгортання обмежується реальними властивостями світлодіодів (люмінофорні затримки, нелінійність), вимогами до димінгу та уникнення видимого мерехтіння, а також впливом фонового освітлення на SNR/BER [1], [11].

Одне з головних напрямків – розвиток багатовимірних та багатоканальних підходів (CSK, MIMO, OFDM-подібні схеми) для підвищення спектральної ефективності. Роботи з CSK підкреслюють перевагу кольорової мультिकанальної передачі, що дозволяє інтегрувати передачу інформації та підтримувати біле освітлення; одночасно вони вказують на підвищені вимоги до калібрування, спектральної чутливості приймача та потребу у підвищеному SNR для забезпечення низького BER [5], [6]. Дослідження MIMO-VLC демонструють додаткові

можливості підвищення пропускну здатності, проте вказують на ускладнення задач калібрування просторових каналів та енергетичні накладні витрати апаратури [3], [12].

Інша велика група робіт присвячена інтенсивнішим модуляціям, які сумісні з функцією освітлення: OOK, PWM, PPM і їхніми модифікаціям (MPPM, EPPM, MEPPM, VPPM). Загальні огляди та експерименти підтверджують: прості схеми (OOK, PWM) забезпечують простоту реалізації та відносну енергоефективність при фіксованому середньому освітленні, тоді як імпульсні схеми (PPM-різновиди) мають кращу енергоефективність і стійкість до нелінійностей, але жертвують спектральною щільністю без подальших модифікацій або гібридизації [1], [11]. Нові покращення VPPM та варіативних PPM-рішень спрямовані на одночасне забезпечення димінгу й стійкого передавання, зокрема шляхом детекторних алгоритмів, нечутливих до рівня димінгу [7-8].

У сфері приймачів і методів детекції помітний прогрес у розробці покращених схем виявлення для PPM та інших нечутливих до фази режимів; це зменшує втрати продуктивності енергодетекційних схем і дозволяє підвищувати швидкість при заданому BER [9], [10]. Також висвітлюються підходи до енергоефективної оптимізації ресурсів (передача + розподіл потужності, SLIPT, NOMA, RIS-допомога) у VLC-мережах, що демонструють значний інтерес до оптимізації споживання енергії як ключового індикатора енергоефективності системи [13], [14].

Окрім технічних рішень, значна частина останніх праць приділяє увагу гібридизації Li-Fi та Wi-Fi (HLWNets) для досягнення надійності покриття та ефективного керування ресурсами у багатоклієнтських середовищах; ці дослідження розглядають взаємодію на мережевому рівні, вплив модулювання на мобільність і заходи щодо балансування навантаження й керування переходами між середовищами зв'язку [4].

Незважаючи на помітний прогрес, у літературі виявляються системні прогалини. По-перше, відсутні узгоджені, експериментально підтвержені методики прямого порівняння різних модулювань за спектральними та енергетичними критеріями з урахуванням нелінійних характеристик білих LED і реальних шумових моделей. По-друге, для CSK все ще не вироблено практично зручних процедур калібрування під різні типи джерел (RGB/QLED) і реальні внутрішні відбивні середовища; це ускладнює її впровадження в широкі осередках освітлювального обладнання [5]. У цьому контексті систематичний енергетичний аналіз для ключових схем модуляції при фіксованому середньому освітленні, із моделями нелінійності LED і реалістичними шумовими умовами, заповнює помітну прогалину між теоретичними оцінками та інженерними вимогами до впровадження VLC у освітлювальні мережі. Такий підхід дозволяє сформулювати практичні рекомендації щодо вибору модуляції залежно від завдань освітленості, зон покриття та апаратних обмежень.

Метою даного дослідження є кількісне порівняння енергоефективності основних методів модуляції у системах зв'язку на основі видимого світла (VLC/Li-Fi) з урахуванням практичних обмежень світлодіодних джерел випромінювання та фотоприймальних пристроїв.

Виклад основного матеріалу. Модуляція у системах Li-Fi має суттєві відмінності від модуляції у традиційних радіочастотних системах. У радіочастотних каналах інформація може кодуватися за фазою та амплітудою сигналу, проте у випадку видимого світла такі методи непридатні. Це пов'язано з тим, що світловий потік не може змінювати фазу або амплітуду у звичному радіочастотному сенсі, оскільки фотодетектори сприймають лише інтенсивність випромінювання, а не його фазу.

Отже, у VLC модуляція досягається шляхом зміни інтенсивності світла, де рівень яскравості світлодіода відповідає інформаційному вмісту переданого сигналу. Такий принцип отримав назву модуляції за інтенсивністю із подальшою детекцією прямого випромінювання.

Під час розробки схеми модуляції для VLC необхідно враховувати два основні фактори:

1) Уникнення видимого мерехтіння. Одним із головних завдань є запобігання видимому мерехтінню, адже основна функція світлодіодів – це енергоефективне освітлення. Для уникнення дискомфорту зорового сприйняття частота перемикання сигналу має бути понад 200 Гц, а у високошвидкісних системах може досягати 10 МГц. Такий підхід дозволяє передавати дані без погіршення якості освітлення для користувача.

2) Збереження якості яскравості. Протоколи мультиплексування не повинні негативно впливати на яскравість освітлення, тому вибір методу модуляції має враховувати цю вимогу. Різні види діяльності потребують різного рівня освітленості. Наприклад, для звичайної візуальної активності у громадських приміщеннях необхідно 30–100 люкс. Таким чином, дизайн

модуляції повинен забезпечувати можливість димування – плавного регулювання яскравості без спотворення переданих даних.

Одним із найпростіших і найпоширеніших методів є модуляція ввімкнення/вимкнення (On-Off Keying, OOK). У цьому методі біт «1» передається шляхом вмикання світлодіода, а біт «0» – його вимкненням. На практиці LED не вимикається повністю, а лише зменшує інтенсивність випромінювання, що забезпечує комфортне освітлення. Перевагами OOK є простота реалізації та низька обчислювальна складність, однак обмеженням є низька швидкість передавання даних, особливо у випадку використання білих світлодіодів із жовтим люмінофором, який має повільну часову реакцію. Застосування фільтрації та аналогового вирівнювання дозволило підвищити швидкість передавання до понад 100 Мбіт/с, проте принципово метод залишається малоефективним для високошвидкісних систем.

Для підвищення ефективності було запропоновано імпульсні методи модуляції, у яких інформація кодується параметрами імпульсів, такими як ширина або положення у часі. Модуляція за шириною імпульсу (Pulse Width Modulation, PWM) регулює тривалість імпульсу відповідно до рівня яскравості. Це дозволяє не лише передавати дані, а й реалізовувати функцію димування, тобто регулювання освітленості у межах 0–100%. Недоліком PWM є низька швидкість передачі (до кількох кілобіт за секунду), тому у подальших роботах вона поєднувалася з іншими методами, наприклад, із дискретною багатотональною модуляцією (Discrete Multitone, DMT), що дозволило одночасно керувати освітленням і передавати дані на вищих швидкостях.

Суттєвим кроком уперед у розвитку VLC стала модуляція зі зсувом кольору (Color Shift Keying, CSK), запропонована у стандарті IEEE 802.15.7. Її суть полягає у зміні відносних інтенсивностей трьох кольорових компонентів – червоної, зеленої та синьої – у джерелі світла типу RGB. Комбінація цих інтенсивностей створює біле світло, але одночасно передає інформацію через зміни координат кольору у кольорному просторі. На відміну від систем, що базуються на білих світлодіодах із жовтим люмінофором, CSK забезпечує значно більшу швидкість передавання даних, оскільки кожен кольорний канал може використовуватися як незалежний носій інформації (Табл. 1). При цьому використовується хроматична діаграма (Рис. 1), де координати x і y відповідають параметрам кольору, сприйманим людським оком. CSK є перспективним методом, оскільки дозволяє досягти високих швидкостей передавання без погіршення якості освітлення.

Таблиця 1 – Центральні, кодові та хроматичні координати, що використовуються сімома смугами, які застосовуються в CSK [6]

Діапазон (нм)	Код	Центр (нм)	Координати (x, y)
380–478	000	429	(0.169, 0.007)
478–540	001	509	(0.011, 0.733)
540–588	010	564	(0.402, 0.597)
588–633	011	611	(0.669, 0.331)
633–679	100	656	(0.729, 0.271)
679–726	101	703	(0.734, 0.265)
726–780	110	753	(0.734, 0.265)

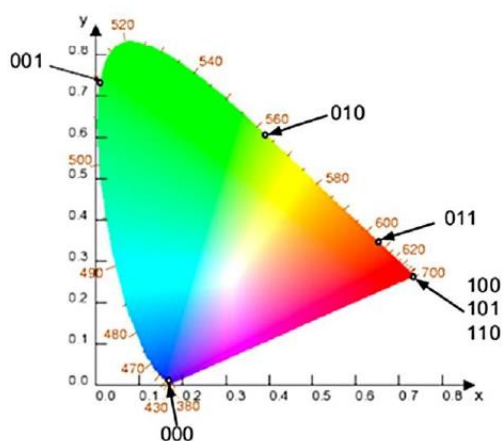


Рисунок 1 – Хроматична діаграма CSK [6]

Іншим поширеним методом є модуляція за позицією імпульсу (Pulse Position Modulation, PPM), у якій часова тривалість символу ділиться на рівні інтервали, а передавання здійснюється в одному з них. Такий підхід має високу енергетичну ефективність, але страждає на низьку швидкість передачі, оскільки в кожному символі використовується лише один імпульс. Для подолання цього обмеження було розроблено модифікації: багатоімпульсну PPM (MPPM), яка передбачає кілька імпульсів у межах одного символу, що підвищує спектральну ефективність; виключену PPM (EPPM), створену для систем, обмежених піковою потужністю; та багаторівневу EPPM (MEPPM), яка додатково збільшує щільність передавання інформації. Порівняльний аналіз цих методів показує, що вони забезпечують високу стійкість до мерехтіння та нелінійностей світлодіодів, водночас зберігаючи можливість регулювання яскравості (Табл. 2).

Таблиця 2 – Аналіз ефективності видів модуляції за позицією імпульсу [6]

Метод модуляції	Підтримка димування	Спектральна ефективність	Сприйнятливості до мерехтіння	Вплив нелінійності LED
MPPM (Multipulse PPM)	Так	< 1	Низька	Низький
EPPM (Expurgated PPM)	Так	< 1	Низька	Низький
MEPPM (Multilevel EPPM)	Так	2–3	Дуже низька	Низький

Традиційна модуляція за позицією імпульсу (PPM, Pulse Position Modulation) передбачає використання високої напруги для представлення логічної «1». Оскільки інтенсивність світла пов'язана з робочим циклом сигналу, надто розріджена послідовність даних у PPM може призводити до зниження середньої яскравості.

Щоб усунути цей недолік, застосовується інверсна модуляція з лінійним положенням імпульсу (I-LPPM, Inverted Linear Pulse Position Modulation), у якій позиція імпульсу PPM інвертується. Це забезпечує збільшення середньої переданої потужності світлодіода і, відповідно, підвищує якість освітлення.

Крім цього, стандарт IEEE 802.15.7 визначає змінну модуляцію за позицією імпульсу (VPPM, Variable Pulse Position Modulation), що дозволяє уникнути ефекту мерехтіння; реалізувати механізм регулювання яскравості (dimming control). Попри переваги, VPPM наразі

застосовується лише в обмеженій кількості систем позиціонування, і потребує подальших наукових досліджень для підвищення ефективності її використання у VLC-технологіях.

Методика дослідження. Одним із ключових аспектів проєктування всіх видів систем зв'язку є енергетична ефективність, тобто здатність системи передавати максимальну кількість інформації при мінімальних енергетичних витратах [15]. У контексті VLC це питання набуває подвійного значення: енергія витрачається не лише на передачу даних, але й на освітлення, тому метод модуляції має забезпечувати баланс між інформаційною продуктивністю та якістю освітлення.

Енергоефективність у VLC оцінюється через відношення кількості переданих бітів до спожитої енергії, виражене у бітах на джоуль, або через енергію на біт E_b , що визначається як:

$$E_b = \frac{P^{cep}}{R_b}, \quad (1)$$

де P_{el}^{cep} – середня електрична потужність LED/системи, R_b – швидкість бітів.

Оскільки у VLC сигнал формується зміною інтенсивності світлового потоку, оптична потужність, яка досягає фотоприймача, визначається як функція геометрії простору, властивостей джерел та фотоприймача. Для однорідного набору N LED джерел з ламбертівським розподілом інтенсивності можна записати [7]:

$$P_s = \sum_{i=1}^N \frac{(m+1)A_R P_{T_i}}{2\pi D_i^2} \cos^m(\theta_i) \cos^M(\psi_i) T_s(\psi_i) g(\psi_i), \quad (2)$$

де D_i – відстань між i -м світлодіодом та приймачем, A_R – ефективна площа фотодетектора, P_{T_i} – оптична потужність джерела, θ – кут випромінювання, ψ – кут падіння на приймач, $T_s(\psi_i)$ – коефіцієнт пропускання оптичного фільтра, $g(\psi_i)$ – коефіцієнт підсилення концентратора, а m та M – ламбертівські порядки для джерела та приймача відповідно.

Електричний струм на виході фотодетектора визначається:

$$I_s = R \cdot P_r = R(P_s + P_{bg}), \quad (3)$$

де R – чутливість фотодіода, А/Вт, P_s , P_{bg} – оптична потужність, що надходить від джерела (сигнальна складова) та потужність фонового освітлення.

Співвідношення сигнал/шум, SNR, в приймачі:

$$SNR = \frac{(R \cdot P_s)^2}{\sigma_n^2}. \quad (4)$$

де σ_n^2 – сумарна дисперсія шуму.

Шумова модель включає стрілочний, термічний та темновий шуми [7]:

$$\sigma_n^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{therm}^2 + \sigma_{dark}^2, \quad (5)$$

$$\sigma_{shot}^2 = 2qRP_s B, \quad (6)$$

$$\sigma_{therm}^2 = \frac{4kTB}{R_l}, \quad (7)$$

$$\sigma_{dark}^2 = 2qRP_{bg} B, \quad (8)$$

де q – заряд електрона, k – стала Больцмана, T – температура (300 К), B – смуга частот приймача ($B \approx R_b/2$), R_l – еквівалентний опір навантаження.

Вимоги по SNR для кожного типу модуляції визначають, яка оптична (і отже електрична) потужність потрібна для досягнення цільового BER. Різні моди мають різні вимоги: у загальному, багаторівневі/мультисимвольні методи (CSK з багаточисловою констеляцією) потребують вищого SNR ніж просте дворівневе OOK для однакового BER. Оцінка необхідної електричної потужності здійснюється як:

1) Для OOK методу. Символ «1»: LED випромінює ($P_{on}=P_t$). Символ «0»: ($P_{off}=0$). При випадкових 0/1 з ймовірністю $D=0.5$ середня оптична потужність N LED джерел:

$$\bar{P}_t^{OOK} = NP_t D. \quad (9)$$

Електрична потужність (за ефективністю LED η):

$$P_t^{OOK} = \bar{P}_t^{OOK} / \eta. \quad (10)$$

2) При використанні PWM інформація кодується шириною імпульсу; при тій самій середній яскравості PWM може застосувати вищий піковий струм, але середня оптична потужність для заданого рівня освітленості однакова. Для енергетичного аналізу при тому ж середньому освітленні: $\bar{P}_{opt}^{PWM} \approx \bar{P}_t^{OOK}$, але спектральні властивості та SNR на біт можуть відрізнятись (через ширину імпульсу/частоту PWM і ширину каналу).

3) Для CSK передача символів за зміною відносної інтенсивності каналів різних кольорів (наприклад RGB). Загальна оптична потужність розподіляється по кольорах.

Для даного середнього освітлення сумарна оптична потужність може бути такою ж, як у OOK, але щоб досягти того ж BER, CSK зазвичай вимагає вищого SNR (внаслідок меншого мінімального евклідового відстані констеляції у відтінковому просторі), отже потребує більшої потужності (або кращого приймача).

Розглянемо приклад розрахунку для моделі з чотирьох світлодіодів, розміщених у вигляді квадратної решітки в межах одного приміщення. Розглянуто режим мультиплексування AllSame – усі LED передають однакову інформацію; сигнали сумуються на приймачі, що покращує SNR. Для досягнення цільового рівня бітрової похибки ($BER \approx 10^{-6}$) приймемо як необхідне опорне значення $SNR=10$ для всіх методів модуляції.

Порівняльний аналіз виконано при однаковому середньому рівні освітленості, що дозволяє об'єктивно оцінити енергоефективність кожної схеми без спотворення освітлювальних характеристик. Для базових умов: кімната $4*4$ м; LED розташовані у сітці на стелі (висота 3,0 м) у точках (1,1), (1,3), (3,1), (3,3) в метрах; фотоприймач розміщений у центрі кімнати на висоті 0,85 м (робоча поверхня); вертикальна відстань від LED до приймача $z = 3.0-0.85 = 2.15$ м. Параметри LED/приймача: пікова оптична потужність одного LED $P_t = 0.5$ Вт (оптична); кут напівсили $\theta_{1/2} = 60^\circ$, (тоді Ламбертівський порядок $m = 1$); площа фотодіода $A_{pd} = 1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$; чутливість фотодіода $R = 0.4 \text{ A/Вт}$; оптичний фільтр і концентратор з параметрами: $T_s = 1$, $g = 1$; LED електрооптична ефективність $\eta = 0.30$ (30%), бітрейт $R_b = 10 \text{ Мбіт/с}$; умовна дисперсія шумового струму $\sigma_n = 10^{-6} \text{ А}$; усі 4 LED передають однаково (симетрично).

Результати узагальнено у вигляді показників в Табл. 3.

Таблиця 3 – Енергетика випромінювання для трьох видів модуляції

Модуляція	Середня опт. потужн., Вт	Середня ел. потужн., Вт	Енергія на біт, Дж/біт	Ефективність, біт/Дж
OOK	1.0	3.333	$3.33 \cdot 10^{-7}$	$3.0 \cdot 10^6$
PWM	≈ 1.0	≈ 3.333	$\approx 3.33 \cdot 10^{-7}$	$\approx 3.0 \cdot 10^6$
CSK	2.0	6.667	$6.67 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^6$

За однакового середнього освітлення OOK і PWM дають схожу енергоефективність, бо середня оптична потужність однакова. PWM може мати інші переваги/недоліки (легкість димування, простота апаратної реалізації).

CSK у загальному випадку буде менш енергоефективним, якщо для досягнення того ж BER вимагає вищого SNR (а отже і більшої оптичної потужності). Однак CSK дає додаткові переваги (мультиканальна передача, кольорові констеляції, сумісність з RGB-освітленням).

Встановлено ключові фактори, що впливають на показники ефективності в практичних застосуваннях числа: ефективність LED η , чутливість фотоприймача R , площа фотодіода A_{pd} , рівень шуму, бітрейт, спосіб мультиплексування (якщо LED несуть різні дані), затінення та рефлексії (множинні відбиття від поверхонь кімнати підвищують P_r і поліпшують енергоефективність). Було отримано залежності середньої електричної потужності системи від ключових параметрів для трьох видів модуляції для забезпечення цільового SNR (Рис. 2).

Аналіз показує, що:

–CSK потребує значно більшої потужності для досягнення заданого BER, що пояснюється вищими вимогами до SNR через використання багаторівневої констеляції кольорів;

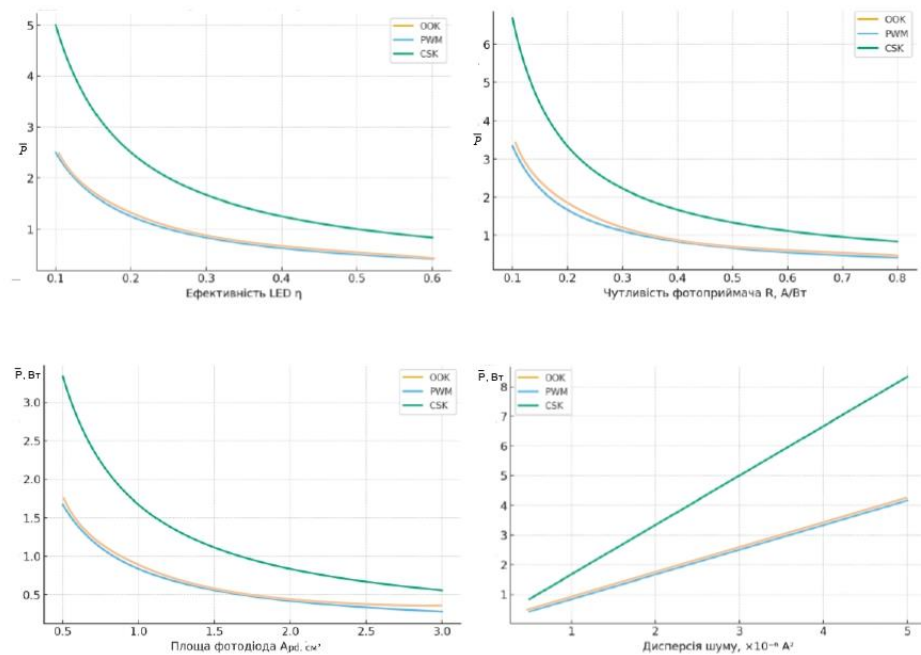
–OOK і PWM демонструють близькі показники, оскільки їхні SNR-вимоги ідентичні, а відмінність полягає лише у часовому співвідношенні імпульсів;

–підвищення ефективності світлодіодів η або чутливості фотоприймача R прямо зменшує необхідну електричну потужність;

–збільшення площі фотодіода A_{pd} покращує збір оптичної потужності, проте надмірне зростання може збільшити шум і є обмеженим технологічно;

–зростання швидкості передавання R_b або ширини смуги B веде до зростання шумів і, відповідно, до потреби у вищій потужності;

–вплив затінення та відбиттів має критичний характер – зменшення K_0 через часткове перекриття променів може підвищити необхідну потужність на порядок;



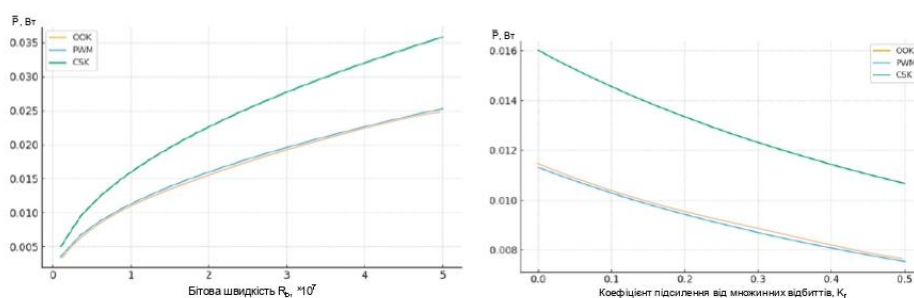


Рисунок 2 – залежність середньої електричної потужності системи від ключових параметрів VLC-системи

Ці результати наочно демонструють: OOK і PWM мають близькі енергетичні характеристики, тоді як CSK забезпечує більшу пропускну здатність ціною підвищеного енергоспоживання, що підтверджує висновки аналітичної частини дослідження. Дослідження є підґрунтям для розробки адаптивних методів вибору модуляції залежно від вимог до освітленості, швидкості та енергоспоживання.

Висновки. Проведене дослідження дозволило оцінити енергетичну ефективність основних методів модуляції у системах зв'язку на основі видимого світла та порівняти різні методи не лише за швидкістю передавання або стійкістю до завад, а й за критерієм енергії на біт при сталому рівні освітленості, що є критично важливим для практичного впровадження у системах «розумного» освітлення, автомобільних Li-Fi-комунікаціях та мережах IoT. Розроблена аналітична модель із урахуванням шумових процесів, ефективності LED, чутливості фотоприймача, площі детектора та впливу відбиттів дала змогу кількісно визначити залежність середньої електричної потужності системи від цих параметрів при фіксованому рівні освітленості. Отримані результати показали, що методи On-Off Keying та Pulse-Width Modulation мають практично однакову енергетичну ефективність і є доцільними для застосування у побутових та офісних VLC-системах, де пріоритетом є низьке енергоспоживання та стабільна якість освітлення. Водночас метод Color-Shift Keying, незважаючи на більші енергетичні витрати, продемонстрував перевагу в спектральній ефективності та потенціал для реалізації високошвидкісних каналів передачі даних. Врахування фонових шумів та множинних відбиттів показало, що ці фактори істотно впливають на необхідну потужність для досягнення цільового SNR. Таким чином, запропонована методика енергетичного аналізу, що поєднує аналітичні моделі з урахуванням шумових процесів, оптичних параметрів і геометрії середовища, може бути застосована для оцінювання ефективності гібридних і багаторівневих схем модуляції, зокрема Variable Pulse Position Modulation (VPPM), Multi-Pulse PPM (MPPM), Multi-Level Expurgated PPM (MEPPM), Discrete Multitone Modulation (DMT) та Color-Intensity Modulation (CIM).

Інформаційні джерела

1. Loureiro P. A., Guiomar F. P., Monteiro P. P. Visible light communications: A survey on recent high-capacity demonstrations and digital modulation techniques. *Photonics*, 10(9), 993, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics10090993>
2. Gupta S., Roy D., Bose S., Dixit V., Kumar A. Illuminating the future: A comprehensive review of visible light communication applications. *Optics & Laser Technology*, 177, 111182, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111182>
3. Sejan M. A. S., et al. A comprehensive survey on MIMO visible light communication: Current research, machine learning and future trends. *Sensors*, 23(2), 739, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23020739>

4. Besjedica T., Fertalj K., Lipovac V., Zakarija I. Evolution of hybrid LiFi–WiFi networks: A survey. *Sensors*, 23(9), 4252, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23094252>
5. Becerra R., Azurdia-Meza C. A., Palacios Játiva P., Soto I., Sandoval J., Ijaz M., Carrera D. F. A wavelength-dependent visible light communication channel model for underground environments and its performance using a color-shift keying modulation scheme. *Electronics*, 12(3), 577, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12030577>
6. Yu T. C., Huang W. T., Lee W. B., Chow C. W., Chang S. W., Kuo H. C. Visible Light Communication System Technology Review: Devices, Architectures, and Applications. *Crystals* 2021, 11, 1098, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst11091098>
7. Zhu Z., Yang Y., Chen M., Guo C., Cheng J., Cui S. A Survey on Indoor Visible Light Positioning Systems: Fundamentals, Applications, and Challenges. *arXiv preprint*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.13893>
8. Beguni C. et al. Increasing Vehicular Visible Light Communications Range by Modified VPPM. *Sensors*. PMC, Mar 31; 23(7): 3656, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23073656>
9. Khani H. Improved Detection Schemes for Non-coherent PPM. *Wireless Pers. Commun.*, 131, 2173–2192, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10537-7>
10. Islam M. S., Younis M., Mahmud M. and Choa F. S. An Efficient Pulse Position Modulation Scheme to Improve the Bit Rate of Photoacoustic Communication. 2023 32nd Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), Newark, NJ, USA, 2023, pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/WOCC58016.2023.10139346>.
11. He C., Ali W. Advances in visible light communication. *Photonics*, 10(11), 1277, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics10111277>
12. Hassan E. S., Jabbari A., Alharbi A. A. Evaluating MIMO-VLC System Performance: Modulation Techniques and Ambient Light Interference Effects. *Photonics*, 12(7), 649, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics12070649>
13. Ncube W. Z., Qidan A. A., El-Gorashi T., Elmirghani J. M. N. On the energy efficiency of Laser-based Optical Wireless Networks. *ArXiv*, arXiv:2203.10904, 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.10904>
14. Ihsan A. et al. Energy-Efficient TDMA-NOMA for RIS-Assisted Ultra-Dense VLC Networks. 2024. 13 p. URL: <https://strathprints.strath.ac.uk>
15. Zablotskyi V., Selepyna Y., Lyshuk V., Yakymchuk N., Tkachuk A. Method for evaluation quality parameters of telecommunications services. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, 12(2), 2022. PP. 30–33. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.2918>

Yakymchuk N., Lukomskiy I.

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF MODULATION METHODS IN VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SYSTEMS

The article presents the results of a theoretical and analytical study of the energy efficiency of the main modulation methods used in visible light communication (VLC) systems. A unified methodology for evaluating energy efficiency indicators is developed, taking into account the influence of key system parameters, including LED efficiency, photodetector sensitivity, detector area, noise level, and multiple reflections from surrounding surfaces. A comparative analysis of three typical modulation techniques – On-Off Keying (OOK), Pulse-Width Modulation (PWM), and Color-Shift Keying (CSK) – is performed under a fixed illuminance level. It is shown that OOK and PWM provide similar energy efficiency values, whereas CSK, while requiring higher energy consumption, offers advantages in spectral efficiency and high data rate potential. The inclusion of background noise and geometric characteristics of the environment made it possible to refine the conditions under which system efficiency increases or decreases. The obtained results are of practical significance for the design of energy-efficient next-generation VLC systems that combine illumination and information transmission functions with minimal energy losses.

Keywords: Li-Fi, VLC, modulation, On-Off Keying (OOK), Pulse-Width Modulation (PWM), Color-Shift Keying (CSK), energy efficiency, SNR, photodetector, LED.