

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ПЕРЕДАЧА ДАНИХ В ОПТИЧНОМУ ДІАПАЗОНІ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СВІТЛОДІОДІВ
(тема)

Виконав:
здобувач 2 курсу, групи ЛОЕТМ-23-1
Дяков В.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні
технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна
техніка»
(повна назва освітньої програми)

Керівник ст. викл. каф. ФОЕТ Кухтін С.М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис) Гнатенко О.С.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна техніка»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Дякову Віталію Вікторовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Передача даних в оптичному діапазоні із застосуванням світлодіодів

затверджена наказом університету від «22» листопада 2024 р. № 1229 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 27 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи розмір кімнати: $5 \times 5 \times 2,25$ м³; коефіцієнт відбиття від поверхонь 0,8; напівкут на половині потужності джерела 70°; кількість світлодіодів на масив 3600; потужність кожного світлодіода $P = 20$ мВт; активна площа фотодетектора $A_d = 1$ см²; Напівкут поля зору фотодетектора 60°; $\Delta t = 0,5$ нс; показник заломлення об'єктива фотодіода $n = 1,5$.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Дослідити можливості світлодіодів та фотодіодів у сфері оптичного бездротового зв'язку. 2 Методи оптичної передачі інформації. 3 Моделювання оптичної бездротової комунікації у кімнаті. 4 Розробка рекомендацій щодо оптимізації систем оптичного бездротового зв'язку.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій _____
Демонстраційний матеріал – 17 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про світлодіоди, фотодіоди та способи передачі інформації між ними.	01.10.24 – 12.10.24	Виконано
2	Аналіз методів оптичної передачі інформації.	13.10.24 – 21.10.24	Виконано
3	Проведення моделювання оптичної бездротової комунікації у кімнаті	22.10.24 – 03.11.24	Виконано
4	Розробка рекомендацій щодо оптимізації систем оптичного бездротового зв'язку	05.11.24 – 18.11.24	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	19.11.24 – 15.12.24	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	16.12.24 – 21.12.24	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	28.12.24 – 21.01.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	22.01.25 – 24.01.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	25.01.25 – 28.01.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2024 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ ст. викл. каф. ФОЕТ Кухтін С.М.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 60 с., 20 рис., 4 табл.,
1 додаток, 23 джерела.

ВИДИМЕ СВІТЛО, ІМПУЛЬСНА ХАРАКТЕРИСТИКА,
ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ ЛЮМІНЕСЦЕНТНОГО СВІТЛА, МОДУЛЯЦІЯ
ІНТЕНСИВНОСТІ З ПРЯМИМ ВИЯВЛЕННЯМ, СВІТЛОДІОД,
СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНА ЗАТРИМКА, ФОТОДЕТЕКТОР.

Об'єкт дослідження – система оптичного бездротового зв'язку на основі світлодіодів і фотодетекторів.

Мета роботи – дослідити особливості використання світлодіодів для передачі даних, аналіз їх технічних характеристик, а також розробка рекомендацій щодо оптимізації систем оптичного бездротового зв'язку.

Методи дослідження – аналітичні та чисельні.

У роботі було розглянуто фізичні засади передачі інформації світлодіодами, методи бездротового зв'язку та проведено моделювання системи у кімнаті для дослідження впливу характеристик обладнання та умов розташування на продуктивність передачі інформації.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 60 pages, 20 figures, 4 tables, 1 application, 23 sources.

IMPULSE CHARACTERISTICS, FLUORESCENT LIGHT INTERFERENCE, INTENSITY MODULATION WITH DIRECT DETECTION, LED, PHOTODETECTOR, RMS DELAY, VISIBLE LIGHT.

The object of the study is an optical wireless communication system based on LEDs and photodetectors.

The purpose of the work is to investigate the features of using LEDs for data transmission, analyze their technical characteristics, and develop recommendations for optimizing optical wireless communication systems.

Research methods are analytical and numerical.

The work considered the physical basis of information transmission by LEDs, wireless communication methods, and simulated the system in a room to study the influence of equipment characteristics and location conditions on the performance of information transmission.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Дослідження характеристик обладнання для оптичного бездротового зв'язку	8
1.1 Джерела світла.....	8
1.2 Приймачі світла	14
2 Методи оптичної передачі інформації	20
2.1 Конфігурації оптичного бездротового зв'язку.....	21
2.2 Бездротова передача даних в інфрачервоному діапазоні.....	23
2.3 Бездротова передача даних в видимому спектрі	26
2.4 Класифікація ОБЗ за модуляцією	29
3 Моделювання каналу оптичного бездротового зв'язку	32
3.1 Конфігурація прямої видимості.....	33
3.2 Конфігурація непрямої видимості.....	36
3.3 Моделювання системи з 4 джерелами	43
3.4 Порівняльна характеристика методів оптичної комунікації	53
Висновки	57
Перелік джерел посилання	58
Додаток А Демонстраційний матеріал	61

ВСТУП

Сучасний розвиток технологій передачі даних ставить перед інженерами та науковцями нові завдання, пов'язані з підвищенням швидкості, надійності та енергоефективності комунікаційних систем. Одним із перспективних напрямків є використання оптичного діапазону для бездротової передачі інформації. Цей підхід дозволяє створювати альтернативу традиційним радіочастотним технологіям, які все частіше стикаються з обмеженнями, такими як перевантаження спектру та інтерференція сигналів.

У цьому контексті світлодіоди (СД, або LED) виступають як ключовий елемент оптичних систем зв'язку. Завдяки своїм перевагам, таким як висока енергоефективність, низька вартість, тривалий термін служби та здатність до швидкого перемикання, світлодіоди відкривають нові можливості для реалізації систем комунікацій у видимому світлі (Visible Light Communication, VLC). Такі системи мають широкий спектр застосувань – від інтелектуальних освітлювальних рішень до високошвидкісного передачі даних у локальних мережах.

Актуальність теми зумовлена зростаючою потребою в екологічно чистих, безпечних та ефективних технологіях зв'язку, які можуть працювати в умовах високої щільності пристроїв та обмеженого доступу до радіочастотного спектру. У цій роботі основна увага приділяється аналізу методів передачі даних в оптичному діапазоні із застосуванням світлодіодів, а також оцінці їхньої ефективності та перспективності в реальних умовах експлуатації.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАДНАННЯ ОПТИЧНОГО БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Існує ряд джерел світла та фотодетекторів, які можна використовувати в системах оптичного бездротового зв'язку (ОБЗ). Найбільш часто використовуваними джерелами світла є некогерентні світлодіоди і когерентні лазерні діоди (ЛД). Світлодіоди в основному використовуються для внутрішнього застосування ОБЗ. Однак для коротких з'єднань (наприклад, до кілометра) і помірних швидкостей передачі даних також можна використовувати світлодіоди замість лазерних діодів. ЛД є монохроматичними, когерентними та спрямованими, і тому вони в основному використовуються для зовнішнього застосування. Особливо для довгих каналів передачі дуже важливо спрямувати енергію інформації, що передається, у формі добре колімованого світлового променя, щоб витримати атмосферні умови, які можуть призвести до високого загасання. Щоб обмежити розбіжність пучка, в ідеалі слід використовувати дифракційно обмежені джерела світла разом з відносно великими високоякісними оптичними телескопами. На приймальному кінці також вигідно використовувати високоспрямований телескоп не тільки для збору якомога більшої потужності, що передається, але й для зменшення фонового зовнішнього освітлення, яке створить додатковий шум і, таким чином, погіршить продуктивність зв'язку. Що стосується фотодіодів (ФД), можна легко використовувати як PIN, так і лавинний фотодіод (ЛФД), хоча останній дорожчий.

В цьому розділі буде розглянуто вплив характеристик передавачів і приймачів на роботу системи ОБЗ.

1.1 Джерела світла

Для оптичних систем зв'язку прийнятні джерела світла повинні мати наступні ключові характеристики:

- 1) відповідна довжина хвилі та вузька ширина лінії (тобто висока смуга пропускання);
- 2) швидкий час відгуку (широкосмуговий) для високошвидкісних каналів зв'язку;
- 3) вузька діаграма спрямованості (ширина променя) з високим рівнем випромінювання (тобто потужності) і малою площею випромінюючої поверхні переважно для зовнішнього застосування;
- 4) висока енергоефективність, довший термін служби, стабільність (переважно для ЛД), висока надійність і низька вартість;
- 5) лінійна вольт-амперна характеристика, що важливо для передачі аналогового сигналу;
- 6) здатність до прямої модуляції шляхом зміни струму збудження та високої смуги модуляції.

Існує кілька доступних джерел світла, але найбільш часто використовуваними в оптичних комунікаціях і в ОБЗ є СД та ЛД, що є твердотільними пристроями, для роботи яких використовується електронне збудження напівпровідникових матеріалів [1]. Оптичне випромінювання цих люмінесцентних пристроїв виключає будь-яке теплове випромінювання через температуру матеріалу, як у випадку з джерелами світла розжарювання.

Світлодіод – це напівпровідниковий прилад, який випромінює світло при пропусканні через нього електричного струму в прямому напрямку. І ЛД, і СД мають невеликі розміри; низьку пряму напругу, а отже, і струм керування; чудову яскравість, особливо у видимому діапазоні хвиль; і мають можливість випромінювання на одній довжині хвилі або діапазоні довжин хвиль. Яке джерело світла обрати, головним чином залежить від конкретних застосувань та їхніх ключових характеристик, включаючи характеристики оптичної потужності та струму, швидкість перемикання та профіль променя. Також потужність, яку видають обидва пристрої, однакова (від 10 мВт до 50 мВт) [2].

Світлодіоди випромінюють некогерентне світло шляхом спонтанного випромінювання, коли піддаються електронному збудженню. Електронне

збудження досягається застосуванням прямої напруги зміщення через *pn*-перехід.

Випромінювані фотони можуть бути в ультрафіолетовій (УФ), видимій або ІЧ-частинах ЕМ-спектру, залежно від ширини забороненої зони напівпровідникового матеріалу. У світлодіодах процес перетворення досить ефективний, що призводить до дуже малого нагрівання порівняно з лампами розжарювання.

Для процесу спонтанної випромінювальної рекомбінації швидкість випромінювання фотона та його довжина хвилі задаються як [1]:

$$I(E = hf) \propto \sqrt{E - E_g} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (1.1)$$

$$\lambda = \frac{hc}{E(eV)} \text{ (мкм)}, \quad (1.2)$$

де $I(E = hf)$ — інтенсивність випромінювання фотонів з енергією $E = hf$;

E_g — енергія забороненої зони напівпровідникового матеріалу;

k — стала Больцмана;

h — стала Планка;

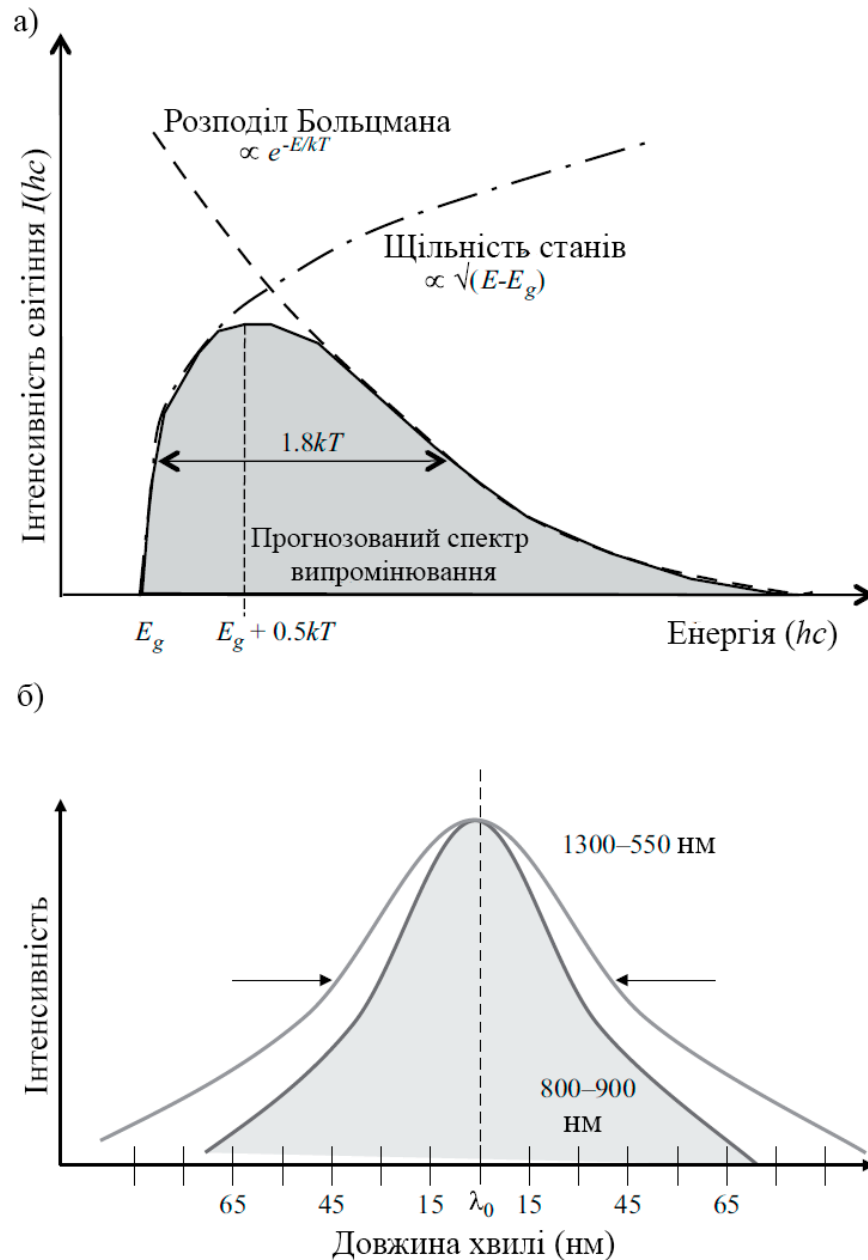
c — швидкість світла у вакуумі;

$E(eV)$ — енергія фотона в електрон-вольтах (eV);

T — абсолютна температура.

Рисунок 1.1 ілюструє інтенсивність люмінесценції як функцію енергії для процесу спонтанного випромінювання. Спонтанне випромінювання має порогову енергію E_g і ширину половинної потужності $1,8kT$, що перетворюється на ширину спектра довжини, що розраховується за формулою [3]:

$$\Delta\lambda = \frac{1,8kT}{hc}. \quad (1.3)$$



- а) інтенсивність люмінесценції як функція енергії для процесу спонтанного випромінювання;
 б) спектральний профіль.

Рисунок 1.1 – Інтенсивність люмінесценції світлодіоду

Типові світлодіоди, що працюють на довжинах хвиль 850 нм і 1300 нм, мають спектральну ширину $\Delta\lambda$ приблизно 60 і 170 відповідно [4]. Більш високі температури викликають зниження енергії забороненої зони. Оскільки

випромінювання енергії фотона прямо пропорційне енергії забороненої зони, це означає, що підвищення температури зменшує пікову енергію фотона.

Є різні типи світлодіодів, кожен тип має відмінні характеристики, які роблять його придатним для конкретного застосування. Різні світлодіоди, їхні властивості та застосування наведено в таблиці 1.1 [5].

Таблиця 1.1 – Характеристики типів світлодіодів.

	Складність	Ефективність	Пропускна здатність	Вартість	Застосування
RGB LED	Помірна	65 лм/Вт	10–20 МГц	Висока	Освітлення
PC-LED	Низька	130 лм/Вт	5–3 МГц	Низька	Освітлення
OLED	Висока	45 лм/Вт	≤ 1 МГц	Найнижча	Дисплеї
μ-LED	Найвища	—	≥ 300 МГц	Висока	Біосенсори

Для реалізації передавачів ОБЗ світлодіоди RGB та світлодіоди із перетворенням люмінофора (PC-LED) є найбільш кращими варіантами для використання одночасно для освітлення та передачі даних в системах ОБЗ, оскільки вони здатні випромінювати світло білого кольору.

Світлодіоди PC-LED створюються з синього чипа з нітриду індій-галію. Випромінювання цього чипа створюється люмінофорним покриттям ітрієвого алюмінієвого гранату. Частина синього світла перетворюється на жовтий сегмент спектру за допомогою покриття люмінофорного шару. Відповідне змішування синього та жовтого світла, що залишилося, дає біле світло. Колірні температури: нейтральний білий, холодний білий і теплий білий, залежать від товщини шару люмінофора. З іншого боку, світлодіоди RGB традиційно складаються з трьох або більше світлодіодних мікросхем, які зазвичай випромінюють червоне, зелене та синє світло. Біле світло створюється, коли довжини хвилі трьох окремих чіпів вибрано та змішано належним чином. Відповідна довжина хвилі для виробництва білого світла становить 625 нм для червоного, 525 нм для зеленого та 470 нм для синього. Через спрощену реалізацію та економічну ефективність PC-світлодіоди, на відміну від світлодіодів RGB, є найбільш переважним типом для створення білого світла.

Тим не менш, вони мають низький час відгуку через люмінофорне покриття, що забезпечує лише вузьку смугу пропускання. Це створює обмеження для зв'язку, оскільки негативно впливає на швидкість модуляції.

Тому світлодіоди RGB більш придатні для зв'язку через їх здатність забезпечувати модуляцію даних за допомогою трьох різних довжин хвиль кольорів. Ця властивість мати більше ніж одну довжину хвилі призводить до загальної пропускної здатності втричі більшої, ніж у однокристального світлодіода. Це досягається за допомогою мультиплексування за довжиною хвилі з використанням схем зсуву кольору і метамерної модуляції. Використання маніпуляції зсуву кольору за своєю суттю формує колірний простір MIMO (багато входів та багато виходів). У 2012 р. було досягнуто швидкості передачі даних 1,2 Гбіт/с і 3,4 Гбіт/с за допомогою світлодіодів RGB [6,7]. Для обох досягнень були використані всі три канали RGB LED. Обидва експерименти проводилися з використанням прийнятної інтенсивності освітлення для людського ока, оскільки світлодіод використовується як для освітлення, так і для зв'язку. Світлодіодні світильники, що використовуються для освітлення, являють собою освітлювальні блоки, які в основному складаються з корпусу, баласту та світлодіодів.

В даний час світлодіоди з люмінофорним перетворенням є найбільш енергоефективними світлодіодами, що забезпечують ефективність понад 130 лм/Вт, і вони, безумовно, є найпоширенішим типом, доступним на даний момент [8].

Світлодіоди можуть працювати з кількома різними струмами приводу, із типовим базовим рівнем від 150 мА до 350 мА, але також зазвичай доступні струми керування > 350 мА (до 1 А або вище). Керування світлодіодами на більш високому рівні струму збільшує світловий потік, але призводить до відповідного зниження ефективності; це явище відоме як падіння ефективності, а також нелінійність потужності та струму. Останнє небажано при передачі даних. Для світлодіодів потрібен драйвер, який складається як з джерела живлення, так і з електронної схеми керування, щоб перетворювати мережеву напругу в низьку напругу та струм зі змінного струму на постійний; він також може включати

додаткову електроніку для затемнення та/або корекції кольору. Доступні на даний момент світлодіодні драйвери зазвичай мають ефективність приблизно на 85% із прогнозованими деякими покращеннями.

Основним фактором у визначенні світлового потоку світлодіода є температура переходу. Зі збільшенням температури процес генерування світла стає менш ефективним із зменшенням люменів, тому потрібна система управління температурою зі світлодіодними лампами. На відміну від драйвера та оптичних втрат, теплові ефекти зазвичай пов'язані зі світлодіодами.

Також можливе використання суперлюмінесцентних діодів (СЛД) – це напівпровідниковий пристрій, який використовується для випромінювання низькокогерентного світла широкого спектру, як СД, але високої яскравості, як ЛД. Світло, що випромінюється у вузькому активному шарі, подібному до ЛД, може ефективно падати на волокно. У СЛД механізм випромінювання такий самий, як у напівпровідникових ЛД та ЧД, які використовують подвійну гетероструктуру для обмеження активної області в умовах високої щільності струму, таким чином забезпечуючи інверсію населеності, щоб джерело могло посилювати світло. Однак у СЛД немає зворотного зв'язку, тому вони виробляють спонтанне випромінювання, яке є потужнішим і має більш чіткий промінь, ніж звичайний світлодіод. Але випромінювання СЛД не є таким монохроматичним, добре спрямованим і когерентним, як випромінювання ЛД. СЛД є чудовими високопотужними широкосмуговими джерелами світла, які ідеально підходять для використання в системах оптичної когерентної томографії та волоконно-оптичних гіроскопах. Робочі довжини хвиль: 830, 1050, 1280, 1310, 1325 і 1550 нм. Робочий струм може досягати 600 мА.

1.2 Приймачі світла

Ще одним елементом, який має важливе значення для реалізації систем ОБЗ, є фотодетектор. Виявлення світла зазвичай досягається за допомогою фотодетекторів, які також відомі як приймачі без зображення. ФД – це оптико-

електронний перетворювач із квадратичною формою, який виявляє та реагує на електромагнітне випромінювання, зокрема світло, яке падає на його поверхню. Вони реагують на електромагнітні сигнали, перетворюючи світлові фотони в струм, пропорційний квадрату прийнятого випромінювання. Крім того, фотодетектування може здійснюватися за допомогою датчиків зображення, які також називаються датчиками камери.

Датчик зображення – це матриця з кількох ФД. Такі датчики є в багатьох існуючих мобільних пристроях, включаючи смартфони. Це дає змогу легко конвертувати мобільні пристрої з датчиками зображення та використовувати їх як приймачі ОБЗ. Потреба в перетворенні обумовлена дуже великою кількістю ФД, що полегшує отримання зображень з високою роздільною здатністю. Наявність багатьох ФД помітно зменшує швидкість, з якою датчик захоплює кадри. Це зменшення, як наслідок, призводить до виділення обмежених швидкостей передачі даних у діапазоні лише кількох кбіт/с для сигналів ОБЗ через низьку частоту дискретизації датчика. На відміну від датчиків зображення, відокремлені датчики без зображення можуть запропонувати більш високу швидкість передачі даних у діапазоні сотень мегабіт за секунду.

В оптичному каналі зв'язку ФД повинен мати точні та безкомпромісні вимоги до продуктивності, оскільки прийнятий оптичний сигнал традиційно слабкий. Зазначені вимоги до продуктивності включають достатню смугу пропускання для задоволення бажаної швидкості передачі даних, дуже низький рівень шуму та дуже високу чутливість у діапазоні довжин хвиль, у якому працює ФД. Подібно до світлодіодів, вплив змін температури фотодіодів повинен бути дуже незначним, і пристрій повинен мати тривалий середній час до відмови. Склад матеріалу детектора визначає робочі довжини хвиль, на яких ФД реагує на світло. Квантова ефективність η_{qe} , яка визначається як відношення електронно-діркових ($e-h$) пар, утворених ФД, до падаючих фотонів протягом заданого часу, визначається за формулою [8]:

$$\eta_{qe} = \frac{\text{вхідні фотони}}{\text{вихідні фотони}} = (1 - R)\xi(1 - e^{-\alpha d}), \quad (1.4)$$

де R – коефіцієнт відбиття на межі розділу повітря і напівпровідника;

ξ – частка пар $e - h$;

α – коефіцієнт поглинання;

d – відстань між передавачем і приймачем.

Найважливіші вимоги до сумісності та продуктивності детекторів мають низку властивостей, у яких вони визначені. По-перше, потрібна велика площа поверхні для забезпечення ширшого поля зору (ПЗ) і великий отвір для збору. У програмах, які вимагають високої швидкості, доцільніше і найкраще мати масиви ФД з невеликою площею поверхні. По-друге, чутливість та швидкість реагування ФД на бажаній довжині хвилі мають бути високими. Ще одна властивість полягає в тому, що ФД повинен мати низький рівень шуму, який, у свою чергу, забезпечує високе співвідношення сигнал/шум. Нарешті, ФД повинен мати швидкий час відгуку, а також високу надійність, малий розмір і низьку вартість. Експлуатаційні характеристики різних ФД наведені в таблиці 1.2 [8].

Таблиця 1.2 – Характеристики продуктивності (типові) для різних ФД

Параметр	Кремній		Германій		Арсенід Галію	
	PIN	ЛФД	PIN	ЛФД	PIN	ЛФД
Діапазон довжин хвиль, нм	400–1100	–	800–1800	–	900–1700	–
Пікова довжина хвилі, нм	900	830	1550	1300	1550	1550
Квантова ефективність (%)	65–90	77	50–55	55–75	60–70	60–70
Посилення	1	150–250	1	5–40	1	10–30
Надлишковий коефіцієнт шуму	–	0,3–0,5	–	0,95–1	–	0,7
Напруга зміщення, -В	45–100	220	6–10	20–35	5	30
Темновий струм, нА	1–10	0,1–1,0	50–500	10–500	1–20	1–5
Ємність, пФ	1,2–3	1,3–2	2–5	2,0–5,0	0,5–2	0,5
Час реакції, нс	0,5–1	0,1–2	0,1–0,5	0,5–0,8	0,06–0,5	0,1–0,5

PIN ФД складається з двох напівпровідникових матеріалів із областями p -типу та n -типу, які відокремлені внутрішньою областю, яка є незначно n -легованою. Щоб він працював, на пристрій прикладається достатньо велика напруга зворотного зсуву. Схема зображена на рисунку 1.2. Для перетворення падаючого фотона в електричний струм енергія падаючого фотона має дорівнювати або перевищувати енергію забороненої зони. Електрон з валентної зони збуджується енергією падаючого фотона в зону провідності; під час цього процесу збудження утворюється електронно-діркова пара. Концентрація падаючого світла за звичайних умов спрямована на збіднену власну область.



Рисунок 1.2 – Схематична діаграма PIN ФД

Після поділу згенерованих носіїв заряду через високе електричне поле в збідненій області заряди накопичуються на переході зі зворотним зміщенням. У свою чергу, цей процес призводить до потоку струму вздовж навантажувального резистора, як показано на рисунку 1.2. Існує один потік електронів для кожної згенерованої пари носіїв.

Верхня гранична довжина хвилі, яка визначається типом використовуваного напівпровідникового матеріалу, зазвичай може бути обчислена за рівнянням 1.2. PIN ФД мають здатність функціонувати на надзвичайно високих бітових швидкостях понад 100 Гбіт/с. Тим не менш, з

огляду на обмеження, пов'язані з упаковкою, пристрої на основі ФД, які доступні на ринку, мають лише смугу пропускання, що не перевищує 20 ГГц [9].

Лавинні фотодетектори відрізняється від PIN PD у тому сенсі, що ЛФД за своєю суттю забезпечує посилення струму за допомогою повторюваного процесу іонізації електронів. Це призводить до підвищеної чутливості пристрою через посилення фотоструму до його зіткнення з тепловим шумом схеми приймача. Таким чином, коефіцієнт підсилення, який впливає на чутливість ЛФД, визначається як [10]:

$$M = \frac{I_T}{I_\phi} = \frac{I_T hc}{\lambda \eta_{qe} q P_r} = \frac{I_T}{\mathcal{R} P_r}, \quad (1.5)$$

де I_T – загальний вихідний фотострум (середній) в ЛФД;

I_ϕ – первинний фотострум (нерозмножений);

q – заряд електрона;

\mathcal{R} – відповідь ФД;

P_r – падаюча середня потужність оптичного випромінювання за період часу;

λ – довжина хвилі.

Значення I_ϕ дорівнює значенню I_T у випадку, коли M дорівнює одиниці, а λ вимірюється в дюймах. \mathcal{R} визначається як:

$$\mathcal{R} = \frac{\lambda q \eta_{qe}}{hc} = \frac{\lambda \eta_{qe}}{1,24}. \quad (1.6)$$

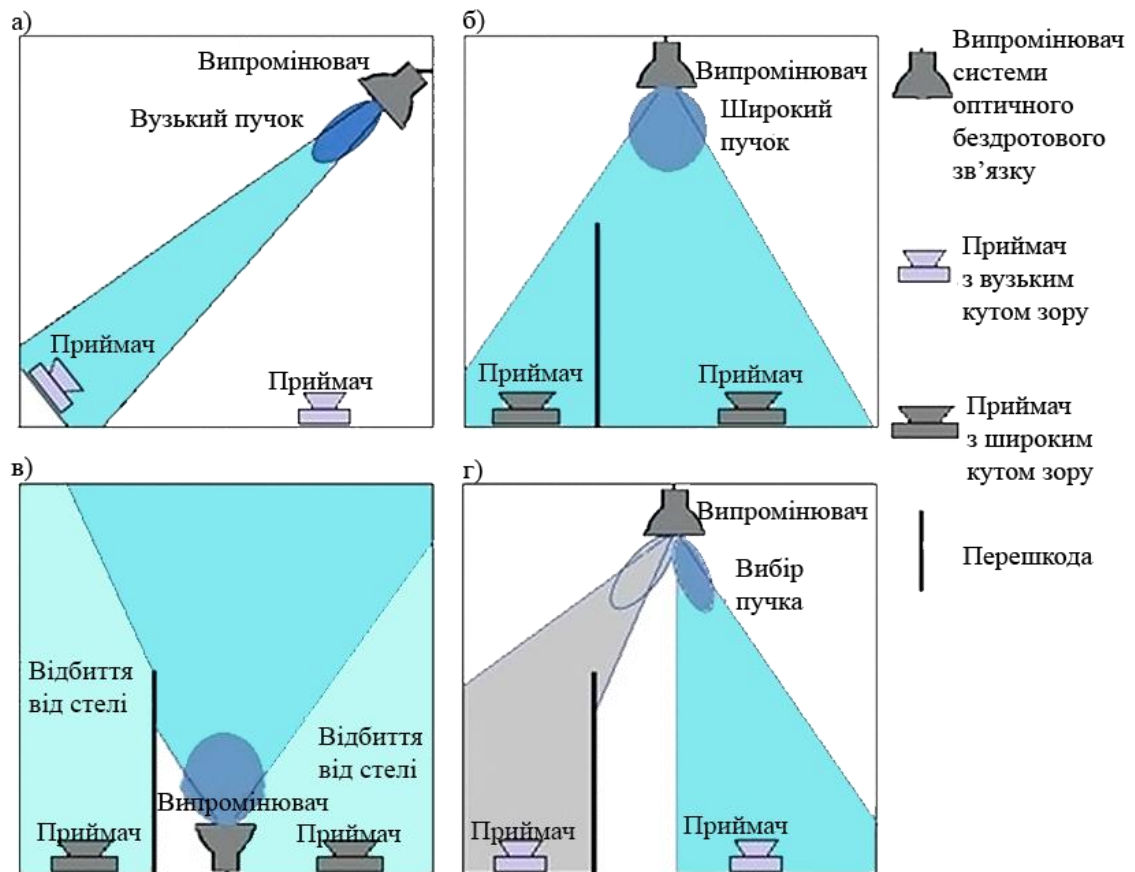
Значення чутливості ЛФД може бути вищим за одиницю, оскільки стандартні значення підсилення знаходяться між 50 і 300. Це означає, що чутливість APD вища, ніж PIN ФД, оскільки PIN ФД має одиничне значення посилення. Однак варто зазначити, що існує усюдисущий шум множення, коли мова йде про ЛФД після процесу іонізації, який має статистичний характер [11]. Крім того, процес іонізації дуже чутливий до температури. Коли ЛФД

використовується в системі ЛФД, доцільно брати до уваги ці фактори, оскільки вони дуже важливі для продуктивності системи.

Таким чином, лавинні фотодіоди можуть успішно використовуватися в системах оптичного бездротового зв'язку за умови подолання технічних обмежень через оптимізацію конструкції та параметрів роботи приймальних пристроїв.

2 МЕТОДИ ОПТИЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Сучасні системи оптичного бездротового зв'язку для приміщень поділяються на видимі та інфрачервоні, відповідно до їхнього спектру. За способом розповсюдження внутрішні конфігурації ОБЗ класифікуються як системи спрямованої видимості, неспрямованої видимості, дифузні та системи з відстежуванням [12]. Графічні ілюстрації для цих конфігурацій показано на рисунку 2.1. Зона покриття оптичними джерелами у різних конфігураціях показана затемненою областю. На рисунку також показана постійна перешкода, щоб показати роль вузьких і широких променів оптичних джерел у досягненні передачі за межами прямої видимості.



а) спрямована видимість; б) неспрямована видимість;

в) дифузна; г) відстежувана.

Рисунок 2.1 – Конфігурації оптичного бездротового зв'язку

2.1 Конфігурації оптичного бездротового зв'язку

Направлена ПВ (рис. 2.1, а) підходить для встановлення каналів зв'язку «точка-точка». Оскільки потужність оптичного сигналу фокусується у вузькому промені, малої потужності випромінювача достатньо, щоб створити достатню потужність на фотодетекторі. Ця конфігурація забезпечує високу швидкість передачі даних і довжину зв'язку від кількох метрів до 5 км. У цій конфігурації використовується приймач із вузьким кутом зору, і вплив навколишнього освітлення менше впливає на продуктивність системи. Однак під час використання мобільних пристроїв потрібне вирівнювання. Ця вимога виконується в ненаправленій конфігурації прямої видимості, яка показана на рис. 2.1, б. Ця система забезпечує гнучку конфігурацію з передавачами широкого пучка променя та приймачами широкого кута зору. Завдяки такій конфігурації канали зв'язку можуть досягти ширшої зони покриття та більшої мобільності, що робить його придатним для програм мовлення. Направлена передача схильна до ефектів блокування та затінення, тоді як ненаправлена забезпечує вирішення цих ефектів.

На рис. 2.1, в представлена дифузна конфігурація, яка підходить для передачі даних з низькою швидкістю. Дифузну конфігурацію можна використовувати як ненаправлену ОБЗ непрямої видимості. Передавач випромінює світло в стелю, що забезпечує випромінювання широкого оптичного променя. Ця конфігурація використовується в локальних однорангових мережах та інфраструктурних мережах. Хоча така передача забезпечує гнучкість і захист від блокування, вона страждатиме від великих втрат. Втрати на шляху збільшуються при тимчасовій перешкоді, яка називається затіненням. Віддзеркалення від стелі, стіни та предметів у кімнаті послаблюють сигнал, що, у свою чергу, спричиняє багатопроменеву дисперсію, яка обмежує максимально досягну невирівняну швидкість передачі даних.

Розсіювання викликає погіршення продуктивності міжсимвольної інтерференції (MI) і збільшення частоти бітових помилок, які є критичними

факторами продуктивності щодо цієї конфігурації. Вимоги до потужності також є високими порівняно з конфігурацією спрямованої передачі прямої видимості.

Остання конфігурація – це відстежувані системи (рис. 2.1, г). У цих системах джерела та детектори встановлюються на стелі за допомогою вузла відстеження. Хоча складність відстежуваних систем є вищою, вони мають нижчі вимоги до потужності, меншу інтерференцію зовнішнього освітлення та знижену МІ, викликану багатопроменевістю. Зменшення МІ зумовлене вузьким променем передачі та прийому. Передавач у цій системі використовує вузький промінь, який концентрує більшу частину переданої енергії в менших кутах променя. Отже, ця система пропонує високу швидкість передачі даних, подібну до конфігурації спрямованої передачі прямої видимості з додатковою можливістю обслуговування великої зони покриття. Разом з цим відсутність МІ дозволяє відстежуваній системі мати вищу швидкість передачі даних. Серед чотирьох згаданих конфігурацій дифузні канали ОБЗ більше підходять для різноманітних застосувань. Це пов'язано з простою вимогою до вирівнювання, несприйнятливістю до блокування та широким охопленням розсіяних відображень. Однак характеристики внутрішнього середовища впливають на роботу всіх конфігурацій. Важливі характеристики внутрішнього середовища включають розмір і модель приміщення, характеристики відбиття середовища, розміщення вікон і дверей, розташування оптичних передавачів і їх параметри [12]. Оптимізація цих функцій може покращити продуктивність систем ОБЗ як в аспектах освітлення, так і в комунікації.

Оскільки внутрішня система ОБЗ включає пряму видимість і шляхи відбиття від стін кімнати, розміри та планування кімнати також є важливими факторами. Застосування ОБЗ у закритих приміщеннях, таких як офісна зона, домашнє середовище та суворі промислові об'єкти, буде змінюватися залежно від розміру та планування приміщення. Коли канали ОБЗ встановлені в цих середовищах, відбиття оптичного сигналу на стінах, підлозі та стелі також суттєво впливає на продуктивність системи. Це видно зі значень відбивної здатності в діапазоні від 0,1 до 0,8 для різних матеріалів, таких як пластикові

стіни, гіпсові стіни, підлоги та стелі [13]. Крім цього, розташування передавачів відіграє велику роль у характеристиках навколишнього середовища. Щоб задовольнити вимогу одночасного освітлення та зв'язку, потрібна оптимізація макетів передавача. І ці характеристики навколишнього середовища слід вибирати належним чином через їхній вплив на параметри продуктивності, пов'язані з каналом, такі як імпульсна характеристика, посилення постійного струму каналу, середньоквадратичний розкид затримки та максимальна досяжна швидкість передачі даних.

Щоб покращити продуктивність, важливо оптимізувати розташування передавача та напівкут на половинній потужності відповідно до конкретного середовища приміщення. Інтеграція систем видимого діапазону з концепціями інтелектуального освітлення, такими як освітлення, орієнтоване на людину, і запланована зайнятість, може принести більшу енергоефективність системам зв'язку [14].

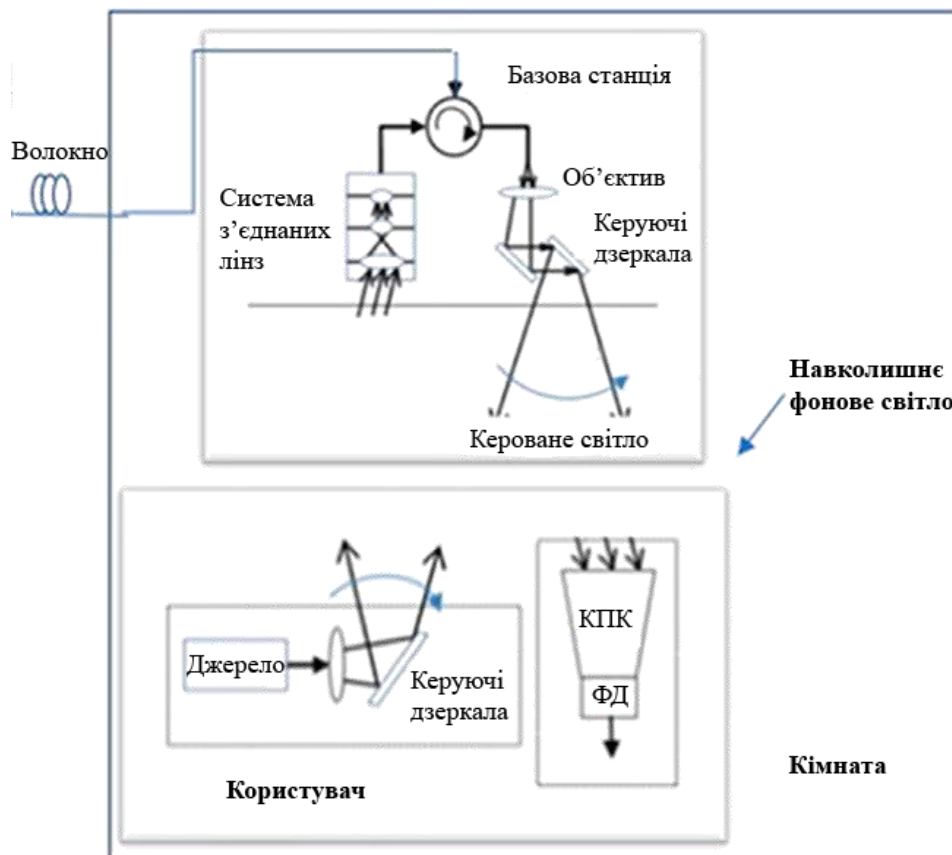
Крім проблем навколишнього середовища, основні фактори шуму, що впливають на продуктивність систем ОБЗ, включають фоновий шум від джерел навколишнього світла та затінення та блокування від перешкод у внутрішній зоні. Точне передбачення поведінки посилянь можна досягти, враховуючи всі ці проблеми в процесі проектування. Оптика, така як голографічні розсіювачі для формування світла, також може бути використана для забезпечення безпечного освітлення та кращого зв'язку системи ОБЗ [15]. Таким чином, систему ОБЗ можна спроектувати так, щоб мати вищу енергоефективність, використовуючи наступні методи: точне моделювання внутрішнього середовища, оптимізація параметрів і компонування передавача, а також включення оптики для покращення освітлення та продуктивності зв'язку.

2.2 Бездротова передача даних в інфрачервоному діапазоні

Інфрачервоний спектр (від 800 нм до 0,1 мм) електро-магнітного випромінювання використовується в інфрачервоних системах ОБЗ. Подібно до

видимого світла, інфрачервоне випромінювання може блокуватися стінами кімнати, тому воно забезпечує безпеку від прослуховування. Він також формує невеликі комірки великої місткості, які можуть обслуговувати кількох користувачів великої місткості. Оскільки інфрачервоне випромінювання невидиме для людського ока, воно також підходить для встановлення висхідної лінії зв'язку, де видима передача має проблеми щодо відблисків і мерехтіння, спричинених формуванням висхідної лінії зв'язку.

Блок-схема систем ІЧ передачі для з'єднання даних в Інтернеті показана на рисунку 2.2. З'єднання для передачі даних можна встановити за допомогою оптоволокна з центрального офісу. Оптоволоконний вихід подається на вузол керування лінзою та променем, який направляє інфрачервоні промені в різні точки кімнати. Ці промені формують ІЧ зв'язки низхідної лінії зв'язку, а PIN фотодіод або лавинний фотодіод виявляє оптичні сигнали в приймачах.



Довжина хвилі для відправлення даних: 1260 - 1360 нм
 Довжина хвилі для прийому даних: 1480 - 1500 нм

Рисунок 2.2 – Схема системи ІЧ ОБЗ

Якість прийому сигналу можна покращити за допомогою фільтрів і складних параболічних концентраторів перед фотодетектором. Вихідна лінія може бути досягнута за допомогою інфрачервоного лазера або світлодіодних джерел, які підключені до пристроїв користувача, а промені висхідної лінії сформовані через керуючі дзеркала. Промені висхідної лінії зв'язуються у волокні, а фотодіод перетворює їх у потоки даних.

У системах ІЧ передачі «пристрій-пристрій» (П2П) кожен пристрій має приймач-передавач, який складається з ІЧ-світлодіодів як передавача та фотодіодів як приймача. Залежно від реалізації вхідні дані для ІЧ систем будуть різними. ІЧ-світлодіоди, присутні в ІЧ трансиверах, передають інфрачервоний промінь, який переносить дані в каналі ОБЗ. Фотодіоди в трансивері пристрою, з яким встановлено зв'язок, отримує та обробляє дані. Поле зору та кут випромінювання відіграють вирішальну роль у встановленні зв'язку для систем П2П.

Специфікації для повного набору бездротових протоколів ІЧ зв'язку стандартизовано через Асоціацію інфрачервоних даних (IrDA). Це було реалізовано в портативних пристроях для коротких відстаней. Стек протоколу IrDA показано разом із рівнями взаємозв'язку відкритих систем на рисунку 2.3. Стандарт IrDA пропонує послуги з різними швидкостями передачі даних, а саме: послідовний інфрачервоний (SIR), середній інфрачервоний (MIR), швидкий інфрачервоний (FIR), дуже швидкий інфрачервоний (VFIR), надшвидкий інфрачервоний (UFIR) та гіга-інфрачервоний (Giga-IR) [16].

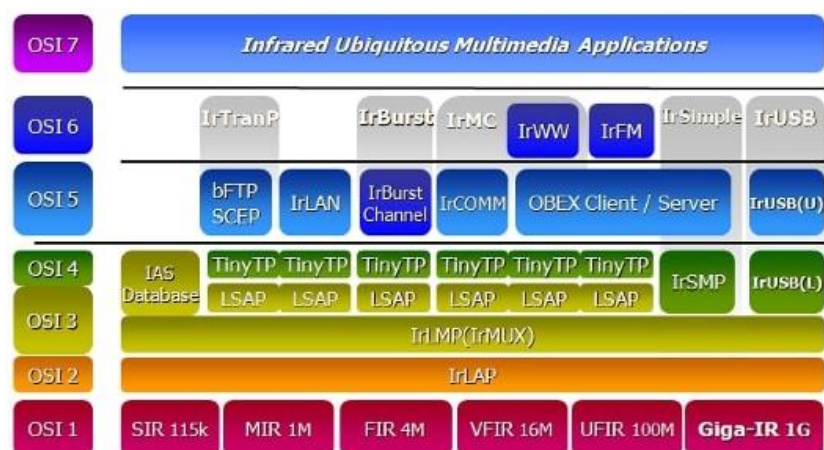


Рисунок 2.3 – Стек протоколів IrDA

2.3 Бездротова передача даних в видимому спектрі

Системи зв'язку, що працюють у видимій області (380 нм–780 нм) електромагнітного спектру, які використовуються для бездротових додатків, називаються системами зв'язку у видимому світлі. Оскільки зв'язок здійснюється через видимий спектр, джерела видимого світла, які використовуються для освітлення, можуть використовуватися як передавачі VLC. Одночасне освітлення та зв'язок системи VLC досягаються за допомогою джерел твердотілого освітлення. Основними такими джерелами, що підтримують VLC, є світлодіоди і лазерні діоди. Щоб забезпечити безпеку системи VLC для очей і шкіри, мають бути дотримані стандарти комфорту, освітленості та комунікацій. Обмеження потужності передачі каналів VLC і смуга модуляції фотодіодів обмежують швидкість передачі даних, яку можна досягти за допомогою систем VLC.

Незважаючи на те, що лазерні діоди виправляють обмежену смугу модуляції світлодіоду, вони не мають широкого використання через їх вплив на око та дуже спрямований характер.

Дослідження та розробки у сфері високошвидкісного та безпечного зв'язку через видиме світло обговорюються VLC консорціумом (VLCC) [17]. Стандартизація виконана за специфікаціями Японської асоціації промисловості електроніки та інформаційних технологій (JEITA) CP-1221, JEITA CP-1222 та JEITA CP-1223 [18]. JEITA використовує технологію модуляції піднесучої, щоб уникнути перешкод.

Бездротовий оптичний зв'язок малої дальності стандартизований IEEE 802.15.7 у 2011 році [19]. Стандарт надає важливого значення сумісності інфраструктури VLC-освітлення та зменшенню навколишнього шуму, щоб дозволити оптичний зв'язок.

Загалом, існують такі рівні: прикладний, контроль доступу до медіа (КДМ) і фізичний. Разом вони створюють архітектуру системи VLC (що складається з передавача та приймача), як показано на рисунку 2.4.

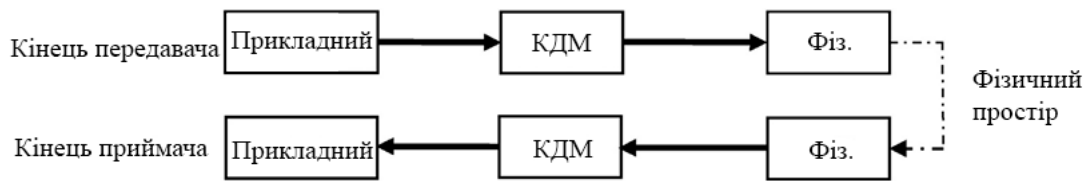


Рисунок 2.4 – Рівні архітектури VLC

Фізичний рівень відіграє важливу роль у досягненні високошвидкісного OWC і на нього впливають оптичні джерела, детектори, а також методи передачі та прийому. Конструкція звичайної VLC системи (фізичний рівень) показана на рисунку 2.5

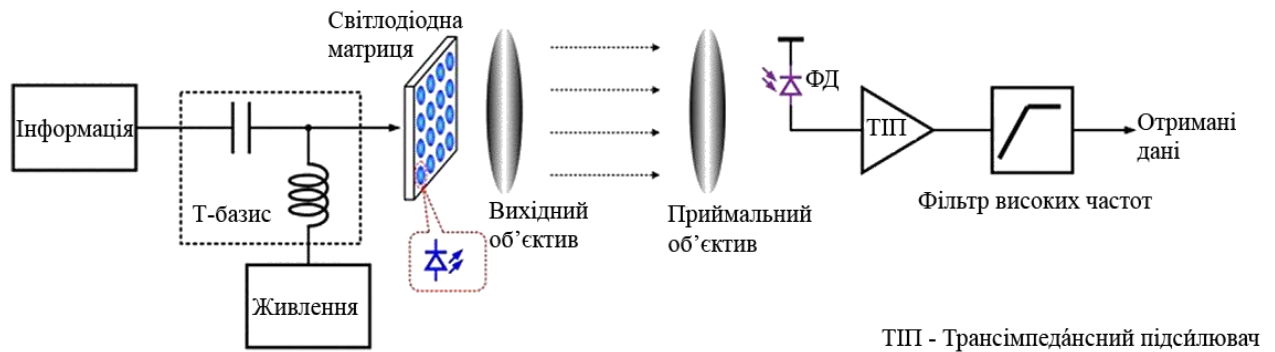


Рисунок 2.5 – Схематичне зображення VLC системи

У цій системі потрібна інформація спочатку перетворюється на цифрову двійкову послідовність, яка потім модулюється в кодері. Далі світлодіодна матриця працює як передавач, який перетворює модульований електричний сигнал в оптичний сигнал. Потім лінза фокусує промінь світла, щоб направити його на фотодетектор. Потім фотодетектор перетворює оптичний сигнал в електричний і посилає його на підсилювач. На стороні приймача після підсилювача розміщено оптичний фільтр для фільтрації будь-яких небажаних сигналів. Посилений реконструйований сигнал остаточно декодується для вилучення переданої інформації. Крім того, швидкість передачі даних у каналі VLC значною мірою залежить від того, як модулюється передавач. Увімкнено-вимкнено (on-off keying, OOK), формат модуляції з однією несучою, є

найпоширенішим з усіх форматів. Це просто вмикання та вимикання передавача в частотному діапазоні від мегагерців до гігагерців для надсилання біта даних 1 або 0. Цей метод прямої модуляції широко використовувався для демонстрації високошвидкісного зв'язку. Інші формати модуляції з однією несучою, такі як імпульсно-амплітудна модуляція (ІАМ) та імпульсно-позиційна модуляція (ІПМ) мають також використовуватися для демонстрації високошвидкісного зв'язку VLC. ІПМ високого порядку є вигідною через її більш високу енергоефективність; однак, спектральна ефективність в ІПМ знижується. ІАМ вирішує проблему спектральної ефективності шляхом компромісу з енергоефективністю. Компромісом між перевагами та недоліками ІАМ і ІПМ є модуляція увімкнено-вимкнено, що робить його більш популярним у порівнянні. Однак в останні роки формат модуляції з кількома несучими, такий як мультиплексування з ортогональним частотним поділом (МОЧП), був досить популярним способом підвищення швидкості передачі даних у каналі VLC. У цьому форматі модуляції дані надсилаються паралельно через ортогональні піднесучі, які можуть модулюватися їх фазою й амплітудою, а саме фазовою маніпуляцією (ФМ) і квадратурною амплітудною модуляцією (КАМ). Залежно від кількості використовуваних піднесучих і порядку КАМ, швидкість передачі даних може бути значно збільшена, але ціною енергоефективності.

Однак звичайну техніку МОЧП не можна використовувати безпосередньо в оптичних системах. У системах ОБЗ метод модуляції інтенсивності з прямим виявленням (МІ/ПВ) є простим, поширеним і недорогим методом модуляції та демодуляції оптичної несучої. Загалом відомо, що вихід традиційного модулятора МОЧП є комплексним і біполярним. В оптичних системах тільки інтенсивність сигналу обмежена як справжня і позитивна. Тому, зазвичай використовується в радіочастотних системах зв'язку, звичайна МОЧП модуляція повинна бути модифікована для використання в системах ОБЗ. Багато існуючих методів модуляції МОЧП підходять для систем МІ/ПВ ОБЗ, в основі яких лежать асиметричне обрізання сигналу, постійна зміщена складова та розділ сигналу на позитивну та негативну частини.

2.4 Класифікація ОБЗ за модуляцією

1. Модуляція інтенсивності з прямим виявленням.

Модуляція інтенсивності означає зміну сили сигналу (інтенсивності світла) для передачі інформації. Пряме виявлення передбачає використання фотодетектора для прямого вимірювання інтенсивності сигналу без потреби в гетеродинному прийомі (без зсуву частоти сигналу).

У моделі системи МІ/ПВ світлодіод випромінює передану оптичну потужність $X(t)$ у канал на кінці передавача. Канал вносить зміни в переданий сигнал, а потім цей оптичний сигнал приймається. На приймачі фотоприймач генерує фотострум $Y(t)$. Математичний вираз, який описує модель системи МІ/ПВ, виглядає як:

$$Y(t) = Kh(t) \otimes X(t) + N(t), \quad (2.1)$$

де $Y(t)$ – фотострум, створюваний фотодетектором;

K – чутливість фотоприймача;

$h(t)$ – імпульсна характеристика каналу;

\otimes – символ згортки;

$X(t)$ – передана оптична потужність;

$N(t)$ – незалежний від сигналу дробовий шум через навколишнє освітлення і власний шум через оптичний сигнал, що несе інформацію.

2. Асиметричне обрізання сигналу (АОС) МОЧП.

У системі АОС-МОЧП символи даних переносяться на всіх піднесучих. У передавачі послідовні входні дані перетворюються з послідовного на паралельний, а потім дані відображаються на комплексні числа за допомогою модуляції КАМ або квадратурна ФМ. Потім властивість Ермітової симетрії застосовується до символів перед зворотним дискретним перетворенням Фур'є (ЗДПФ), щоб отримати реальний сигнал. Цієї симетрії можна досягти, поставивши:

$$X_m = X_{N-m}^* \text{ для } 0 < m < N/2. \quad (2.2)$$

Щоб запобігти будь-якому залишковому компоненту постійного струму або будь-якому зсуву постійного струму в сигналі, $X_0, X_{N/2}$ встановлені на нульові і не несуть жодної інформації, тобто $X_0 = X_{N/2} = 0$, де N – розмір зворотного дискретного перетворення Фур'є, X – комплексний символ, а X^* – комплексно-сполучене значення X символ.

3. Постійна зміщена складова (ПЗС) МОЧП.

У ПЗС-МОЧП символи даних переносяться лише на непарних піднесучих, у той час як парні піднесучі формують сигнал зсуву, який гарантує, що переданий сигнал МОЧП відповідає вимогам невід'ємності. Біполярний сигнал МОЧП обрізається на нульових рівнях, де всі негативні частини біполярного сигналу видаляються. Завдяки процесу відсікання всі компоненти шуму припадають на парні піднесучі, а передані дані передаються на непарних піднесучих без погіршень [12].

У системі ПЗС-МОЧП вхідна частина передавача схожа на передавач АОС-МОЧП. Потім результуючий сигнал перетворюється на цифро-аналоговий сигнал і фільтрується через низькі частоти. Сигнал повинен бути обмежений на нульовому рівні, щоб переконатися, що переданий сигнал є позитивним. Світлодіод можна використовувати як перетворювач електрики в оптику. Отриманий оптичний сигнал передається по оптичному каналу. Дробовий шум, який впливає на сигнал, моделюється як адитивний білий гаусів шум і додається в електричну область. Обробка в приймачі ПЗС-МОЧП подібна до обробки приймача АОС-МОЧП, за винятком того, що в приймачі ПЗС-МОЧП демодуються лише непарні піднесучі, які передають дані, а в АОС-МОЧП усі піднесучі демодуються.

4. Асиметричне обрізання сигналу зі зміщеною складовою (АОСЗС) МОЧП.

АОСЗС-МОЧП розглядає передову техніку, яка зберігає переваги та уникає недоліків двох попередніх оптичних уніполярних методів МОЧП. Воно є

гібридною структурою АОС-МОЧП і ПЗС-МОЧП, де зсув постійного струму додається до частини сигналу, а інша частина сигналу обрізається на нуль. Таким чином, символи ПЗС-МОЧП модулюють непарні піднесучі, тоді як символи АОС-МОЧП модулюють парні піднесучі. Після цього негативні значення, створені ПЗС-МОЧП і АОС-МОЧП, окремо обрізаються до нуля. Потім отримані два невід'ємних сигнали складаються разом і передаються світлодіодом.

5. Розділення МОЧП.

Концепція розділення МОЧП полягає в інвертуванні полярності негативної частини сигналу. Вихід операції ЗДПФ є реальним біполярним сигналом, який можна розкласти на:

$$x(k) = x^+(k) + x^-(k), \quad (2.3)$$

де $x^+(k)$ і $x^-(k)$ є позитивною та негативною частинами біполярного сигналу відповідно. Вони подані як:

$$x^+(k) \begin{cases} x(k) & \text{якщо } x(k) \geq 0, \\ 0 & \text{інакше} \end{cases}, \quad (2.4)$$

$$x^-(k) \begin{cases} x(k) & \text{якщо } x(k) < 0, \\ 0 & \text{інакше} \end{cases},$$

де $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

Ці два компоненти сигналу окремо передаються через два послідовних символи МОЧП. Позитивна частина сигналу $x^+(k)$ передається в першому підкадрі (позитивний підкадр), тоді як перевернута частина $-x^-(k)$ передається в другому підкадрі (негативний підкадр). Після цього до кожного субкадру МОЧП додається циклічний префікс довжиною N ЦП. Негативний субкадр МОЧП затримується на $(N + N)$ ЦП і передається після позитивного субкадру МОЧП. Нарешті, кадри мультиплекуються з усіма позитивними дійсними значеннями [12].

3 МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ ОПТИЧНОГО БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Для проєктування, впровадження та експлуатації ефективних систем оптичного зв'язку необхідно добре розуміти характеристики каналу. Для систем ОБЗ з режимом повного дуплексу багатопроменева інтерференція, інтерференція багатокористувацького доступу, схеми мережі та точні моделі каналів є необхідними для отримання характеристик каналу. Вона виконується за імпульсною характеристикою каналу, яка потім використовується для аналізу ефектів, викликаних каналом спотворень.

Втрати потужності, безпосередньо пов'язані з каналом, можна розділити на два фактори: втрати на оптичному шляху та дисперсія, викликана багатопроменевістю. В оптичному бездротовому каналі розглядаються два типи конфігурацій, як описано в розділі 2. Для спрямованих і відстежуваних конфігурацій не потрібно брати до уваги відбиття, а, отже, втрати на шляху легко розрахувати, знаючи інформацію про розбіжність променя передавача, розмір приймача та відстань між передавачем і приймачем. Однак конфігурація без прямої видимості, також відома як дифузна система (в основному використовується всередині приміщень), використовує відбиття від поверхонь кімнати та меблів. Ці відбиття можна розглядати як небажані сигнали або багатопроменеві спотворення, що ускладнює прогнозування втрати на шляху [8].

Що стосується зовнішнього середовища, атмосферний канал є дуже складним і динамічним, що може впливати на характеристики оптичних променів, що поширюються, таким чином спричиняючи як оптичні втрати, так і коливання амплітуди та фази (переважно через турбулентність). Існує ряд моделей для характеристики статистичної природи атмосферного каналу, і вони будуть розглянуті в цьому розділі.

3.1 Конфігурація прямої видимості

Загалом, всередині системи ОБЗ використовується світлодіод як джерело та фотоприймачі великої площі. Кутовий розподіл діаграми інтенсивності випромінювання моделюється за допомогою узагальненої Ламбертівської інтенсивності випромінювання з таким розподілом:

$$R_0(\phi) = \begin{cases} \frac{(m_l + 1)}{2\pi} \cos^{m_l}(\phi) & \text{для } \phi \in [-\pi/2, \pi/2], \\ 0 & \text{для } \phi \geq \pi/2 \end{cases}, \quad (3.1)$$

де m_l – число моди Ламберта, що виражає спрямованість пучка джерела;
 $\phi = 0$ – кут максимальної потужності випромінювання.

Порядок Ламбертівського випромінювання m_l пов'язаний із напівкутом світлодіоду при половинній потужності $\Phi_{1/2}$ за формулою:

$$m_l = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \Phi_{1/2})}. \quad (3.2)$$

Інтенсивність випромінювання визначається як:

$$S(\phi) = P_t \frac{(m_l + 1)}{2\pi} \cos^{m_l}(\phi), \quad (3.3)$$

де P_t – потужність випромінювання.

Фотодетектор моделюється як активна область, що збирає випромінювання, що падає під кутами ψ менше, ніж поле зору детектора. Ефективна площа збирання детектора визначається за формулою:

$$A_{eff}(\psi) = \begin{cases} A_d \cos \psi & 0 \leq \psi \leq \pi/2 \\ 0 & \psi > \pi/2 \end{cases}. \quad (3.4)$$

Хоча в ідеалі детектор великої площі був би придатним для внутрішнього ОБЗ, щоб зібрати якомога більше енергії, на практиці це спричинило б низку проблем, таких як підвищення вартості виробництва, збільшення ємності переходу і, таким чином, зменшення пропускної здатності приймача та збільшення шуму на його вході. Отже, використання оптичного концентратора є економічно ефективним рішенням для збільшення загальної ефективної площі збору. Оптичний коефіцієнт підсилення ідеального концентратора без зображення з внутрішнім показником заломлення n_i становить:

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n_i^2}{\sin^2 \Psi_c} & 0 \leq \psi \leq \Psi_c, \\ 0 & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (3.5)$$

де $\Psi_c \leq \pi / 2$ – поле зору (FOV).

Згідно з теоремою про постійну яскравість (також відомою як межа Етендю), кут огляду приймача пов'язаний із зоною збору лінзи A_{coll} та зоною фотодетектора як:

$$A_{\text{coll}} \sin \left(\frac{\text{FOV}}{2} \right) \leq A_d. \quad (3.6)$$

З виразу (3.6) очевидно, що посилення концентратора збільшується, коли поле зору зменшується.

Довжина зв'язку в ОБЗ для приміщень відносно мала, а, отже, загасання через поглинання та розсіювання дуже низьке. Враховуючи лінію ОБЗ з джерелом Ламберта, приймачем з оптичним смуговим фільтром передачі $T_s(\psi)$ і концентратором посилення без зображення $g(\psi)$, посилення постійного струму для приймача, розташованого на відстані d і кутом ϕ відносно передавача (рис. 3.1) може бути апроксимоване як [20]:

$$H_{\text{los}}(0) = \begin{cases} \frac{A_d(m_l+1)}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \psi_c. \\ \text{інакше } 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

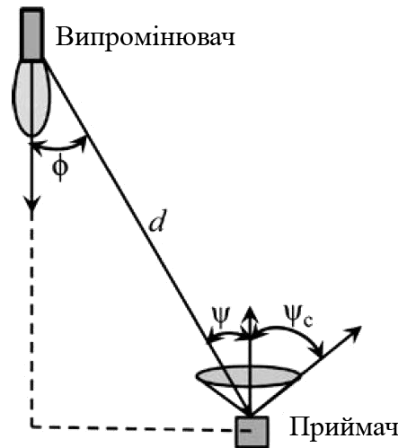


Рисунок 3.1 – Геометрія моделі розповсюдження прямої видимості

Для шляху з прямою видимістю отримана потужність визначається як:

$$P_{r-los} = H_{los}(0)P_t, \quad (3.8)$$

де H_{los} – базова компонента потужності каналу прямої видимості.

У зв'язках на основі прямої видимості, коли передавач і приймач ідеально узгоджені, збільшення сигналу знаходиться за формулою:

$$H_{los}(m_l) = \frac{(m_l+1)}{2} H_{los}, \quad (3.9)$$

де H_{los} відноситься до передавача Ламберта з $m_l = 1$.

Для каналів прямої видимості малої дальності дисперсія багатопроменевого поширення рідко є проблемою, тому його часто моделюють як лінійну систему із загасанням і затримкою [21]. Оптичні канали з прямою видимістю вважаються частотно-неселективними, а втрати на шляху залежать від оберненої до квадрата відстані між передавачем і приймачем, а імпульсна характеристика визначається як:

$$h_{los}(t) = \frac{A_d(m_l+1)}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi \delta\left(t - \frac{d}{c}\right), \quad (3.10)$$

де A_d – площа детектора,

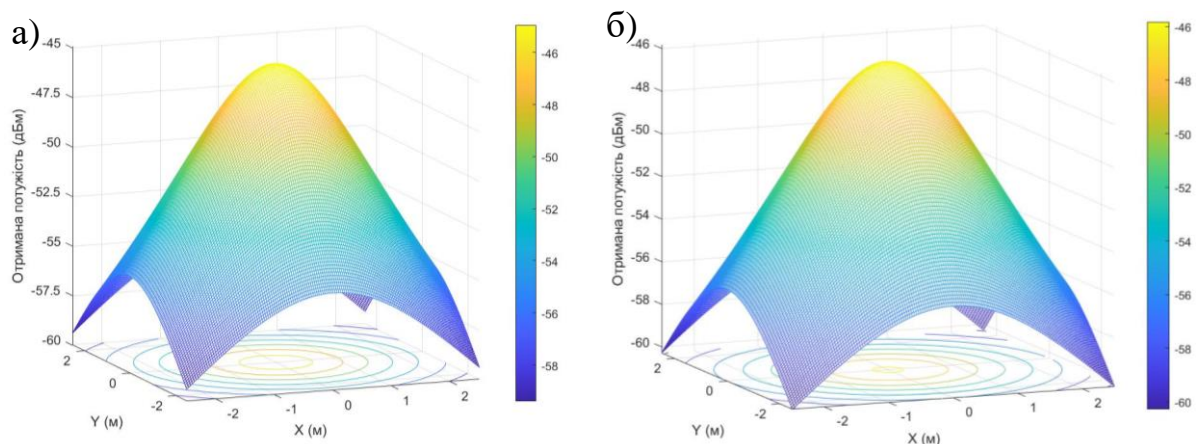
c – швидкість світла у вільному просторі,

$\delta(\cdot)$ – функція Дірака,

$t = d/c$ – затримка поширення сигналу, d – довжина шляху каналу.

Вираз передбачає, що $\phi < 90^\circ$; $\psi <$ кут поля зору і $d \gg \sqrt{A_d}$.

Проведемо моделювання підсилення каналу з прямою видимістю з такими параметрами: розмір кімнати $3 \times 3 \times 2,25$ м³; $\Phi_{1/2} = 70^\circ$; $A_d = 10^{-4}$ м²; $T_s = 1$; $\Psi_c = 50^\circ$ та $\Psi_c = 70^\circ$. Результати зображено на рисунку 3.2.



а) для кута приймача $\Psi_c = 50^\circ$; б) для кута приймача $\Psi_c = 70^\circ$.

Рисунок 3.2 – Імпульсна характеристика

Як і було наведено вище, зменшення кута поля зору приймача призводить до збільшення отриманої потужності.

3.2 Конфігурація непрямой видимості

Для непрямой видимості і дифузних зв'язків передбачити втрати на оптичному шляху складніше, оскільки вони залежать від безлічі факторів, таких як розміри кімнати, відбивна здатність стелі, стін і об'єктів у кімнаті, положення

та орієнтація світла. передавач і приймач, розмір і розташування вікна та інші фізичні питання в кімнаті. Отримана потужність зазвичай визначається як:

$$\begin{aligned} P_{r-nlos} &= (H_{\text{los}}(0) + H_{\text{nlos}}(0))P_t = \\ &= \left(H_{\text{los}}(0) + \sum_{\text{refl}} H_{\text{refl}}(0) \right) P_t, \end{aligned} \quad (3.11)$$

де $H_{\text{refl}}(0)$ – відбитий шлях.

Характеристики відбиття поверхонь об'єктів у кімнаті залежать від кількох факторів, зокрема від довжини хвилі пропускання, матеріалу поверхні, кута падіння θ_i та шорсткості поверхні відносно довжини хвилі. Останнє в основному визначає форму оптичної картини відбиття. Критерій Релея в основному використовується для визначення текстури поверхні. Відповідно до цього критерію поверхню можна вважати гладкою, якщо максимальна висота нерівностей поверхні відповідає наступному:

$$h_{si} < \frac{\lambda}{8 \sinh \theta_i}. \quad (3.12)$$

Щоб передбачити втрати на шляху для непрямой видимості і дифузних каналів, необхідно проаналізувати розподіл оптичної потужності для даної установки. За допомогою оптичного джерела, що складається з кількох елементів, орієнтованих у різних напрямках, можна отримати більш рівномірне покриття на більшій площі, ніж за допомогою одного широкопроменевого оптичного джерела.

Математично імпульсна характеристика оптичного бездротового каналу визначається шляхом інтегрування потужності всіх компонентів, що надходять до приймача після багатопроменевого поширення [22]. Прийнятий сигнал у випадку не-LOS каналів складається з різних компонентів, що надходять з різних шляхів; довжина шляху цих компонентів відрізняється пропорційно дизайну приміщення, а, отже, відбувається розширення імпульсу. Розподіл посилення

каналу в децибелах для компонента LOS відповідає модифікованому гамма-розподілу, а посилення каналу в децибелах для каналів LOS, включаючи всі відбиття, слідує модифікованому розподілу Релея для більшості відстаней передавач-приймач. Середньоквадратичний розкид затримки D_{rms} зазвичай використовується для кількісного визначення властивостей розсіювання часу багатопроменевих каналів і визначається як квадратний корінь з другого центрального моменту квадрата величини імпульсної характеристики каналу [21], який може обчислювати за допомогою наступного виразу:

$$D_{rms} = \left[\frac{\int (t - \mu)^2 h^2(t) dt}{\int h^2(t) dt} \right]^{1/2}, \quad (3.13)$$

де середній розкид затримки μ визначається як:

$$\mu = \frac{\int t h^2(t) dt}{\int h^2(t) dt}. \quad (3.14)$$

Хоча визначення розподілу оптичної потужності в кімнаті є достатнім для основних розрахунків бюджету потужності, воно не дозволяє точно передбачити втрату потужності через багатопроменеве поширення, оскільки численні відбиття не беруться до уваги. Незважаючи на те, що оптична потужність, пов'язана з двома або більше відбиттями, є відносно невеликою, сигнал надходить до приймача набагато пізніше, ніж той, що зазнає лише одного відбиття, а, отже, його не можна ігнорувати, розглядаючи високошвидкісний ненаправлений та дифузний зв'язки. Щоб створити імпульсну відповідь, яка включає відбиття вищого порядку, Баррі та інші [23, 24] розробили алгоритм трасування променів, у якому обчислюються втрати на шляху та час затримки для кожного шляху, що містить задану кількість відбиттів. Потім алгоритм сумує всі внески, щоб отримати загальну імпульсну характеристику. Вони розглядали порожні прямокутні кімнати і припускали, що оптичний приймач спрямований

вертикально до стелі. Враховуючи певне одне джерело $S(x,y,z)$ і приймач $R_x(x,y,z)$ у кімнаті, імпульсну характеристику можна записати як нескінченну суму:

$$h_{\text{nlos}}(t, S, R_x) = \sum_{k=0}^{\infty} h_{\text{nlos}}^{(k)}(t, S, R_x), \quad (3.15)$$

де $h_{\text{nlos}}^{(k)}(t, S, R_x)$ – імпульсна характеристика світла, яке зазнає рівно k відбиттів.

Для кількох джерел K , (3.15) можна замінити на:

$$h_{\text{nlos}}(t, S, R_x) = \sum_i^K \sum_{k=0}^{\infty} h_{\text{nlosk}}^{(k)}(t, S, R_x). \quad (3.16)$$

Імпульсна характеристика після k відбиття $h^{(k)}(t, S, R_x)$ може бути оцінена за допомогою рекурсивного алгоритму, як наведено в [21,22]:

$$h_{\text{nlos}}(t, S, R_x) = \frac{m_l + 1}{2\pi} \sum_{j=1}^K \rho_j \cos^{m_l}(\phi_j) \frac{\cos(\psi)}{d_{sj}^2} \text{rect}\left(\frac{2\psi}{\pi}\right) h_{\text{nlos}}^{(k-1)}\left(t - \frac{d_{sj}}{c}, S, R_x\right) \Delta A, \quad (3.17)$$

де ΔA – площа відбиваючих елементів,

K – загальна кількість відбиваючих елементів у приміщенні,

ρ_j – коефіцієнт відбиття j ,

d_{sj} – відстань від S до j ,

$h^{(k-1)}(t, S, R_x)$ – імпульсна характеристика порядку $k - 1$ між відбивачем j і приймачем R_x .

Оскільки $\|h^{(k)}(t, S, R_x)\| \rightarrow 0, k \rightarrow \infty$, імпульсну характеристику можна оцінити з урахуванням лише першого відбиття. Використовуючи рекурсивний алгоритм або ітераційні методи та враховуючи лише кількість відбиттів до 10, можна отримати відмінну апроксимацію каналу.

Для оцінки перших дифузних відображень поверхні приміщення поділяють на k відбиваючих елементів з площею ΔA . Канал можна описати двома компонентами: 1) у першому компоненті кожен елемент поверхні з площею ΔA розглядається як приймач; 2) кожен елемент розглядається як точкове джерело, яке повторно випромінює зібране світло, масштабоване за коефіцієнтом відбиття ρ_j . Таким чином, імпульсна характеристика каналу після одного відбиття (рис. 3.3) може бути апроксимована як:

$$h_{\text{nlос}}^1(t, S, R_x) = \sum_{j=1}^{\mathfrak{R}} \frac{(m_l + 1) \rho_j A_d \Delta A}{2\pi d_{Sj}^2 d_{Rj}^2} \cos^{m_l}(\phi_{Sj}) \cos(\psi_{Sj}) \cos(\psi_{Rj}) \delta\left(t - \frac{d_{Sj} + d_{Rj}}{c}\right). \quad (3.18)$$

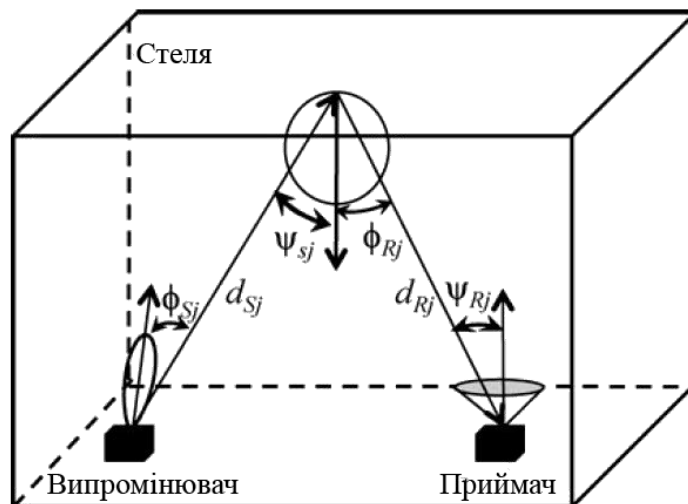


Рисунок 3.3 – Геометрія, яка використовується для опису моделі поширення одинарного відбиття

Використовуючи параметри, наведені в таблиці 3.1, коли передавач розташований на стелі, кути орієнтації передавача та приймача виражаються азимутом і кутом підйому. Імпульсні характеристики лінії з непрямою видимістю і перше розсіяне відбиття показані на рисунку 3.4 відповідно.

Таблиця 3.1 – Параметри моделювання

	Параметр	Значення
	Розмір кімнати	$5 \times 5 \times 2,25 \text{ м}^3$
	Коефіцієнт відбиття від поверхонь ρ	0,8
Джерело	Розташування (x,y,z)	2,5; 2,5; 2,25
	Порядок Ламберта	1
	Кут піднесення	-90°
	Кут азимуту	0°
	Потужність	1 Вт
Приймач	Розташування (x,y,z)	1,5; 1,5; 0
	Активна площа A_d	1 см^2
	Напівкут поля зору	60°
	Кут піднесення	90°
	Кут азимуту	0°
	Δt	0,5 нс

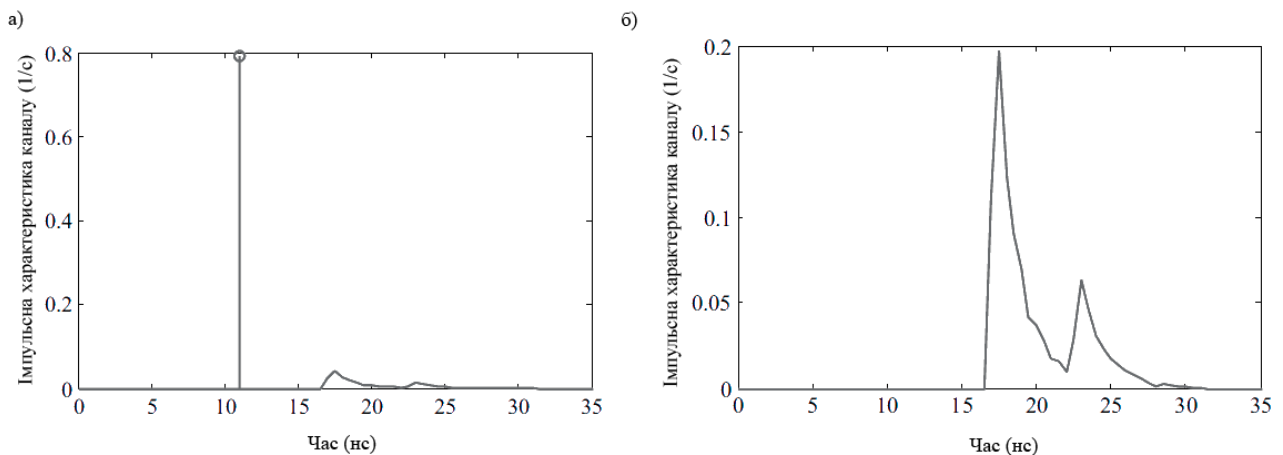


Рисунок 3.4 - Імпульсні характеристики розсіяної лінії зв'язку: а) зі шляхом прямої видимості, б) зі шляхом непрямой видимості

Результати моделювання наведено на рисунку 3.5. Модель застосовна для конкретної конфігурації приміщення і не враховує затінення, блокування та розташування меблів. Конфігурація ОБЗ з затіненням демонструватиме вищі втрати на шляху, розкид середньоквадратичної затримки та втрату потужності, порівняно з незатіненою прямою видимістю.

Крім того, мобільність каналів також є основною проблемою, яка потребує вирішення. Щоб подолати ефект затінення та покращити продуктивність зв'язку, можна використовувати схему без прямої видимості, яка використовує багатоточкову дифузну конфігурацію та приймає з кількома вузькими приймальними елементами поля зору, що використовують кутове рознесення. Ефективність моделювання покращується за допомогою процедур «аглотинації із затримкою часу» та «індексованих у часі та просторі таблиць»

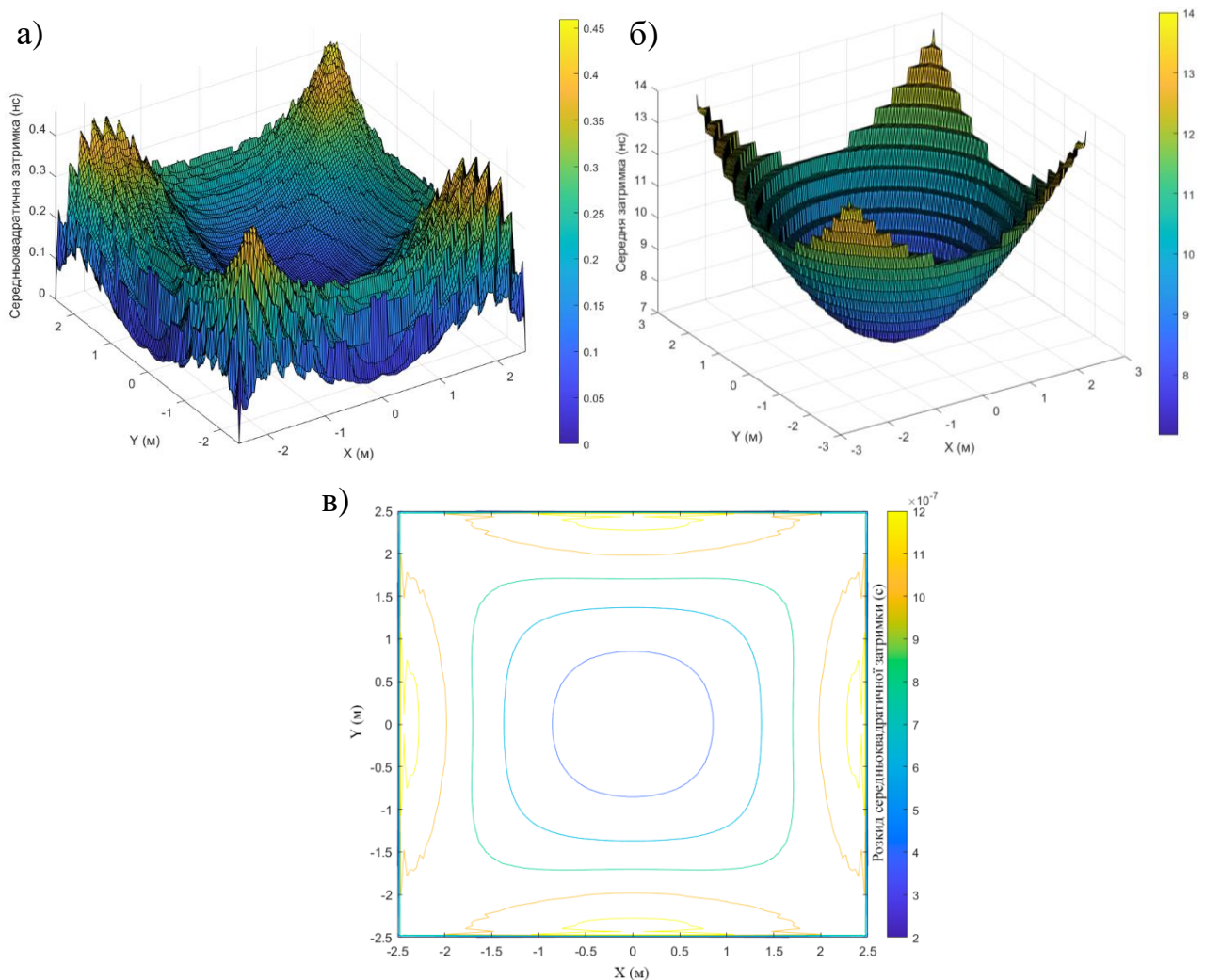


Рисунок 3.5 – Розкид а) середньоквадратичної затримки, б) середньої затримки, в) середньоквадратичної затримки без спрямованої видимості (контурний графік)

Практична характеристика каналу була проведена Каном та іншими [23] шляхом вимірювання частотних характеристик каналу в діапазоні частот 2-300 МГц за допомогою методу частотної розгортки. На основі цих вимірювань були обчислені імпульсні характеристики, втрати на шляху та середньоквадратичні розкиди затримки. Були розглянуті як LOS, так і дифузна конфігурація з використанням різних місць розташування приймачів у п'яти різних кімнатах, що дало в цілому близько 100 різних каналів.

3.3 Моделювання системи з чотирма джерелами

Оскільки світлодіоди можуть використовуватися для різноманітних пропозицій освітлення, передачі даних, локалізації в приміщенні та зондування, необхідно визначити інтенсивність світла та оптичну потужність, що передається. Сила світла використовується для вираження яскравості світлодіоду і визначається як відношення світлового потоку на тілесний кут:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}, \quad (3.17)$$

де Ω – просторовий кут;

Φ – світловий потік, який можна розрахувати з потоку енергії Φ_e [21]:

$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda, \quad (3.18)$$

де $V(\lambda)$ – стандартна крива світності;

K_m – максимальна видимість, яка становить ~ 683 лм/Вт на довжині хвилі 555 нм.

Оптична потужність передачі P_t , яка вказує на загальну енергію, випромінювану світлодіодом визначається як:

$$P_t = K_m \int_{\Lambda_{\min}}^{\Lambda_{\max}} \int_0^{2\pi} \Phi_e d\theta d\lambda, \quad (3.19)$$

де Λ_{\min} і Λ_{\max} визначаються з кривої чутливості ФД.

На рисунку 3.6 зображено офісне середовище з освітлювальними панелями на основі світлодіодів, які забезпечують бездротове підключення до користувачів. У цьому сценарії домінуючим режимом передачі є пряма видимість. Припускаючи Ламбертівську діаграму спрямованості світлодіодів, інтенсивність випромінювання на поверхні столу визначається як:

$$I(\varnothing) = I(0) \frac{m_l + 1}{2\pi} \cos^{m_l}, \quad (3.20)$$

де \varnothing – кут опромінення відносно осі, перпендикулярної до поверхні передавача,

$I(0)$ – центральна інтенсивність світла,

m_l – порядок Ламбертівського випромінювання, який є мірою спрямованості світлового променя.

Для шляху прямої видимості горизонтальна освітленість/інтенсивність у точці (x, y, z) і отримана потужність на приймачі розраховуються за формулами:

$$I_{\text{hor}} = I(0) \cos^{m_l}(\varnothing) / d^2 \cos(\psi) \quad (3.21)$$

$$P_r = P_t \frac{(m_l + 1) A_{PD}}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\varnothing) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \quad 0 \leq \psi \leq \psi_{\text{con}}, \quad (3.22)$$

де ψ – кут падіння відносно осі, нормалі до поверхні приймача,

$T_s(\psi)$ – коефіцієнт пропускання фільтра,

$g(\psi)$ і ψ_{con} – підсилення та поле зору концентратора відповідно,

d – це відстань між світлодіодом і площею поверхні СД і ФД.

Для непрямих або розсіяних шляхів світло має спочатку потрапити на поверхню, що відбиває (у цьому випадку на стіну або інші тверді об'єкти в кімнаті), а потім досягти ФД (рис. 3.6). Таким чином, необхідно брати до уваги відбивну здатність поверхні або який відсоток падаючого світла відбивається назад і вловлюється ФД. Ввідбиття від поверхонь також можна вважати такими,

що мають Ламбертівський візерунок і мають кінцеву площу dA_r . Отже, освітленість від дифузного шляху визначається за формулою [8]:

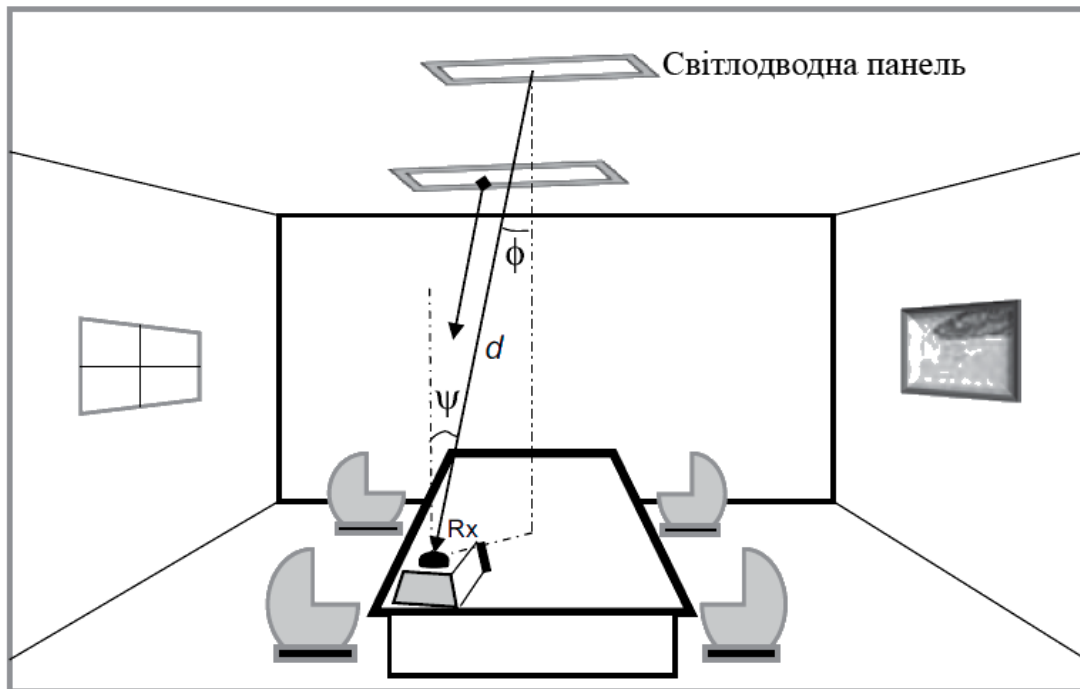


Рисунок 3.6 – Освітлення світлодіодами

$$dD = \rho \frac{m_l + 1}{2\pi^2} \frac{I \cos^{m_l}(\varphi) \cos(\alpha) \cos(\beta) \cos(\psi)}{d_1^2 d_2^2} dA_r, \quad (3.23)$$

де d_1 і d_2 – відстані між світлодіодом і відбиваючою точкою, а також між відбиваючою точкою і ФД відповідно,

ρ – коефіцієнт відбиття,

α і β – кут падіння до точки відбиття та кут падіння до приймача відповідно.

Таким чином, для дифузного каналу загальна освітленість визначається інтегруванням по всій площі відбивної поверхні та підсумовуванням усіх світлодіодних джерел, що визначається як:

$$E_{\text{horDiffuse}} = \sum_i \int_{\text{wall}} dD_i, \quad (3.24)$$

де i – індекс світлодіоду.

Щоб визначити відскоки вищого порядку, можна застосувати рекурсивну операцію, яка задається формулою:

$$dD_b = \int_{\text{wall}} \frac{dD_{k-1}}{\pi d^2} \rho \cos(\beta) \cos(\psi), \quad (3.25)$$

де k – порядок відбиття.

Справжні відбиття містять як дзеркальні, так і дифузійні механізми, однак експериментальна оцінка матеріалів, таких як гіпсові стіни, стіни з акустичною плиткою, килими та нелаковані дерев'яні поверхні, показала, що вони можуть бути добре наближені до відбивачів Ламберта [25]. В більшості систем ОБЗ із непрямою видимістю часто враховується лише перше відбиття, а відбиття вищого порядку ігноруються, оскільки їхній внесок є незначним.

У системі ОБЗ з одним джерелом використання світлодіоду з широким кутом розбіжності є зручним способом досягнення широкого покриття. Однак великі кути розбіжності можуть призвести до збільшення міжсимвольної інтерференції, спричиненої багатопроменевістю, таким чином значно обмежуючи максимальну швидкість передачі даних. Щоб подолати цю проблему та досягти вищої швидкості передачі даних, а також для більш рівномірного розподілу оптичної потужності, кути розбіжності світлодіодів потрібно вибирати обережно. На рис. 3.7 показана принципова діаграма розподіленої світлодіодної матриці (або кількох джерел) для застосування всередині приміщень. Тут кожен окремий світлодіод можна розглядати як точкове джерело світла, і тому діаграму випромінювання кожного світлодіоду можна розглядати як функцію тілесного кута в тривимірному просторі з чітко визначеним слідом випромінювання. Для кожної комірки, показаної на рис. 3.7, отримана оптична потужність є максимальною при $\varphi = 0$ і мінімальною при $\varphi = \varphi_{\text{Max}}$, які визначаються за формулами:

$$P_{r-\text{Max}} = P_t \frac{(m_l+1)A_{PD}}{2\pi H^2} T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), 0 \leq \psi \leq \psi_{\text{con}}, \quad (3.26)$$

$$P_{r-\text{Min}} = P_t \frac{(m_l+1)A_{PD}}{2\pi d_{\text{Max}}^2} \cos^{m_l}(\phi_{\text{Max}}) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), 0 \leq \psi \leq \psi_{\text{con}}, \quad (3.27)$$

де ϕ_{Max} – максимальний кут опромінення,

d_{Max} – відповідна максимальна відстань між передавачем і приймачем у кімнаті. P_{Min} змінюється залежно від m_l .

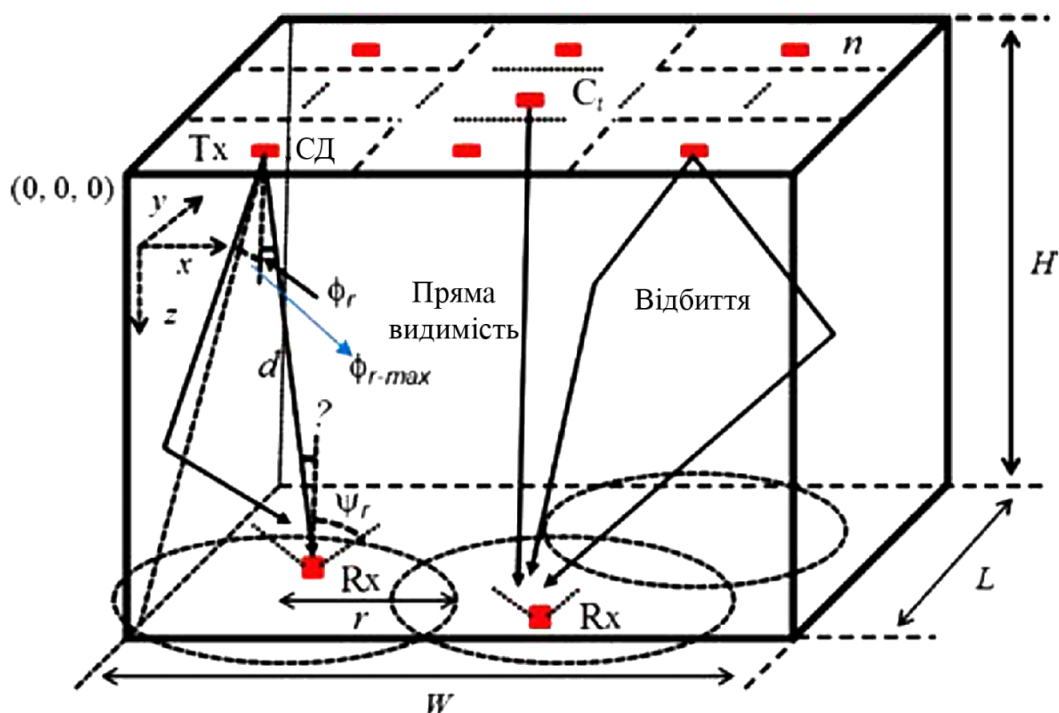


Рисунок 3.7 – Схематичне зображення кімнати зі світлодіодною матрицею

Щоб збільшити P_{Min} , що є мінімальною прийнятою оптичною потужністю на рівні підлоги, її слід максимізувати як функцію m_l за формулою:

$$\frac{\partial P_{r-\text{Min}}}{\partial m_l} = K \cos^{m_l}(\phi_{\text{Max}}) \{1 + (m_l + 1) \ln(\cos(\phi_{\text{Max}}))\}, \quad (3.28)$$

де параметр $K = P_{\text{Tx}} T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \frac{A_{PD}}{2\pi d_{\text{Max}}^2}$ не залежить від m_l .

Отримана оптична потужність на краю комірки має максимальне значення для $\frac{\partial P_{r-Min}}{\partial m} = 0$. Таким чином, оптимальний Ламбертівський порядок задається формулами:

$$m_{l-опт} = \frac{-1}{\ln(\cos(\phi_{Max}))} - 1, \quad (3.29)$$

$$\phi_{Max} = \cos^{-1} \left(\frac{H}{d_{Max}} \right). \quad (3.30)$$

Таким чином, можна розрахувати оптимальний напівкут передавача $\psi_{1/2\text{opt}}$ у точці половинної потужності, який визначається за формулою:

$$\psi_{1/2\text{opt}} = \cos^{-1} \left(\exp \left(\frac{\frac{-\ln(2)}{-1}}{\frac{-1}{\ln(\cos(\phi_{Max}))} - 1} \right) \right) \quad 0 < \psi_{1/2\text{opt}} < 90^\circ \quad (3.31)$$

Коли всі світлодіоди повністю ввімкнено, розподіл освітленості, що створюється на рівні підлоги, називається основним шаблоном освітлення, визначеним у термінах тілесного кута Θ як:

$$f_{A-LED}(x, y; d) = \frac{f(\Theta)}{(x^2 + y^2 + d^2)}. \quad (3.32)$$

Щоб визначити загальну горизонтальну освітленість у точці $P(x,y)$ від шляху прямої видимості для багатоматричного світлодіоду, слід враховувати всі внески від кожного світлодіоду (тобто підсумовування всієї освітленості). розподілені світлодіодні матриці з кількома джерелами мають більш практичний характер з двох причин: по-перше, більшість кімнат використовують кілька джерел світла для забезпечення достатнього освітлення та по-друге, пропонують просторову різноманітність таким чином уникаючи блокування та тіні. Однак, як і в розсіяних каналах ОБЗ, численні джерела страждатимуть від міжсимвольної інтерференції, спричиненої багатопрореневістю, особливо на вищих швидкостях передачі даних, що обмежуватиме максимально досягну передачу даних у

даному внутрішньому середовищі. Існує кілька варіантів подолання цієї проблеми. Наприклад, зміна схеми джерела світла, зменшення поля огляду приймача, застосування методів кодування та вирівнювання, а також використання схем мультиплексування.

Таблиця 3.2 показує ключові параметри для типового середовища кімнати, які можна використовувати в моделюванні системи ОБЗ. Максимальне значення світлового потоку 568,10 лк спостерігається в центрі кімнати. Для чотирьох світлодіодів із напівкутом 70° розподіл освітленості зображено на рис. 3.8, показуючи значення в діапазоні від 315 лк до 910 лк із середнім значенням 717 лк.

Таблиця 3.2 – Параметри моделювання ОБЗ у видимому світлі.

	Параметр	Значення
	Розмір кімнати	$5 \times 5 \times 2,25 \text{ м}^3$
	Коефіцієнт відбиття від поверхонь	0,8
Джерело	Розташування (x,y,z) (4 світлодіоди)	1,25; 1,25; 2,25 1,25; 3,75; 2,25 3,75; 1,25; 2,25 3,75; 3,75; 2,25
	Напівкут на половині потужності	70
	Кількість світлодіодів на масив	60×60 (3600)
	Центральна сила світла	300–910 лк
	Потужність (кожного світлодіода)	20 мВт
Приймач	Отримана площа над підлогою	$0,85 \text{ м}^2$
	Активна площа A_d	1 см^2
	Напівкут поля зору	60°
	Кут піднесення	90°
	Кут азимуту	0°
	Δt	0,5 нс
Оптичний фільтр	Підсилення	1
Об'єктив на ФД	Показник заломлення	1,5

Розподіл оптичної потужності в площині приймача для прямої видимості (без урахування відбиття стін) показано на рис. 3.9, а. В центрі спостерігається майже рівномірний розподіл оптичної потужності з максимальним і мінімальним

рівнями потужності 2,3 дБм і -2,3 дБм відповідно. Розподіл оптичної потужності в площині приймача з напівкутом $12,5^\circ$ зображено на рис. 3.9, б.

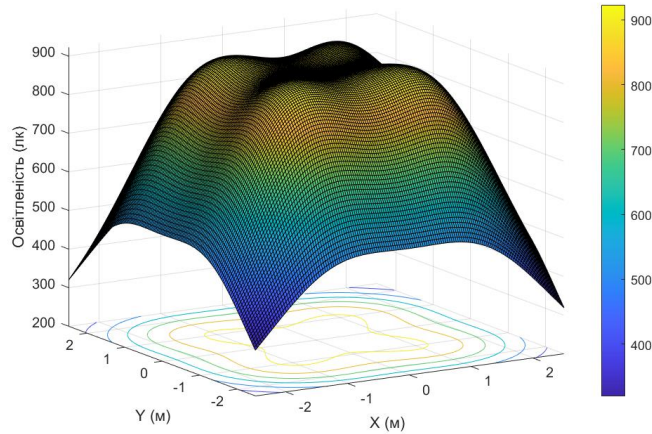
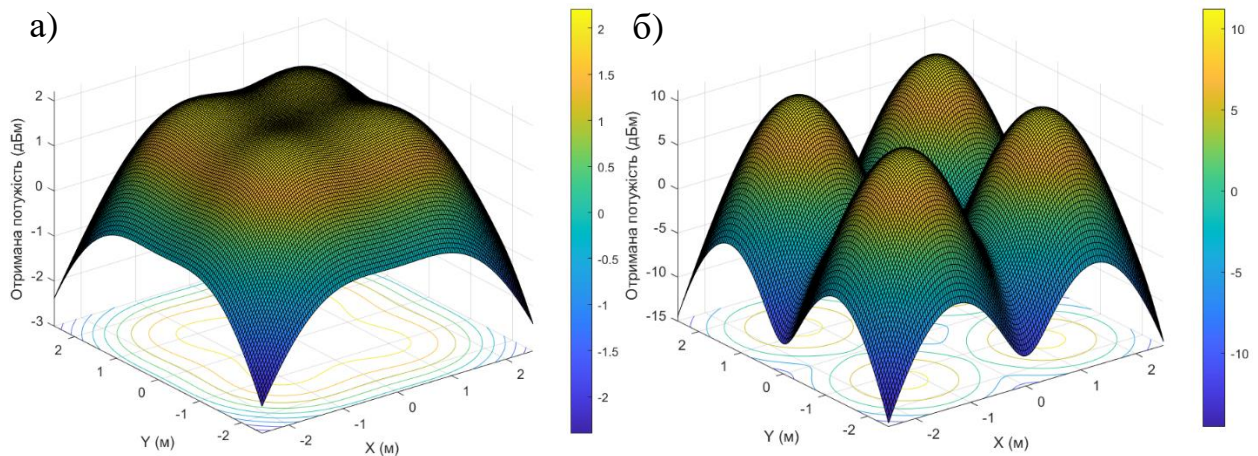


Рисунок 3.8 – Розподіл освітленості для чотирьох передавачів



а) $\psi_{1/2opt} = 70^\circ$; б) $\psi_{1/2opt} = 12,5^\circ$

Рисунок 3.9 – Розподіл оптичної потужності в отриманій оптичній площині залежно від напівкута половини потужності

Різниця між мінімальним і максимальним рівнем оптичної потужності становить більше 35 дБ, що призводить до високого співвідношення сигнал/шум у деяких областях і мертвих зон у багатьох областях. Щоб забезпечити рівномірний розподіл електроенергії по всій кімнаті, можна використовувати голографічний світлоформуєчий дифузор. Отримана оптична потужність у

точці як для прямого, так і для відбитого шляху першого порядку знаходиться за формулою:

$$P_r = \sum^{N_{\text{сд}}} \left\{ P_t H_{\text{dir}}(0) + \int_{\text{Відбиття}} P_t dH_{\text{ref}}(0) \right\}, \quad (3.33)$$

де $N_{\text{сд}}$ - число світлодіодів.

Для багатопроменевого сценарію загальна отримана потужність визначається як:

$$P_{rT} = \sum_{i=1}^M P_{dir,i} + \sum_{j=1}^N P_{ref,j}, \quad (3.34)$$

де M і N представляють кількість прямих шляхів від передавачів до конкретного приймача та шляхів відбиття до того самого приймача,

$P_{dir,i}$ – це отримана оптична потужність з i -го прямого шляху,

$P_{ref,j}$ – отримана оптична потужність від j -го відбитого шляху.

Багатопроменеву часову дисперсію імпульсної характеристики можна виразити через середньоквадратичний розкид затримки. Це забезпечить добру оцінку того, наскільки канал сприйнятливий до міжсимвольної інтерференції:

$$D_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} (t - \tau_0) h^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt}}, \quad (3.35)$$

де середня затримка τ_0 виражається формулою [8]:

$$\tau_0 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t h^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt}. \quad (3.36)$$

Середня надлишкова затримка визначається як [24]:

$$\mu = \frac{(\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i} + \sum_{j=1}^N P_{ref,j} t_{ref,j})}{P_{rT}} \quad (3.37)$$

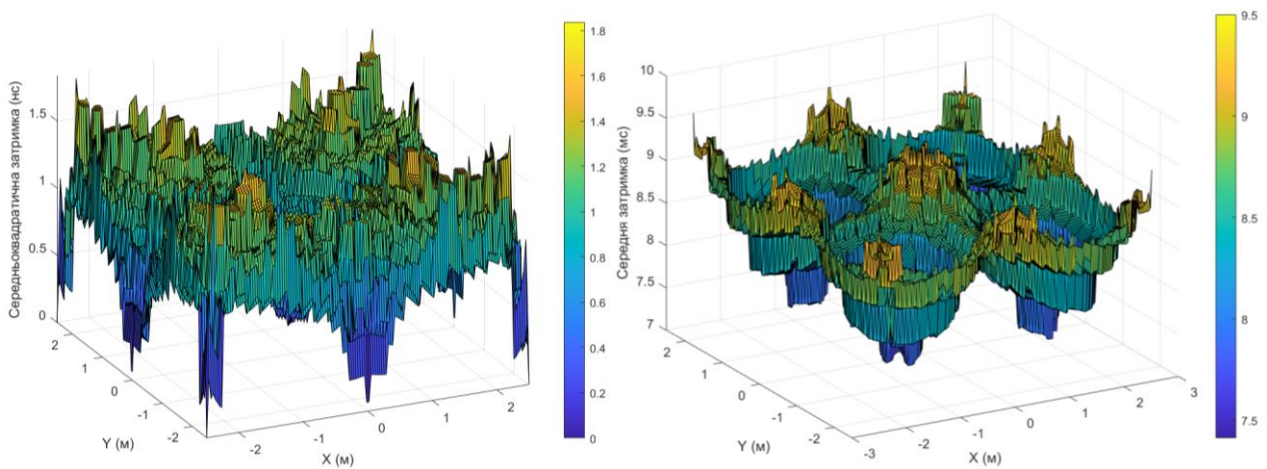
Розкид середньоквадратичної затримки також можна визначити як:

$$D_{RMS} = \sqrt{\mu^2 - (\mu)^2}, \quad (3.38)$$

де

$$\mu^2 = \frac{(\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i}^2 + \sum_{j=1}^N P_{ref,j} t_{ref,j}^2)}{P_{rT}} \quad (3.39)$$

Проведемо моделювання середньої надлишкової затримки та середньоквадратичної затримки. Порівняємо розподіл для 4 СД з моделюванням для 1 СД. На рис. 3.10, а розподіл середньоквадратичного розкиду затримки для одного передавача показує максимальне та середнє значення 0,4597 нс і 0,2053 нс, відповідно. Для чотирьох передавачів (рис. 3.10, а) максимальне та середнє значення складають 1,8284 нс та 1,096 нс відповідно. Середня затримка при цьому збільшується не на багато – на 1,



а) середньоквадратична затримка; б) середня затримка.

Рисунок 3.10 – Розподіл середньоквадратичного розкиду затримки

Отже, максимально допустима швидкість передачі даних через оптичний канал із застосуванням модуляції увімкнено-вимкнено без повернення до 0, без необхідності вирівнювання, задається формулою:

$$R_b \leq \frac{1}{10D_{RMS}}. \quad (3.40)$$

3.4 Порівняльна характеристика методів оптичної комунікації

Для справедливого порівняння різних схем модуляції за різних умов каналу можна прийняти два ключові показники ефективності, які визначено нижче:

1) нормована потреба в оптичній потужності (НПОП): визначається шляхом нормалізації оптичної потужності, необхідної для досягнення бажаної ймовірності помилки біта/слота ξ в каналі, що створює перешкоди, із системою ООК на R_b зі швидкістю 1 Мбіт/с в ідеальному каналі адитивного білого гаусівського шуму (АБГШ) без перешкод;

2) падіння оптичної потужності (ПОП): Визначається шляхом нормалізації оптичної потужності, необхідної для досягнення ξ в інтерференційному каналі, відносно оптичної потужності ідеального каналу АБГШ (інші системні параметри, такі як тип модуляції, швидкість передачі даних залишаються незмінними).

Щоб змодельовати їх, можна зробити ряд припущень:

1) з частотою перемикання 37,5 кГц існує 750 циклів високочастотної складової на цикл низькочастотної складової, а, отже, низькочастотну складову можна вважати зміщенням, яке є постійним протягом тривалості однієї високочастотної складової. Таким чином, замість оцінки всіх 750 значень зміщення можна використовувати єдине зміщення, яке дорівнює середньоквадратичному значенню низькочастотної складової сигналу перешкоди, взятому за один повний цикл, тобто 20 мс. Це призводить до генерації двох нових сигналів перешкод (тобто, однієї високої частоти зі

зміщенням і однієї високої частоти без зміщення). Для кожного бітового інтервалу розраховується ймовірність помилки для обох сигналів, а потім береться середнє значення, що призводить до значного скорочення часу обчислення, оскільки для оцінки ймовірності помилки враховується лише один високочастотний цикл;

2) всіх симуляціях, проведені у цьому розділі, фактично змодельовані низько- та високочастотні перешкоди додаються до потрібного сигналу даних. Однак тривалість змодельованого сигналу може бути набагато коротшою, ніж один повний цикл низькочастотної складової. Кожне моделювання, таким чином, починається з деякої випадкової точки в межах низькочастотного циклу;

3) імовірність помилки 10^{-6} використовується в усіх аналізах ПОП і НПОП надалі [8].

Моделювання ефекту інтерференції люмінесцентного світла (ІЛС) в неперервній до нуля ООК модуляції наведено на рисунку 3.11.

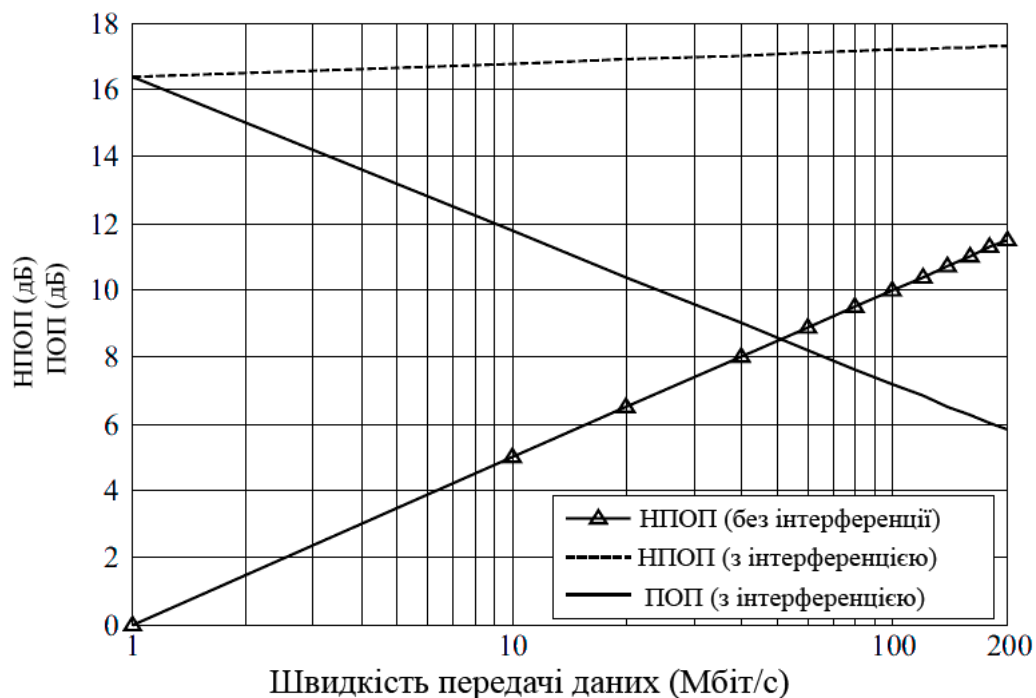


Рисунок 3.11 – ПОП і НПОП для досягнення імовірності помилки 10^{-6} по відношенню до швидкості передачі даних для ООК з ІЛС та без

НПОП як функція R_b для імовірності помилки 10^{-6} і для 4, 8 і 16 модуляції позиції імпульсу (МПП) зображено на рисунку 3.12. На відміну від ідеальних випадків, варіації НПОП для каналу з ІЛС невеликі, що вказує на те, що ІЛС є основним джерелом погіршення продуктивності. НПОП збільшується з R_b для всіх випадків, але кроки становлять < 1 дБ і 2 дБ для 16-МПП і 4-МПП відповідно.

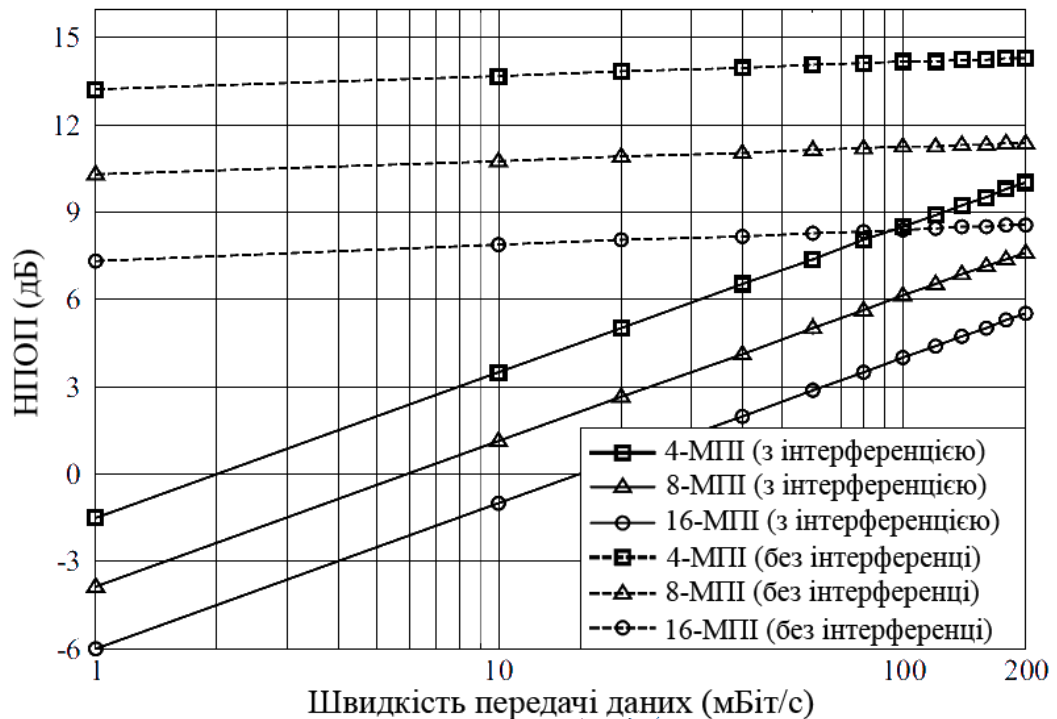


Рисунок 3.12 – Відношення НПОП до швидкості передачі даних для 4, 8 і 16 імпульсної модуляції позиції імпульсу

ПОП є найменшим для 16 МПП, і він зменшується з R_b для всіх бітових роздільних здатностей. МПП на 200 Мбіт/с становить ~ 3 дБ для 16 МПП і майже на 0,5 дБ вище для 8 МПП, а додаткові $\sim 0,5$ дБ покарання виникають для 4 МПП. ПОП для МПП значно нижчий порівняно з ООК для всіх R_b . Насправді ПОП для МПП з інтерференцією та без неї майже ідентичні для $R_b > 20$ Мбіт/с. Покращення продуктивності при вищому R_b відбувається завдяки зменшеній варіації ІЛС протягом одного символу.

Як і в ООК і МПІ, цифрова імпульсна внутрішня модуляція (ЦІВМ) також зазнає значного НПОП через ІЛС (рис. 3.13). Існує невелика варіація НПОП для R_b у діапазоні від 1 Мбіт/с до 200 Мбіт/с. Для 4 ЦІВМ НПОП становить ~ 15 дБ і ~ 16 дБ при 1 Мбіт/с і 200 Мбіт/с відповідно, що на 1 дБ і 2 дБ вище і нижче, ніж ООК і 4 МПІ, для відповідного R_b . Як і у випадку МПІ, ПОП є мінімальним для 16 ЦІВМ і збільшується зі зменшенням роздільної здатності бітів. ЦІВМ має втрати потужності, які трохи вищі, ніж МПІ, що коливаються від 14,6 дБ до 16 дБ при 1 Мбіт/с до 4,5 дБ до 5,4 дБ при 200 Мбіт/с.

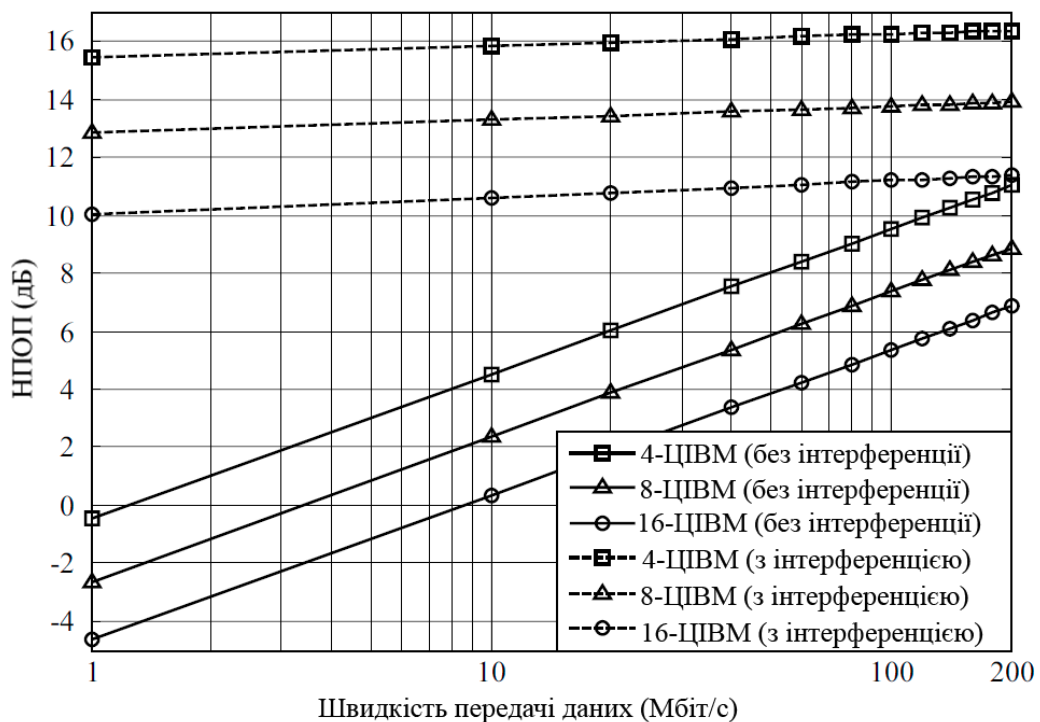


Рисунок 3.13 – Відношення НПОП до швидкості передачі даних для 4, 8 і 16 імпульсної цифрової внутрішньої модуляції

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проаналізовано можливості та особливості використання систем оптичного бездротового зв'язку у видимому світлі. Основну увагу приділено методам комунікації, а також характеристикам світлодіодів і фотодіодів, які є ключовими елементами таких систем.

Світлодіоди завдяки своїй здатності швидко перемикатися, високій енергоефективності та тривалому терміну служби довели свою придатність для передачі інформації у видимому діапазоні. Їх використання дозволяє інтегрувати функції освітлення та зв'язку, що відкриває перспективи для широкого впровадження технологій VLC у смарт-освітленні, Інтернеті речей та інших сучасних системах. З іншого боку, ОБЗ має низьку ймовірність перехоплення та має характеристики захисту від перешкод, що робить його одним із найбезпечніших рішень для глобального з'єднання.

Фотодіоди, зокрема лавинні фотодіоди, завдяки своїй високій чутливості та швидкодії, забезпечують ефективне приймання сигналів навіть за умов низького рівня освітленості або значної відстані. Однак їх ефективність залежить від таких факторів, як рівень шумів, стабільність робочих параметрів і вплив температурних змін.

Оптичний бездротовий зв'язок у видимому світлі є перспективною технологією, яка може стати альтернативою традиційним радіочастотним системам, особливо в умовах зростання щільності пристроїв і обмеженого доступу до радіочастотного спектру. Для подальшого вдосконалення таких систем необхідні оптимізація параметрів роботи світлодіодів і фотодіодів, розробка ефективних методів модуляції сигналів та підвищення завадостійкості.

Також було проведено моделювання ОБЗ у кімнаті, в результаті якого визначено вплив ключових характеристик світлодіодів та фотодіодів на передачу інформації, а саме на швидкість передачі, затримки та співвідношення сигнал/шум.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Sze S. M., Ng K. K. Physics of Semiconductor Devices. 3rd ed. John Wiley & Sons Inc., 2007. 832 p.
2. Senior J. M. Optical Fiber Communications Principles and Practice. 3rd ed. Essex: Pearson Education Limited, 2009. 1076 p.
3. Черняков Е.І., Кухтін С.М. Збірник задач з розв'язанням з дисциплін: Оптоелектроніка та Фізика твердого тіла: навч. посібник. Харків: ХНУРЕ, 2019. 208 с.
4. Sze S. M., Ng K. K. Physics of Semiconductor Devices. 3 edition. John wiley & sons: New Jersey, 2007.
5. Mapunda G. A. et al. Indoor Visible Light Communication: A Tutorial and Survey, 2020
6. Kottke C., Hilt J., Habel K., et al. 1.25 Gbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary. *In European Conference and Exhibition on Optical Communication: Conference. America, 2012. Vol.: We3B4*
7. Cossu G., Khalid A. M., Choudhury P., Corsini R., Ciaramella E. 3?4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED // *Optics express. Vol. 20, No 26. P. B501–B506.*
8. Ghassemlooy Z., Popoola W., Rajbhandari S. Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab. 2nd Edition. CRC Press, 2019. 540 p.
9. Davis C. C. Lasers and electro-optics: fundamentals and engineeringю 2 nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 896 p.
10. Кухтін С., Федоренко Є. Особливості сучасних систем передачі даних відкритими оптичними трасами. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем: Всеукраїнська науково-практична конференція MEICS-2024, 27-29 листопада 2024. м. Дніпро, Україна. С. 172–173.*

11. Shiba K., Nakata T., Takeuchi T., Sasaki T., Makita K. 10 Gbit/s asymmetric waveguide APD with high sensitivity of -30 dBm // *Electronics Letters*. 2006. Vol. 42, No. 20. P. 1177–1178.

10. Jenila C., Jeyachitra R.K. Green indoor optical wireless communication systems: Pathway towards pervasive deployment // *Digital Communications and Networks*. 2021. Vol. 7, Issue 3. P. 410–444.

11. Qiu Y., Chen H.-H., Meng W.-X. Channel modeling for visible light communications – a survey // *Wireless Commun. Mobile Comput.* 2016. Vol. 16. Issue 14, P. 2016–2034.

12. Kurian C.P., George V.I., Pallavi K., Varghese M. Office lighting simulation: energy implications with scheduled occupancy and daylight harvesting in: 2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies, ICCPCCT, 2018. P. 129–135.

13. Wu D., Ghassemlooy Z., Le-Minh H., Rajbhandari S. Channel characteristics analysis of diffuse indoor cellular optical wireless communication systems in: 2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, ACP. 2011. P. 1–6.

14. Irda Core Data Communications Specifications, Irda Library of Specifications and Technical Papers. Tech. Rep. Infrared Data Association, 2018.

15. Aftab F., Gujjar A.A., Hafeez A. Light fidelity (li-fi): future of next generation wireless and mobile communication technology. 2014. // *Asian J. Acad. Res.* 2014. P. 231–239.

16. Khan L.U. Visible light communication: applications, architecture, standardization and research challenges // *Digit. Comm. Network*. 2017. Vol. 3. Issue 2. P. 78–88.

17. IEEE Std 802.15.7-2011, IEEE standard for local and metropolitan area networks–part 15.7: short-range wireless optical communication using visible light, 2011. P. 1–309.

18. Kahn J. M., Barry J. R. Wireless Infrared Communications // *Proc. IEEE*. 1997. Vol. 85, No. 2. P. 265–298.

19. Carruthers J. B., Kahn J. M., Modeling of Nondirected Wireless Infrared Channels // IEEE Trans. Commun. 1997. Vol. 45, No. 10. P. 1260–1268.
20. Hayasaka N., Ito T. Channel Modeling of Nondirected Wireless Infrared Indoor Diffuse Link // Electron. Commun. Japan. 2007. Vol. 90, No. 6. P. 9–19.
23. Barry J. R., Kahn J. M., Krause W. J., Lee E. A., Messerschmitt D. G. Simulation of Multipath Impulse Response for Indoor Wireless Optical Channels. // IEEE J. Sel. areas Commun. 1993. Vol. 11, No. 3. P. 367–379.
24. Pakravan M. R., Kavehrad M. Indoor Wireless Infrared Channel Characterization by Measurements // IEEE Trans. Veh. Technol. 2001. Vol. 50, No. 2. P. 1053–1073.
25. Kahn J. M., Krause W. J., Carruthers J. B. Experimental Characterization of Non-Directed Indoor Infrared Channels // IEEE Trans. Commun. 1995. Vol. 43, No. 234. P. 1613–1623.