

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

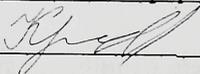
на тему:

«Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку»

Виконав: студент 2-го курсу, групи

ЛТО-24м спеціальності

175 – Інформаційно-вимірювальні  
технології, освітня програма «Лазерна  
техніка та оптоінформатика»

 Кіріт Є.І.

Керівник: к.т.н., доцент,

доцент каф. БМІОЕС

 Тужанський С. Є.

« 01 » 12 2025 р.

Опонент: к.т.н., доцент каф. ІРТС

 Притула М.О.

« 01 » 12 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри БМІОЕС

 к.т.н., доц. Коваль Л.Г.

« 01 » 12 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет  
 Факультет інформаційних електронних систем  
 Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем  
 Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
 Галузь знань – 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»  
 Спеціальність – 175 «Інформаційно-вимірювальні технології»  
 Освітньо-професійна програма – «Лазерна техніка та оптоінформатика»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри БМІОЕС

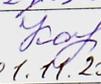
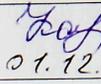
 Л.Г. Коваль

24 09 2025 року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА**  
**Крота Євгенія Ігоровича**

1. Тема роботи: Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку керівник роботи Тужанський Станіслав Євгенович, доцент, к.т.н. затверджені наказом вищого навчального закладу від 24.09.2025 р., №313
2. Строк подання студентом магістерської кваліфікаційної роботи: 10.12.2025
3. Вихідні дані до роботи:
  - 1 Функціональне призначення системи: передача інформації по відкритому оптичному каналу зв'язку із адаптацією до атмосферних умов; 2 Максимальна дальність – 2000 м. 2. Пропускна здатність – від 100 Мбіт/с. 3. Характеристики передавача – 2 діодних лазери, довжини хвиль  $\lambda_1=850$  нм та  $\lambda_2=1550$  нм, потужність - 100мВт, 4. Приймач – на PIN фотодіоді. 5. Оптичний блок – з колімацією пучка до 20 см.
  4. Зміст текстової частини: Вступ 1. Аналітичний огляд систем атмосферного оптичного зв'язку 2. Методи та технології адаптивних систем атмосферного оптичного зв'язку. 3. Розробка адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку 4. Економічна частина. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.
  5. Перелік ілюстративного матеріалу: 1. Структурна схема адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку. 2. Структурна схема модулятора адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку. 3. Блок-схема алгоритму програми роботи адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку. 4. Електрична схема приймача адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку. 5. Електрична схема передавача адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку. 6. Адаптивний блок системи атмосферного оптичного зв'язку.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Спеціальна частина, розділи 1-3	Тужанський С.Є., доцент каф. БМІОЕС	 24.09.2025	 07.12.2025
Економічна частина	Кавецький В.В., к.е.н., доцент каф. ЕПВМ	 01.11.2025	 01.12.2025

7. Дата видачі завдання «24» Вересня 2025 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

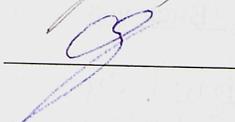
№ з/п	Назва етапів МКР	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Постановка задачі дослідження	14.09.2025	вик
2	Аналіз методів та систем передачі інформації за допомогою відкритого оптичного зв'язку (FSO).	09.10.2025	вик
3	Метод та архітектура лазерної FSO системи для передачі інформації із адаптацією потужності лазерного випромінювача до зміни атмосферних умов	09.11.2025	вик
4	Дослідження технічної реалізації системи та оцінка її характеристик	19.11.2025	вик
5	Економічний розділ	01.12.2025	вик
6	Попередній захист МКР	08.12.2025	вик
7	Нормоконтроль МКР	10.12.2025	вик
8	Рецензування МКР	12.12.2025	вик
8	Остаточний захист МКР	17.12.2025	вик

Студент

  
\_\_\_\_\_

Є.І. Кріт

Керівник роботи

  
\_\_\_\_\_

С.Є. Тужанський

## АНОТАЦІЯ

УДК 681.7

Кріт Є.І: Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку  
Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 175 Інформаційно-вимірвальні технології, освітня програма – Лазерна техніка та оптоінформатика. Вінниця: ВНТУ, 2025. 138 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 51 назв; рис.: 31; табл. 16.

В магістерській кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження та розробку адаптивної системи відкритого оптичного зв'язку (FSO). Здійснено аналіз впливу атмосферних умов на стабільність оптичного каналу та визначено методи підвищення його надійності. Удосконалено метод адаптивного контролю потужності випромінювача, що базується на двохвильовому моніторингу характеристик середовища передачі. Розроблено структурну схему системи, обґрунтовано вибір елементної бази та створено експериментальний макет пристрою. Розроблено комп'ютерну програму для автоматизованого керування параметрами випромінювання. Проведено розрахунок техніко-економічних показників, що підтверджують доцільність впровадження розробки.

Ключові слова: лазерний зв'язок, FSO-системи, адаптивний контроль, завадостійкість, атмосферний канал, двохвильовий метод.

## ABSTRACT

Krit Y.I. Adaptive laser optical atmospheric communication system. Master's thesis in specialty 175 Information and measurement technology. Educational program - Laser technology and optoinformatics. Vinnitsya: VNTU, 2025. 138p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 51 titles; fig.: 31; tabl. 16.

The master's qualification work involves a comprehensive study and development of an adaptive free-space optical (FSO) communication system. The analysis of the influence of atmospheric conditions on the stability of the optical channel was carried out and methods for increasing its reliability were identified. An improved method of adaptive emitter power control based on two-wavelength monitoring of the transmission medium characteristics has been proposed. The structural diagram of the system was developed, the choice of the element base was justified, and an experimental prototype of the device was created. A computer program for automated control of radiation parameters has been developed. The calculation of technical and economic indicators confirming the feasibility of the development implementation was performed.

Keywords: laser communication, FSO systems, adaptive control, noise immunity, atmospheric channel, two-wavelength method.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД FSO СИСТЕМ.....	11
1.1 Аналіз сучасних технологій і засобів FSO систем.....	11
1.2 Особливості технологій відкритої передачі в інфрачервоному діапазоні .....	15
1.3 Узагальнений опис FSO технології.....	19
1.4 Компоненти FSO систем.....	21
1.5 Аналіз сучасних ІЧ систем лазерного зв'язку .....	29
1.6 Технічні характеристики та класифікація сучасних FSO систем .....	30
1.7 Технічні вимоги до розроблюваної адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку .....	33
2 МЕТОДИ І ТЕХНОЛОГІЇ АДАПТИВНИХ ВІДКРИТИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ.....	34
2.1 Технології FSO систем.....	34
2.2 FSO система з використанням методу поляризаційної модуляції для зменшення рівня шумів.....	35
2.3 FSO канал з усуненням мультиплексного і додаткового шуму.....	37
2.4 FSO система з використанням просторового розділення каналів.....	38
2.5 Адаптивна FSO система зі зниження шуму.....	41
2.6 Вплив атмосфери на роботу FSO систем.....	44
2.7 Розрахунок робочої частоти системи.....	49
2.8 Розрахунок надійності роботи системи.....	52
2.9 Ослаблення рівня корисного сигналу через зворотне розсіювання.....	56
2.10 Моделювання роботи відкритого каналу з урахуванням особливостей застосування.....	57
3 РОЗРОБКА АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ АТМОСФЕРНОГО ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ.....	65
3.1 Інфрачервоні системи зв'язку.....	65
3.2 Протокол зв'язку – Ethernet 100Base-TX .....	68
3.3 Типові схеми передачі.....	84

	6
3.3.1 Точка-точка.....	84
3.3.2 Точка доступу .....	84
3.3.3 Магістраль.....	85
3.4 Структура апаратних засобів адаптивної FSO системи.....	86
3.5 Структура схема модулятора та демодулятора FSO системи.....	87
3.6 Електрична принципова схема модулятора .....	89
3.7 Структурна схема термінального пристрою з резервним каналом.....	90
3.8 Розробка алгоритму роботи адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку та його програмна реалізація.....	90
3.8.1 Опис алгоритму роботи адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку.....	90
3.9 Програмна реалізація моделювання роботи адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку.....	93
3.10 Апаратна реалізація пристрою адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку .....	96
3.11 Висновки до розділу 3.....	98
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....	99
4.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки .....	99
4.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки .....	100
4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи .....	102
4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором .....	114
4.5 Висновки до розділу 4.....	119
ВИСНОВКИ.....	120
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	122
ДОДАТКИ.....	125
Додаток А Технічне завдання на магістерську кваліфікаційну роботу «Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку» .....	126

Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень (обов'язковий).....	131
Додаток В ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА (обов'язковий).....	132
Додаток В1 Блок-схема адаптивної системи передачі інформації атмосферного оптичного зв'язку.....	133
Додаток В2 Блок-схема алгоритму роботи мобільного додатку адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку.....	134
Додаток В3 Блок-схема пристрою системи передачі інформації атмосферного оптичного зв'язку.....	137

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Оптико-інформаційні системи є одним із перспективних напрямів розвитку сучасних інформаційно-вимірювальних та телекомунікаційних технологій. Напрямок базується на використанні оптичних сигналів для передачі, зберігання та обробки даних. Завдяки унікальним характеристикам світлової хвилі, які формують високу пропускну здатність як оптичних каналів зв'язку, фотонні системи передачі інформації сьогодні перевершують електронні, зокрема на великих відстанях. FSO (Free Space Optics) - вид лазерного (атмосферного або космічного) зв'язку, який активно розвивається понад 30 років в результаті об'єднання лазерних і телекомунікаційних технологій. Використання інфрачервоного оптичного діапазону дозволило реалізувати альтернативні лазерні канали передачі інформації у відкритому просторі без використання кабелів або волоконно-оптичних ліній [1], [2].

FSO системи мають ряд важливих переваг. По-перше, вони забезпечують високошвидкісний зв'язок на відстанях до декількох кілометрів без прокладки кабелю (особливо актуально в умовах щільної забудови мегаполісів та місцях, де прокладка кабелю є складною). По-друге, оптична інформаційна система зв'язку у відкритому просторі не реагує на електромагнітні завади. Однак на ефективність FSO систем істотно впливають погодні умови (серпанок, дощ, сніг), які можуть тимчасово знизити якість і дальність зв'язку [3].

Таким чином, залишаються актуальними завдання підвищення надійності оптичних каналів передачі у FSO системах та розробка універсальних адаптивних алгоритмів автоматизованого контролю керування характеристиками лазерних пучків. Багато сучасних засобів потребують складних програмних алгоритмів обробки, не у повній мірі також використовуються можливості поєднання з іншими засобами передачі інформації [4].

Таким чином, розробка та удосконалення методів і засобів лазерного

відкритого оптичного зв'язку із можливістю адаптації до атмосферних умов є актуальною задачею сучасної телекомунікаційної та інформаційно-вимірjuвальної техніки.

**Метою магістерської кваліфікаційної роботи** є розширення функціональних можливостей та завадостійкості системи лазерного відкритого зв'язку із адаптацією до атмосферних умов за рахунок її доповнення блоком автоматичного контролю потужністю лазерного випромінювача.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати сучасні методи і засоби оптичного зв'язку, принципи і технології FSO систем.

2. Провести аналіз впливу атмосферних умов на роботу FSO систем та методів підвищення їх завадостійкості .

3. Удосконалити метод адаптивного контролю потужності лазерного випромінювача FSO системи, який базується на аналізі поточних характеристик каналу передачі інформації.

4. Обґрунтувати вибір елементної бази функціональних блоків адаптивної лазерної системи відкритого оптичного зв'язку.

5. Розробити експериментальний макет адаптивної системи лазерного атмосферного зв'язку та комп'ютерну програму автоматизованого контролю потужності випромінювача.

6. Виконати економічне обґрунтування та розрахувати техніко-економічні показники розробки.

**Об'єкт дослідження:** процеси передачі інформації у відкритих оптичних каналах зв'язку.

**Предмет дослідження:** методи, компоненти та алгоритми передачі та обробки інформації у відкритих оптичних системах зв'язку

**Методи дослідження.** У процесі виконання роботи застосовано теорії: прикладної та лазерної оптики; оптичних телекомунікацій; схемотехніки.

**Наукова новизна:** Подальшого розвитку отримав метод автоматичного контролю потужності лазерного випромінювача системи відкритого оптичного зв'язку, в якому використовується постійно діючий адаптивний контроль рівня оптичного сигналу на двох довжинах хвиль випромінювання лазерів, що дозволило підвищити надійність та розширити функціональні можливості системи.

**Практична значимість** одержаних результатів полягає в тому, що на основі отриманих теоретичних результатів:

- Обґрунтовано вибір елементної бази та синтезовано функціональну схему адаптивної системи лазерного відкритого оптичного зв'язку, схеми функціональних блоків, що враховують особливості контролю потужності випромінювача;

- Розроблено експериментальний макет та комп'ютерну програму для імітації роботи системи адаптивного лазерного атмосферного зв'язку.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД FSO СИСТЕМ

## 1.1 Аналіз сучасних технологій і засобів FSO систем

Оптичні безпроводові високошвидкісні лінії передачі мають значний потенціал для задоволення майбутніх потреб у передачі даних завдяки своїй високій частоті. Системи оптичного зв'язку у вільному просторі Free Space Optical (FSO) є безпроводовими системами передачі даних, що використовують світлові промені для передачі інформації у вільному просторі. Основні переваги FSO включають: високу швидкість передачі даних, безпеку передачі інформації, відсутність необхідності ліцензування частот. Ці системи знаходять застосування в різних областях, таких як створення високошвидкісних мобільних магістралей у випадку наявності перешкод, які важко обійти звичайними способами; у корпоративному секторі; для швидкого розгортання високошвидкісного тимчасового зв'язку; в мережах мобільного зв'язку зв'язок між будинками тощо [1, 2]. Для задоволення попиту на широкосмуговий трафік за допомогою FSO каналів забезпечується стійкий зв'язок з високою швидкістю передачі. Проте, системи FSO мають свої обмеження. Основним недоліком такого каналу зв'язку вважається залежність від погодних умов, таких як дощ, туман, пил та сніг, що значно знижує якість сигналу, і виражається в значному згасанні оптичного сигналу [3].

В своїх межах система FSO є вигідною альтернативою системам, що використовують кабелі. Фактично, для вирішення однієї і тієї ж задачі системи FSO можуть коштувати у декілька разів менше ніж прокладка волоконо-оптичних кабелів. Вони можуть бути достатньо швидко розгорнені на об'єкті, протягом декількох днів. Риття траншей є не тільки дорогим, але і таким, що завдає шкоди навколишньому середовищу. Лінії FSO обходяться дешевше і більш вигідні, ніж оренда ліній зв'язку у провайдера.

Основним сегментом ринку використання FSO систем є зв'язок сегментів корпоративних мереж. За різними оцінками в світі від 65 до 85% систем використовується в корпоративних мережах для зв'язку сегментів

корпоративної мережі. Ще однією областю використання є з'єднання базових станцій мереж стільникових операторів в районах щільної забудови. Передача даних в різних мережах через важкодоступні ділянки типу автомагістралі, водної перешкоди або залізниці.

Наступна область використання це є побудова тимчасових мереж, що швидко монтуються, оскільки установка такого устаткування не вимагає ніяких дозволів. Це устаткування потім можна використовувати для інших каналів.

Важливо визнати, що немає технології, яка була б в рівній мірі придатна у всіх ситуаціях, і що кожний засіб зв'язку має свої переваги. Високоєфективні бездротові системи, засновані на використуванні технології FSO, є реальною альтернативою, якщо мережному розробнику необхідно враховувати дію звичайних в даній місцевості погодних умов, протяжність лінії бездротового зв'язку, вимоги до смуги пропускання і потенційну можливість використання системи FSO як допоміжні резервні канали зв'язку. Можливість швидкого розгортання безліцензійної і безпечної бездротової системи, яка має велику смугу пропускання і не залежить від протоколу передачі даних, забезпечує використання і вживання FSO при побудові корпоративних мереж. Отже, можна говорити про наступні можливі області вживання бездротових таких оптичних систем:

1. Зв'язок на ділянках, де між двома точками в межах прямої видимості є різні перешкоди (водна перешкода, залізничні колії, автостради, парки і т.п.).
2. Термінова організація резервного каналу у разі аварій на основному каналі зв'язку, створення тимчасових каналів.
3. Об'єднання сегментів високошвидкісних локальних мереж.
4. Передача трафіку Інтернету, IP-телефонії, відеоконференц-зв'язки.
5. Відеоспостереження.

Необхідно відзначити, що в середньому дальність зв'язку в міських умовах коливається від 1 до 5 км. При таких відстанях сучасне устаткування забезпечує досить високу якість зв'язку. За різними оцінками час несприятливих для зв'язку погодних умов складає 0,01-0,001% від загального

часу роботи. При цьому погіршення погодних умов не призводить до переривань в роботі каналу, у ряді випадків спостерігається лише зменшення швидкості інформаційного обміну за рахунок повторної передачі інформації.

Головна перевага бездротових каналів зв'язку полягає в тому, що не потрібно ніякої прокладки кабелів (не треба робити отворів у стінах, не треба закріплювати кабель у трубах, прокласти його над підвісними стелями або у вентиляційних шахтах, не треба шукати і усувати пошкодження кабелю) [7].

Радіоканал використовує передачу інформації по радіохвилях, може забезпечити зв'язок на сотні і навіть тисячі кілометрів. Проте в локальних мережах радіоканал не набув широкого поширення через досить високу вартість передавальних і приймальних пристроїв, низьку завододо захищеність, повну відсутність секретності переданої інформації та низьку надійність зв'язку. Існує декілька стандартних типів радіопередачі інформації.

1. Передача у вузькому спектрі (або одночастотна передача) розрахована на охоплення площі до 46 500 м<sup>2</sup>. Радіосигнал в даному випадку не проникає через металеві і залізобетонні перешкоди, тому навіть у межах одного приміщення можуть бути серйозні проблеми зі зв'язком. Зв'язок в даному випадку відносно повільний (близько 4,8 Мбіт/с).

2. Передача у розсіяному спектрі для подолання недоліків одночастотній передачі припускає використання певної смуги частот, розділеної на канали. Всі абоненти мережі через певний часовий інтервал синхронно переходять на наступний канал. Для підвищення секретності використовується спеціальне кодування інформації. Швидкість передачі при цьому невисока - не більше 2 Мбіт/с, відстань між абонентами - не більше 3,2 км на відкритому просторі і не більше 120 м всередині будівлі.

Крім зазначених типів, існують стільникові мережі (використовують рівномірно розподілені по площі ретранслятори), а також мікрохвильові мережі, що застосовують вузько спрямовану передачу між наземними об'єктами або між супутником і наземною станцією [11].

Інфрачервоний канал також не вимагає сполучних проводів, тому що використовує для зв'язку інфрачервоне випромінювання (подібно пульта дистанційного керування домашнього телевізора). Головна його перевага в порівнянні з радіоканалом - нечутливість до електромагнітних завад, що дозволяє застосовувати його, наприклад, у виробничих умовах. Правда, в даному випадку потрібно досить висока потужність передачі, щоб не впливали ніякі інші джерела теплового (інфрачервоного) випромінювання. Погано працює інфрачервона зв'язок і в умовах сильної запиленості повітря.

Граничні швидкості передачі інформації по інфрачервоному каналу не перевищують 5-10 Мбіт/с. Секретність інформації, що передається, як і у випадку радіоканалу, також не досягається. Як і у випадку радіоканалу потрібні порівняно дорогі приймачі та передавачі. Все це призводить до того, що застосовують інфрачервоні канали досить рідко [9].

Інфрачервоні канали діляться на дві групи:

1. Канали прямої видимості, в яких зв'язок здійснюється на променях, що йдуть безпосередньо від передавача до приймача. При цьому зв'язок можливий тільки при відсутності перешкод між комп'ютерами мережі. Протяжність каналу прямої видимості може досягати декількох кілометрів.

2. Канали на розсіяному випромінюванні, які працюють на сигналах, відбитих від стін, стелі, підлоги та інших перешкод. Перешкоди в даному випадку не страшні, але зв'язок може здійснюватися тільки в межах одного приміщення.

Якщо говорити про можливі топології, то найбільш природно всі бездротові канали зв'язку підходять для топології типу «шина», в якій інформація передається одночасно всім абонентам. Але в принципі при організації вузьконаправлене передачі можна реалізувати будь-які топології (кільце, зірка, комбіновані топології) як на радіоканалі, так і на інфрачервоному каналі.

## 1.2 Особливості технологій відкритої передачі в інфрачервоному діапазоні

Розглянемо основні переваги використання ІЧ систем бездротової передачі в порівнянні з іншими бездротовими рішеннями.

Сучасні FSO дозволяють створювати надійні канали зв'язку на відстанях від метрів до десятків кілометрів в умовах атмосфери. До основних переваг можливо віднести такі:

1. Системи оптичного зв'язку не використовують радіодіапазон та не створюють перешкод у радіочастотному спектрі. Обладнання не потрапляє під дію Закону, який регламентує роботу з радіозасобами, що працюють у діапазоні до 400 ГГц. Реальні частоти оптичних передавачів у тисячі разів вищі за встановлену межу. Оптичні передавачі не призводять до порушення роботи радіосистем та обладнання.

2. Атмосферний оптичний лазерний зв'язок (АОЛЗ) не потребує дозволів на розгортання та відповідних регулювальних органів. У містах (мегаполісах) доступні частоти настільки сильно «заселені», що дана перевага відіграє домінуючу роль. Час, необхідний на підготовку та отримання документів для експлуатації радіосистем, становить близько півроку, якщо взагалі вільний діапазон є у наявності. Підготовчий етап для розгортання АОЛЗ може складати декілька годин.

3. Простота встановлення елементів та під'єднання до мережі. Оптичне обладнання FSO системи потребує мінімальних потужностей для роботи, швидко під'єднується до портів мережевого (телекомунікаційного) обладнання та не потребує багато місця для розміщення.

4. Малий час на розгортання АОЛЗ. Прямий наслідок попередньої переваги АОЛЗ. У деяких випадках необхідне швидке розгортання з'єднань. Інфрачервону (ІЧ) систему пара фахівців може встановити за 1-2 год для великих відстаней (понад 1 км) та за 15-20 хв – для коротких.

5. У систем лазерног зв'язку немає річної орендної плати. Робота обладнання не пов'язана з регулярними сплатами за користування середовищем передачі даних на відміну від радіо систем.

6. У АОЛЗ швидке повернення інвестицій. Швидке встановлення обладнання дає змогу оператору отримувати дохід від експлуатації лінії зв'язку без затримок. У звичайному випадку, за час, витрачений на розгортання дротових комунікацій або радіо систем, оператор має тільки витрати.

7. Системи лазерного зв'язку не чутливі до радіоперешкод. Встановлення бездротових оптичних прийомопередавачів можливо у зонах з високими перешкодами від радіообладнання (промислового) обладнання, де використання радіосистем проблематичне.

8. У атмосферного оптичного лазерного зв'язку висока пропускна здатність каналу зв'язку. Пропускна здатність каналу зв'язку АОЛЗ використовується повністю, без витрат на організацію з'єднання та підтримання його у активному стані.

9. Прозорий механізм передачі даних у АОЛЗ. Прозорість технології передачі даних призводить до того, що, насправді, ІЧ-системи є усього лише конверторами середовища передачі та еквівалентні звичайному оптичному кабелю, для якого немає особливої різниці у протоколах передачі даних тощо.

10. У FSO відсутня затримка у каналі зв'язку. Відсутність складних перетворень сигналу призводить до того, що затримка у каналі передачі даних, що вноситься оптичною системою, незначна. Відсутнє обмеження на швидкість передачі даних, що є однією з ключових технічних переваг оптичних систем зв'язку, яка викликала бурхливе зростання інтересу до технології серед виробників і потенційних замовників.

11. Системи лазерного зв'язку стійкі до температурних та кліматичних змін.

12. У АОЛЗ висока закритість каналу зв'язку. Жодна бездротова технологія передачі даних не може запропонувати таку конфіденційність зв'язку, як АОЛЗ. Перехопити сигнал можливо тільки встановивши сканери

приймачі безпосередньо у лазерному випромінюванні (ЛВ) від передавачів. Перехоплення даних практично неможливо. Наявність ЛВ не можливо визначити за допомогою різних сканерів [7].

Інфрачервоне світло - електромагнітне випромінювання, розташоване в електромагнітному спектрі перед червоним кінцем видимих променів.

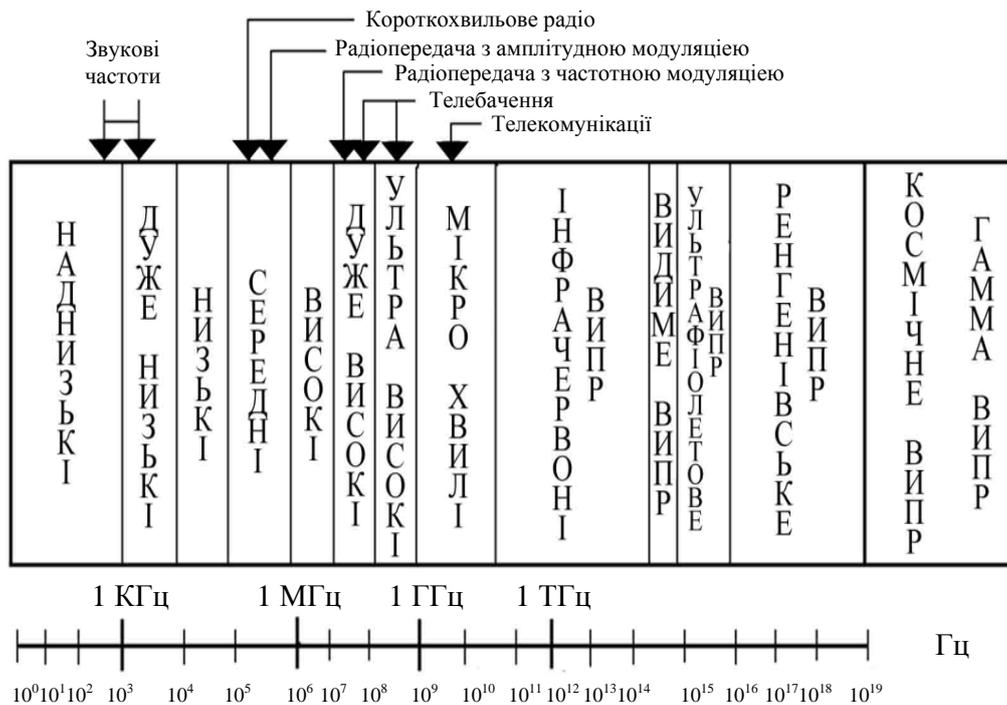


Рисунок 1.1 – Структура електромагнітного спектру

Інфрачервоне випромінювання займає смугу частот електромагнітного спектра від 50-100 ГГц до 400 ТГц (рисунок 1.1). Відповідно до цього оптичні характеристики розглянутого випромінювання значно відрізняються від тих же характеристик видимих променів. Так, шар води завтовшки кілька сантиметрів непрозорий для інфрачервоного випромінювання. І, навпаки, пластинки германію та кремнію для нього прозорі. Інфрачервоне випромінювання легко проходить від сонця до землі. Проте в атмосфері воно швидко послаблюється в результаті розсіювання та поглинання. Особливо сильно випромінювання поглинається парами води (сніг, дощ), частками пилу і диму. Разом з цим, при передачі інфрачервоного випромінювання через

спеціальні світловоди, зазначені перешкоди відсутні. Важливо, що розглядається випромінювання захищене від багатьох електромагнітних завад [14].

Смуга частот - частина спектру синусоїдальних коливань електромагнітних випромінювань, що лежить в певних межах.

Електромагнітний спектр визначає смуги частот, що використовуються для передачі звуку, радіовипромінювання, інфрачервоного випромінювання, світла. Всередині цих, основних, діапазонів виділяються смуги, що використовуються в застосовуваних технологіях передачі даних.

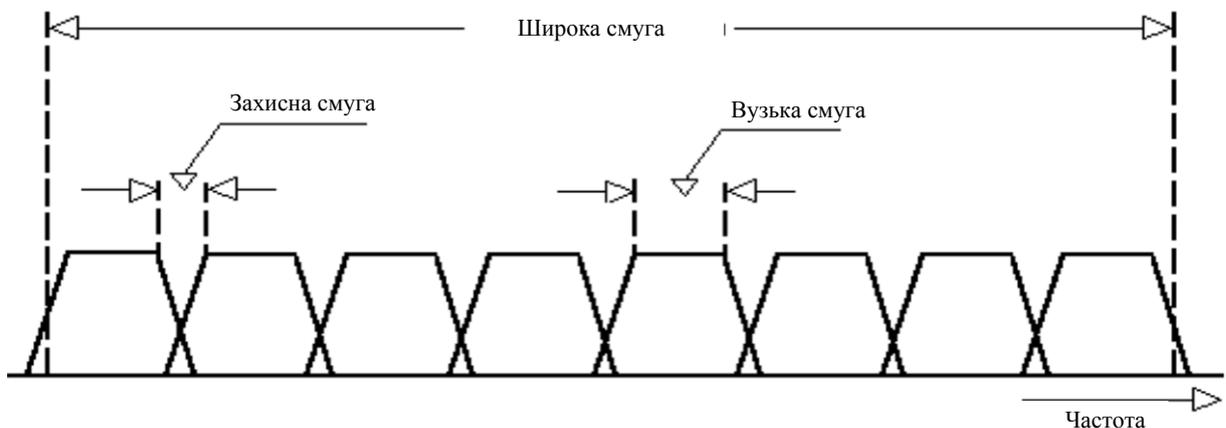


Рисунок 1.2 – Схема виділення логічних каналів

Смуги діляться (див. рисунок 1.2) на дві групи: вузькі і широкі. Вузькою називають смугу, ширина якої не перевищує мовну смугу. Остання дорівнює 3000 Гц (від 300 до 3330). Таку смугу використовують вузькосмугові канали. Широкою називають смугу, частота якої перевищує звукову. Як правило, широка смуга включає в себе безліч вузьких смуг. Канал, що пропускає широку смугу називають широкосмуговим каналом.

При створенні бездротових мереж виникає проблема розподілу в ефірі смуг електромагнітного спектру. Тому кожна держава поділяє спектр на смуги, які виділяються для певних цілей. Для використання смуги необхідно брати ліцензію. Виключення складає так звана Промислова, наукова, медична

смуга ISM. У Європі для зазначеної мети служить діапазон не ліцензованих частот 2,4-2,5 ГГц, а в США - діапазони (ГГц): 5725-5850; 2400-2485; 0,902-0,928. Крім цього в США не ліцензується персональний комунікаційний сервіс, який працює у смузі 1830-1990 МГц. Зазначені смуги виділяються міждержавними і урядовими організаціями. Так, в США надання послуг електронного зв'язку регламентує Федеральна комісія зв'язку FCC.

### 1.3 Узагальнений опис FSO технології

Бездротові оптичні лінії зв'язку використовують спектральний діапазон лазерного інфрачервоного випромінювання (як правило, від 400 до 1400 нм). Ця ділянка спектра відповідає так званим "вікна прозорості" атмосфери.

Функціональна схема системи лазерного зв'язку дуже проста:

1. Блок обробки приймає сигнали від різних стандартних пристроїв (телефону, факсу, цифрової АТС, локальної комп'ютерної мережі) і перетворює їх у прийнятну для передачі лазерним модемом форму;
2. Перетворений сигнал передається електронно-оптичним блоком у вигляді інфрачервоного випромінювання;
3. На приймальній стороні зібране оптичною системою світло падає на фотоприймач, де перетворюється назад в електричні сигнали;
4. Посилений і оброблений електричний сигнал надходить до блоку обробки сигналів, де відновлюється у первісний вигляд.

Передача і прийом здійснюються кожним з парних модемів одночасно і незалежно один від одного. Лазерні модеми встановлюються таким чином, щоб оптичні осі приймально-передавальних блоків збігалися. Основну складність представляє собою юстування напрямку оптичних осей приймально-передавальних блоків. Кут розходження променя передавача становить у різних моделей від декількох кутових хвилин до  $0,5^\circ$  і точність юстирування повинна відповідати цим значенням.

Після установки, приймально-передавальні блоки необхідно підключити до кабельних мереж в обох будівлях. Існує безліч моделей пристроїв з найрізноманітнішими інтерфейсами, проте, на відміну від постачальників устаткування для радіозв'язку, виробники систем безпроводової оптики дотримуються наступної спільної ідеології підключення: лінія лазерного зв'язку представляє собою емуляцію відрізка кабелю (дві виті пари або дві жили оптичного кабелю). Передача сигналів по бездротовому з'єднанню оптичному здійснюється так само, як по оптичному волокну. Різняться лише середовища, в яких поширюється промінь.

З'єднані за допомогою бездротової оптики локальні мережі функціонують так, якби вони були з'єднані виділеним кабелем. Деякі моделі лазерних модемів мають суміщені інтерфейси до мережі Ethernet і потокам E1. В результаті одна атмосферна лінія зв'язку може з'єднати LAN і телефонні мережі будинків без використання мультиплексора [17].

Найважливіша властивість бездротової оптичної системи зв'язку - високий ступінь захищеності каналу від несанкціонованого доступу. Це є наслідком самої природи лазерної передачі сигналу. Здійснити перехоплення каналу технічно дуже важко - у силу гострої спрямованості променя і застосування унікального для кожної моделі методу кодування інформації імпульсами випромінювання.

Тим не менше, для виявлення спроб несанкціонованого доступу розроблено низку заходів, заснованих на різноманітних принципах - звернення хвильового фронту, аналізу зміни прийнятого сигналу. Це ще більше підвищує захищеність каналу зв'язку.

Сигнали вхідного інтерфейсу системи використовуються для модуляції сигналу у відкритому оптичному каналі. Сама технологія ґрунтується на передачі даних модульованим випромінюванням в інфрачервоній частині спектру через атмосферу.

Передавачем служить - напівпровідниковий випромінюючий лазер. В якості приймача використовується високочутливий фотодіод.

Випромінювання впливає на фотодіод, внаслідок чого регенерується вихідний модульований сигнал. Далі, сигнал демодулюється і перетворюється у сигнал вихідного інтерфейсу. З обох сторін використовується система лінз, на передавальній стороні - для отримання калімаційного променя, а на приймальній стороні, для фокусування прийнятого випромінювання на фотодіод. Все виглядає досить просто, але це тільки на перший погляд.

Найбільш непередбачуваним елементом в системі є середа розповсюдження променя. Непередбачуваність атмосфери з її погодними явищами нам усім близька і зрозуміла. Це і є головна відмінність від оптоволоконних систем, де параметри кабелю добре відомі. Коротко розглянемо особливості передачі ІЧ сигналу через атмосферу.

Довжина хвилі в більшості реалізованих систем варіюється в межах 720 - 950 нм. Це близький до видимого інфрачервоний спектр. Існуючі технологічні напрацювання, що включають і розробку технології виробництва напівпровідникових лазерів, були зроблені з розрахунок компромісу між принципово доступними довжинами хвиль випромінювачів і прийнятними діапазонами пропускання оптоволоконна. Тому, вибір довжинах хвиль може обмежувати випромінювачі і приймачі (фотоди). Крім діапазону 720-950 нм, існують компоненти для діапазонів близько 1300 нм і 1500 нм.

Існує багато публікацій про вплив туману, дощу, снігу та інших атмосферних і погодних умов на ІЧ системи. Однак, крім досить простих, що враховують обмежений набір факторів, які впливають на атмосферний канал передачі, підходів до моделювання каналу в цих публікаціях знайдено небагато. Основна частина підходів базується на визначенні метеорологічної видимості (МВ - відстань, на яку людське око розрізняє чорний об'єкт з кутовими розмірами більше 20 Мрад при денному освітленні), і визначає ослаблення сигналу в залежності від цієї самої метеорологічної видимості. Сама ж МВ визначена для різних погодних умов і станів атмосфери досить точно. Фактор "людське око" тут відокремлено не випадково. При цьому ми

відразу потрапляємо в оману, вважаючи те, що ми бачимо, "бачить" і ІЧ система [19].

Згасання ІЧ сигналу включає в себе аерозольне затухання. Особливо сильний вплив на резонансне поглинання роблять параметри спектру випромінювання, такі як, ширина, структура й кількість мод випромінювання і т.д. Розрахунки резонансного поглинання проводяться за системою "лінія до лінії" (line by line) з урахуванням величезної бази даних по спектральних характеристиках атмосфери.

Урахування всіх цих нюансів дає можливість не лише обрати правильний діапазон для передачі, але також правильно спроектувати систему, а в експлуатації - правильно передбачити параметри каналу і поведінку систем при різних погодних умовах.

Загасання сигналу при різних погодних явищах також досить точно моделюється. Наприклад, тумани і дощі легко формалізуються розширеною моделлю аерозольного поглинання. Насправді, така перешкода, як дощ не становить серйозної загрози для ІЧ з'єднання. Навіть опади до 75 мм/год (майже тропічна злива), при яких практично не можуть працювати радіорелейні системи в діапазонах 18-54 ГГц, не порушують роботу сучасних ІЧ бездротових каналів на робочих дистанціях.

Щоб отримати високоякісний канал передачі даних, потрібно не тільки мати хорошу ІЧ систему, необхідно ще і правильно її встановити. Є найпростіші вимоги щодо місця установки таких систем - до жорсткості опори, наприклад, облік росту дерев і т.д. Всі вони дуже прості, як і вимога правил дорожнього руху про заборону проїзду на червоне світло, але їх порушення призводить до негативних результатів і розчарувань. У використанні лазерного променя є хороший потенціал, але для отримання гарних характеристик використання ІЧ системи потрібно всеж отримати рекомендації від фахівців у даній галузі [19, 20].

Чітко спроектована і встановлена система може забезпечити високу якість каналу зв'язку з рівнем доступності 99,1 - 99,9%. Бітові помилки в

такому ІЧ каналі практично відсутні. Проте, отримати значення вище 99,97% в реальних умовах вкрай складно. Причиною цьому є птахи. Лазерний промінь може здолати практично всі погодні явища, але фізичні перешкоди - не може. Справа, звичайно, в потужності і фокусуванні променя, але з метою безпечної експлуатації щільність світлового потоку штучно обмежується. Це призводить до того, що птахи при перетині променя, короткочасно переривають канал передачі. Цифри реально досяжних рівнів доступності каналу наведені з урахуванням накопиченого досвіду експлуатації систем в середній смузі Росії. Втім, є реальний вихід з положення - застосування багатопробенемих систем. Це є дорожчий метод, але він виправдовує витрати додаткових коштів. За кожен додатковий дев'яток після коми в параметрі доступності каналу доводиться платити. Але це справедливо не тільки для ІЧ систем, але і для всіх інших систем теж.

#### 1.4 Компоненти FSO систем

Як і більшість технологій бездротової передачі даних, бездротова оптика вимагає умов прямої видимості. Дані передаються спрямованим пучком модульованого світла. В якості джерела такого світла звичайно використовуються світлодіоди (і тоді для формування променя доводиться застосовувати оптичні системи) або лазери (в цьому випадку доводиться, навпаки, боротися з точковістю джерела. Механізми поглинання світла в прозорій атмосфері багато в чому аналогічні тим, що відбуваються в оптоволокну. У результаті, в атмосфері світло поширюється в тих же вікнах прозорості - 850, 1310 і 1550 нм, що дозволяє використовувати досить поширену елементну базу, застосовувану в волоконній оптиці і запозичати частину напрацювань і технологій, на розробку яких інакше було б потрібно чималі кошти: мікролінзи, оптичні підсилювачі, спектральні маски, голографічна оптика та методи спектрального ущільнення каналів.

Загальна елементна база та принципи обробки сигналу визначають загальний діапазон швидкостей - від декількох мегабіт до терабіт в секунду.

По суті, атмосферні оптичні лінії є доповненням до оптоволоконних: цю тезу перш за все підтверджують пасивні атмосферні оптичні лінії, які не містять ніяких активних елементів. На вхід такої лінії надходить оптичний сигнал зі спеціалізованого світловоду. Прийнятий сигнал підсилюється оптичною системою і по спеціальному багатомодовому оптоволокну з малою дисперсією надходить на вхід конвертера. Відсутність активних елементів дозволяє не піклуватися про подачу електроживлення (проблеми з випаданням роси, мабуть, вирішуються за допомогою спеціальних покриттів) і мінімізувати вартість виносного блоку (по суті, який містить тільки оптичну частину, більша частина ноу-хау зосереджена в модулі спеціалізованого конвертера). Як наочний приклад: пасивні бездротові оптичні системи TereScore 1 (див. рисунок 1.3), що представляють собою набір лінз у відносно красивій коробці, забезпечують бездротову передачу даних, що подаються зі спеціалізованих інтерфейсів, зі швидкістю 100 Мбіт / с на відстані до 200-500 метрів ( в залежності від типу активного обладнання). У мінімальній комплектації такими інтерфейсами можуть бути медіаконвертери MC-102/P (10/100BaseT). Інший варіант комплекту TereScore 1 включає два приймально-передавальні пристрої TereScore 1, два відрізки спеціального оптичного кабелю завдовжки 25 або 50 м і два комутатора OptiSwitch-200 з інтерфейсами PAL і чотирма портами Ethernet 10/100 Мбіт/с. Спеціалізовані модулі розширення EM2004-2PAL для комутаторів OptiSwitch випускаються у варіантах для відстаней роботи до 200 м (модель EM2004-2PAL/A) і до 500 м (EM2004-2PAL/C). Реалізована в них підтримка (QoS) забезпечує поділ смуги пропускання мережі на потоки з гарантованою доставкою пакетів і певною швидкістю (від 1 Кбіт с до 1 Гбіт/с).



Рисунок 1.3 – Оптична система TereScope 1

У більш загальному випадку атмосферні бездротові оптичні (інфрачервоні) системи містять активне обладнання.

Неліцензованість, а по суті - необмеженість використовуваного оптичного частотного спектру дозволяє не вдаватися до складних схем модуляції - більшість ІЧ систем використовує найпростіше кодування за принципом «включено/вимкнено» (On-Off Keying, ООК) – точно такий же, що використовується у волоконно-оптичних системах передачі даних. Загальний метод модуляції дозволяє реалізувати прозорість ІЧ систем для різних протоколів передачі даних (АТМ, Ethernet, Feber Channel, і т.д.) і використовувати, по суті, загальну елементну базу.

Проста калькуляція - два медіаконвертера загальною ціною в 200-300 доларів і набір оптики, нехай навіть ціною близько 300 доларів за комплект, дозволяють припустити, що вартість атмосферної оптичної лінії може бути вже зараз у межах однієї тисячі доларів. Життя, між тим, показує протилежне: ціни починаються з позначки 2-2,5 тисяч доларів, з середнім значенням близько 4-5 тисяч доларів за лінію зі швидкістю 100 Мбіт/с. Настільки вражаючий розрив обумовлений, на жаль, вартістю входять до рішення ноу-хау і витратами на розробку і все ще відносно низькими обсягами виробництва [14].

Разом з тим, визначальний вплив на перспективи застосовуваних мережеских рішень все ще має американський ринок, на який зараз виходять бездротові рішення, що використовують неліцензовані діапазони частот 2,4 і 5 ГГц і забезпечують реальні швидкості передачі даних на рівні 25-30 Мбіт/с. Можна припустити, що результатом намічається конкуренції може стати значне зниження цін на атмосферні лінії, особливо з урахуванням того, що витрати на розробку, як правило, вже неодноразово окупилися.

Побудова всіх ІЧ систем передачі практично однакова - інтерфейсний модуль, модулятор випромінювача, оптична система передавача, оптична система приймача, демодулятор приймача і інтерфейсний блок приймача. Але всі системи з технологічною ознакою можна розділити на дві групи. Одна група, яка використовує напівпровідникові ІЧ діоди (з випромінюванням з поверхні), а друга група, яка використовує для випромінювання напівпровідникові ІЧ лазерні діоди (з випромінювання з торця переходу). Головна відмінність систем позначається на їх головних характеристиках - швидкості і дальності передачі. Перша група - це в основному системи до 1 км зі швидкостями до 20 Мбіт/с, друга - забезпечує значно більші дальності передачі, в залежності від погодних умов і вимог до якості каналу, зі швидкостями до 622 Мбіт/с (комерційні системи) або до 10 Гбіт/с (досвідчені системи). Головна перевага н/п діодів - високий час напрацювання на відмову. Величина в 400,000 годин при потужності в 400 мВт тут не рідкість. Крім того, канали, що використовують н/п діоди менш чутливі до резонансного поглинання в атмосфері завдяки широкій смузі випромінювання (типіві значення близько 50 нм). Форма перерізу променя від н/п діодах практично кругла. Але тут всі переваги н/п діодів закінчуються. Тобто починаються недоліки. Інерційність н/п діодів при високих потужностях випромінювання не дозволяє досягти високих швидкостей передачі. В наслідок широкої смуги випромінювання існують складнощі (правда, чисто теоретично) у передачі високошвидкісного сигналу - різні моди сигналу добираються до приймача з різною затримкою і на великих дистанціях і дуже високих швидкостях сигнал

на виході приймача розпізнати вже вкрай складно. Тобто передавач повинен передавати більш вузький сигнал з найменшою кількістю мод. В ідеалі це повинна бути одна мода. Такими, або близькими до таких, характеристиками володіють лазерні діоди. Однак при такій передачі не можна забувати, що ця єдина мода може потрапити на смугу резонансного поглинання якогось газу в атмосфері, і тоді всі плюси лазерних діодів обернуться явними мінусами. При правильному виборі компонентів потенційні можливості розвитку систем з застосуванням лазерних діодів виглядають вражаюче. Час напрацювання на відмову для лазерних діодів потужністю 1000 мВт і вище вже досягло рівнів 130,000 годин [9].

І все ж, у лазерних діодів є один природжений недолік - сильно виражена еліптичність променя. Для боротьби з цим недоліком застосовують різні методи - від вельми коректних - оптичних систем з призматичними лінзами, до грубих - обмеженням апертури оптичної системи з неминучою втратою частини потужності.

Однак, світ не тільки чорно-білий. Є проміжна група систем, що використовують для передавачів VCSEL лазерні. Ці пристрої володіють перевагами як лазерних діодів - вузька смуга випромінювання (у деяких режимах - лише одна мода), так і перевагами н/п діодів - високий час напрацювання на відмову, кругла форма перетину променя. Але нічого не буває безкоштовно. Жертвою є доступна потужність випромінювання. Сьогодні вона не перевищує 7 мВт на діод в багатомодовому режимі, тому, для збільшення вихідної потужності застосовують кілька випромінювачів, що працюють синхронно. Але тут вже починаються інші складності, тому що забезпечити абсолютну синхронність з мінімальними фазовими зсувами дуже складно. З розвитком технології, перспективи VCSEL діодів стають менш впливовими.

Всі ІЧ системи передачі зовні дуже схожі. Однак параметри систем значно відрізняються. Вся справа, звичайно, в збалансованому виборі параметрів. На відміну від багатьох інших систем, тут дуже важлива саме

збалансованість. За прикладом ходити далеко не треба. Багато розробників прагнуть підвищити дальність шляхом зменшення кута розбіжності променя, доводять його до таких величин, коли навіть мікровібрацій будівель і конструкцій від стоять поряд з дорогою, вітрового навантаження може призвести до розладу системи. На практиці, величина кута розбіжності променя менше 2 Мрад стає непринятною для дуже багатьох умов експлуатації. Деякі російські та зарубіжні системи нехтують цим недоліком. Занадто ж велике розкриття променя призводить до неефективного використання світлового потоку.

Якщо говорити про найбільш ефективні системи на сьогоднішній момент, тобто ті які забезпечують високі швидкості передачі на великі (для ІЧ систем) відстані, то тут не можна не відзначити досягнення фірми PAV Data Systems Ltd. Завдяки найвищій енергоозброєності променя, оригінальною технологією отримання круглого перетину променя та збалансованості параметрів, зараз серійно випускаються системи на 622 Мбіт/с, дальність систем перевищує 6 км з досить високим коефіцієнтом готовності для умов середньої смуги Росії. Такі параметри отримані завдяки великому досвіду роботи фірми в даній області і, напевно, найбільшою встановленою базі систем (більше 5000). Тут немає нічого фантастичного. Просто для передачі використовується система з 3-х лазерів, кожен із середньою потужністю 100 мВт, та високочутливі APD (лавинні) фотодіоди в приймачі. Всі високошвидкісні системи використовують лавинні фотодіоди, а низькошвидкісні звичайні кремнієві фотодіоди p-i-n, у яких чутливість майже на порядок нижче.

Застосування новітньої технології мультиплексування по довжині хвилі, реалізованої в оптоволоконних системах, не має принципових обмежень на застосування її в бездротових ІЧ системах передачі. Перші кроки в цьому напрямку вже зроблені. Першопрохідником виявилася компанія Lucent Technologies зі своїм досвідченим продуктом WaveStar OpticAir, що забезпечує швидкість передачі до 10 Гбіт/с на чотирьох довжинах хвиль.

## 1.5 Аналіз сучасних ІЧ систем лазерного зв'язку

За останні роки склад виробників на ринку FSO систем істотно змінився. Колишні активні лідери SilCom і ATSchindler почали відставати від загального розвитку ринку (ATSchindler сильно затримався з впровадженням лазерних систем і зараз куплений компанією Plaintree Systems); колишній Eagle Optoelectronics перегрупувався і перейменувався у Lightpointe Communications, з'явилися нові виробники - Astroterra і Jolt, які в свою чергу встигли об'єднатися в компанію Optical Access, LSA Photonics. Серед лідерів дуже помітний PAV Data Systems. Також, поки не випускається серійно обладнання WaveStar OpticAir компанії Lucent Technologies.

При порівнянні різних систем спираючись тільки на заявлені виробниками дані зробити це практично неможливо. Так, наприклад, такий ключовий параметр як максимальна дальність системи інтерпретується кожним виробником по-різному і більшість прагнуть цю величину показати в найбільш вигідному для себе світлі, тобто за гарних погодних умов. З іншого боку, деякі компанії дають максимальну відстань для заданих значень доступності каналу для середніх широт, як, наприклад, PAV Data Systems і CableFree, або наводять відстані для різних загасань сигналу, як, наприклад, Optical Access.

Таким чином, відійдемо від традиції вказувати параметри відстані систем, заявлені виробниками і застосуємо до цих систем для порівняння один і той же метод її визначення на одній і тій же "еталонній" погоді. Можливо, абсолютні значення отриманих параметрів і можуть викликати питання про коректність моделі, але для порівняння отриманих параметрів між собою цей підхід можна визнати єдиною доступним і доцільним. Для розгляду виберемо системи з інтерфейсом Ethernet, тому що вони є у всіх виробників.

У таблиці 1.1 представлено кращі моделі від кожного з виробників і запропонована мною. У програмах випуску присутні і більш "слабкі" моделі,

але нашим завданням не було порівняння абсолютно всіх систем, а тільки найкращих досягнень в даному секторі ринку.

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики обладнання систем атмосферного оптичного каналу зв'язку

Фірма	Країна	Модель	Тип випромінювача	Час напрацювання на відмову, год	Середня потужність випромінювача, мВт	Кут розх. променя, мрад	Максимальна дистанція при еталонній погоді, м
fSONA Networks	Канада	SONAbeam™ 1250-M	4 х н/п лазери	100 000	160	1.5	4800
Wireless Excellence	Великобританія	CableFree FSO	Лазер	100 000	37	0.5	3000
LightPointe	США	FlightStrata 1GE	4 х н/п лазери	120 000	60	3	1500
EC System	Чехія	EL-10G	Лазер	100 000	80	1.2	
Optical Access	Ізраїль	Ether Link TS10/ Eth	4 х VCSEL лазери	70 000	14,5	2,5	1330
Light Pointe Communications	США/ Німеччина	MultiLink 20/4000	2 лазери	Немає даних	10	3	1640
Mostcom	Польща	FOD-1000	лазер	70 000	20	5	1000
Silcom Manufacturing Technology Inc.	Канада	FreespaceFibre	Лазер	Немає даних	20	8,7	730
Alphabet	США	Taara Lightbridge	Лазер	Немає даних	320	3	5000
Запропонована система	Україна	ВНТУ	Лазер	100 000	150	4	2000

Дуже потужними системами є системи виробника fSONA Networks. Ці системи мають найвищу вихідну потужність, зберігаючи при цьому відповідність жорстким вимогам безпеки виробів, і мають одні з найефективніших приймачів сигналу. Фактично, вони є найбільш

енергоозброєними системами (з самим високим динамічним діапазоном). У системах застосовано унікальну високоефективну систему коригування еліптичності променя. Навіть при злегка розширеному промені для більшої стабільності передачі в порівнянні з іншими системами, потужності світлового потоку і чутливості приймача вистачає для безперебійної роботи в складних умовах на дистанціях більше 2.5 км. Ці системи вже мають велику базу встановленого обладнання в різних країнах з різними погодними умовами, у тому числі й у самій Великобританії, відомої своєю поганою погодою і туманами.

Доброю недорогою системою є обладнання серії FOD-1000. Висока надійність н/п випромінюючих діодів дозволяє використовувати їх у комерційних мережах. Але, без серйозної переробки конструкції навряд чи вдасться домогтися дистанцій більше 1 км і швидкості більше 10 Мбіт за рахунок обмежень, накладених типом випромінювача. Ці системи поки що реально доступні тільки з інтерфейсами Ethernet 10 Мбіт/с.

Alphabet у 2021 році запустила проект Таара для передачі даних повітрям із використанням лазерів. За прямої видимості передача даних у межах одного каналу можлива на відстані 20 км при швидкості до 100 Гбіт/с. У рамках тестування в Індії та Африці фахівцям проекту вдалося передати понад 700 ТБ даних на відстань у 5 км. При порівнянні, для досягнення такої ж ефективності на місці довелося б прокласти понад 400 км оптоволокна.

## 1.6 Технічні характеристики та класифікація сучасних FSO систем

На сьогоднішній день на ринку представлено багато моделей FSO систем, які можна поділити за такими характеристиками:

1. Робочий діапазон довжин хвиль: (700 – 900 нм, 1300-1550 нм).
2. Ширина пропускання каналу: 10 Мбіт/с, 34 Мбіт/с, 100 Мбіт/с, 155 Мбіт/с, 10-156 Мбіт/с, 2-622 Мбіт/с, 1,25 Гбіт/с, 2,5 Гбіт/с, 10Гбіт/с.
3. Тип випромінювача. Н/п лазери (від 1 до 8 в одному пристрої).

4. Потужність сигналу на виході - коливається від 50 до 250 мВт.
5. Рекомендована дистанція - 2000 - 4000 м (PAV Data Systems, Великобританія).
6. Кількість помилок,  $BER < 10^{-9}$  (BER – співвідношення кількості втрачених бітів до загального числа переданих бітів).
7. Технологія другого каналу. Використовується наприклад дублююча радіосистема, яка працює коли перешкоди на шляху основного каналу роблять неможливою нормальну його роботу [12].

Проаналізувавши технології FSO систем, складено загальну класифікацію (див. рисунок 1.4).

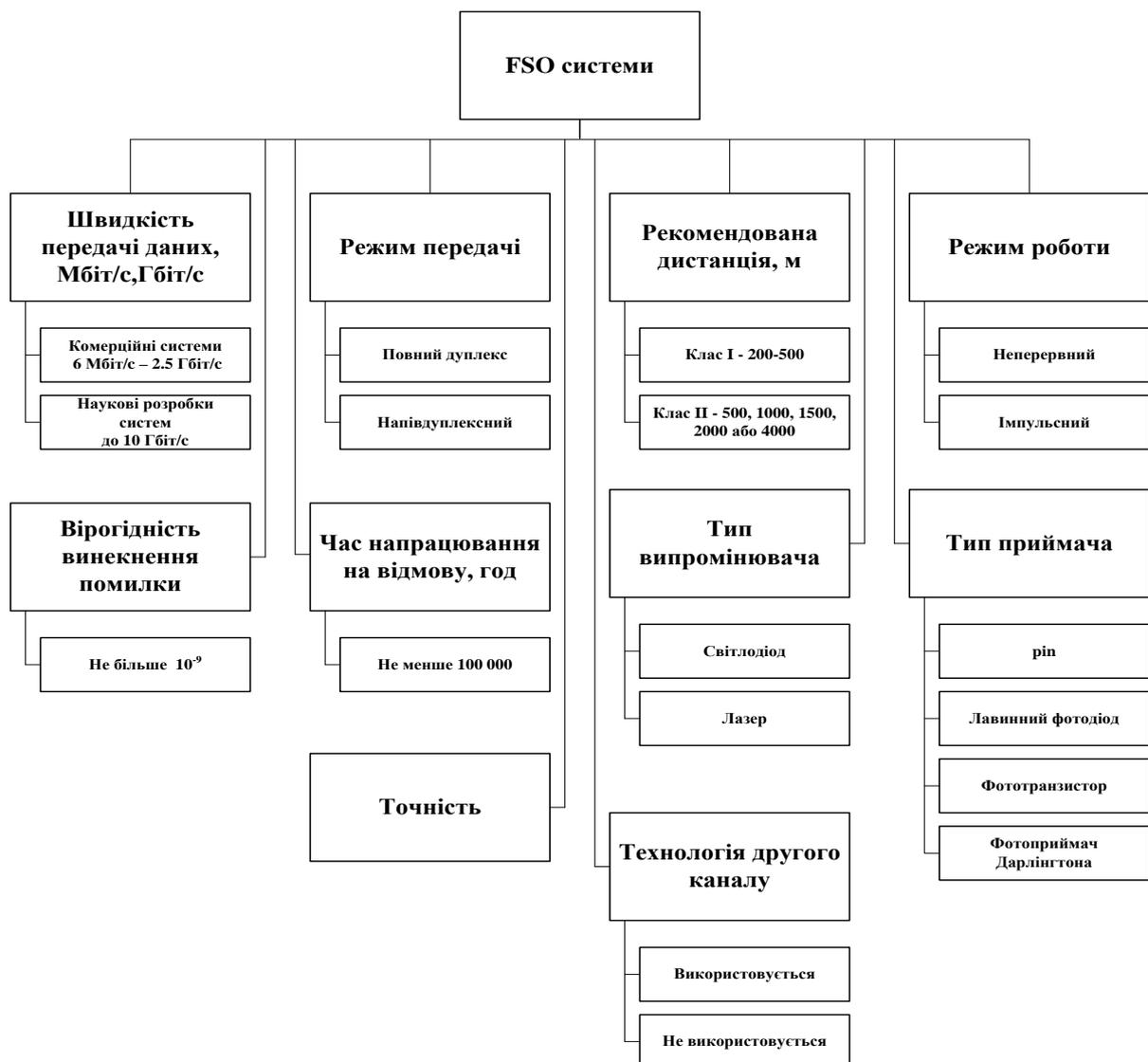


Рисунок 1.4 – Класифікація FSO систем

## 1.7 Технічні вимоги до адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку

Дослідивши ринок систем атмосферного оптичного зв'язку, зроблено висновки. Існує певна кількість проблем, які пропонується вирішити за допомогою розробки адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку. Така система виконуватиме управління потужністю випромінювання та розмірами апертури приймача в залежності від атмосферних умов (наприклад, в ясну погоду потужність випромінювання мінімальна). Отже така адаптивна система дозволить продовжити термін життя лазерних пристроїв і підвищити їх надійність.

Було сформульовано вимоги до розроблюваної адаптивної FSO системи:

1. Швидкість передачі даних 100 – 200 Мбіт/с.
2. Час напрацювання на відмову не менше ніж 100 000 год.
3. Середня потужність випромінювача 150 мВт.
4. Кут розходження променя 4 мрад.
5. Відстань передачі даних 1000 м.
6. Діаметр пучка – до 20 см.
6. Наявність адаптивного блоку.

Тобто розробивши таку адаптивну систему яка відповідатиме поставленим вимогам ми плануємо усунути ряд проблем які зараз існують на ринку FSO систем і є достить актуальними. Зможемо забезпечити безперервну роботу каналу при ускладнених атмсферних умовах.

## 2 МЕТОДИ І ТЕХНОЛОГІЇ АДАПТИВНИХ ВІДКРИТИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

### 2.1 Технології FSO систем

Оптичний зв'язок здійснюється шляхом передачі інформації за допомогою електромагнітних хвиль оптичного діапазону. Атмосферні оптичні системи передачі привертають велику увагу дослідників за останні 10 років в якості доповнення до радіочастотного (РЧ) зв'язку. Бездротовий оптичний канал має широкую смугу пропускання і може підтримувати набагато більше користувачів, ніж канал РЧ канал. Наявність оптичних елементів, які використовуються в області волоконної оптики робить зовнішні оптичні лінії зв'язку економічно-ефективними для високошвидкісної передачі голосових та інших інформаційних даних.

Зв'язок у FSO каналі досягається за допомогою з'єднання «точка-точка» двох оптичних передавачів, які знаходяться в області прямої видимості. Оптичні хвилі, що розповсюджуються в повітрі випадково змінюють свою фазу та амплітуду через вплив турбулентності. Турбулентність виникає за рахунок флуктуації показника заломлення середовища. В останніх дослідках виявлено, що вона виникає також від градієнтів температури за рахунок сонячної енергії нагрівання і вітру.

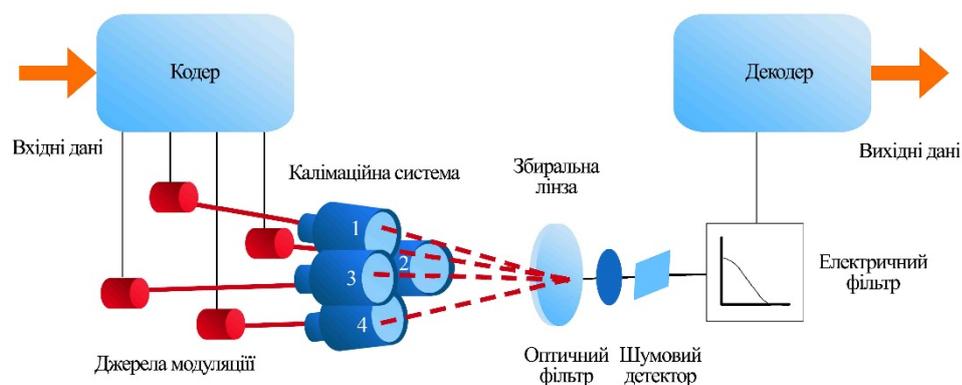


Рисунок 2.1 – Модуляція та кодування у атмосферному оптичному каналі

Основні FSO системи із типом з'єднання «точка-точка» (див. рисунок 2.2) складається з передавача, середовища розповсюдження і приймача. Типові оптичні передавачі включають напівпровідниковий лазер високої потужності і широкої смуги пропускання, а також телескопічну систему, в якій використовуються лінзи чи параболічні дзеркала. Код з низькою щільністю перевірок на чесність (LDPC-код, Low-density parity-check code) кодує електричний потік з мережевим трафіком у змодульований джерелом світла потік. Модульований пучок далі підсилюється і направляється у бік приймача. На приймальній стороні, телескоп звужує модульований сигнал світла та оптичний детектор перетворює його назад у електричний сигнал. PIN фотодіоди або лавинні фотодіоди, як правило, працюють в якості оптичних детекторів. При поширенні в атмосфері модульованого пучка світла відбувається зміна амплітуди та фази в результаті розсіювання, заломлення створеного атмосферою турбулентністю, поглинання, фізичних перешкод і хитання споруд. Після фото-детекції, електричний сигнал оцифровується і поступає на ітераційний LDPC декодер [1].

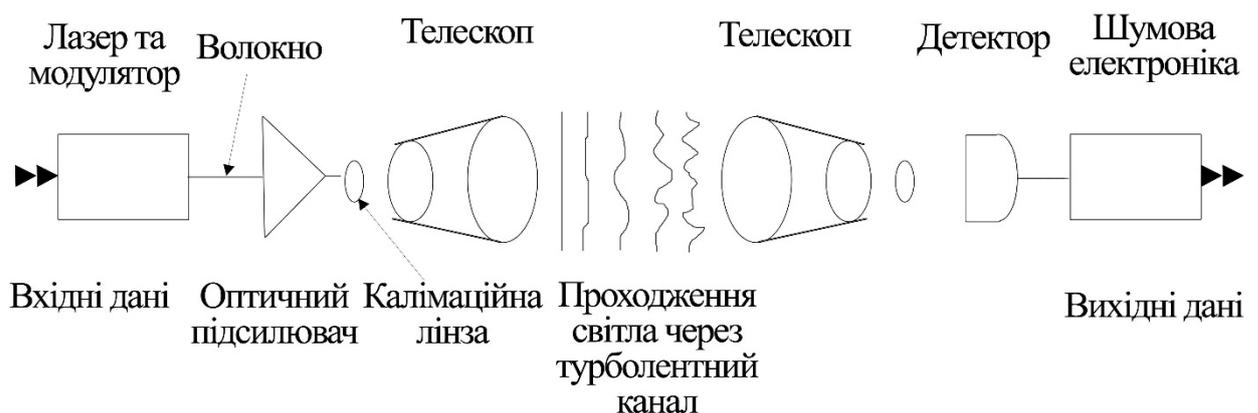


Рисунок 2.2 – FSO система із типом зв'язку «точка-точка»

2.2 FSO система з використанням методу поляризаційної модуляції для зменшення рівня шумів

Коливання інтенсивності лазерного випромінювання в атмосфері призводить до викривлення амплітуди модульованого сигналу, який є найпростішим методом модуляції. Для того, щоб компенсувати коливання амплітуди, необхідно розробити таку FSO систему, в якій рівень мультиплексного шуму знижується за рахунок обробки сигналу в приймачі. У цьому випадку поляризаційна модуляція використовується з тих пір, коли приймач не приймає оптичну хвилю. На рисунку 2.3 наведена функціональна схема FSO системи з використанням поляризаційної модуляції.

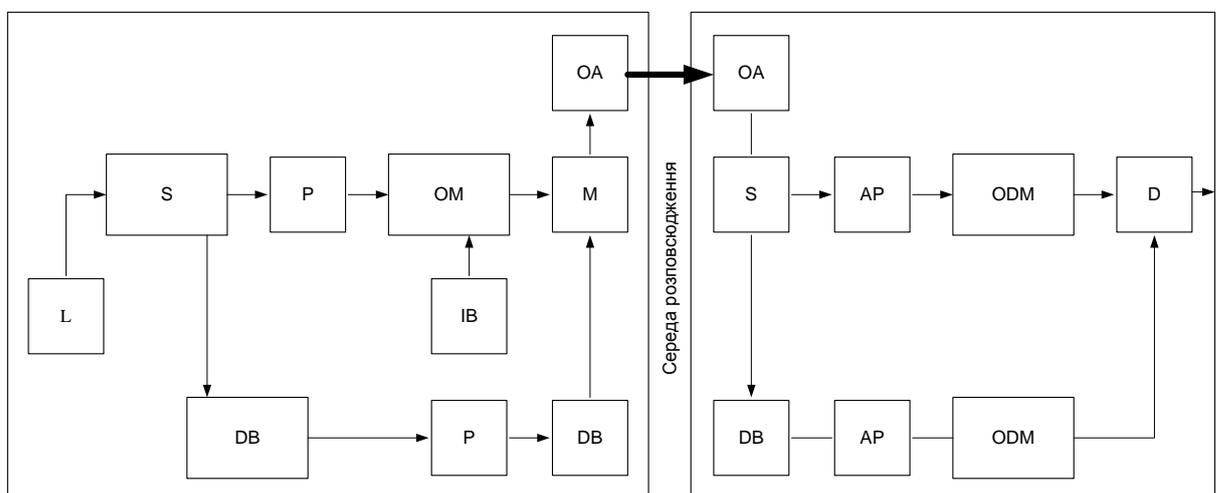


Рисунок 2.3 – FSO канал з використанням поляризаційної модуляції

Не поляризований лазерний промінь  $L$  проходить через розділювач  $S$  і розпадається на два промені. Перший промінь проходить через поляризатор  $P$ , оптичний модулятор  $OM$ , в якому модуляція змінюється в залежності від інформаційного сигналу, що приходить з інформаційного блоку  $IB$ , далі промінь проходить через об'єднувач  $M$ . Другий промінь направляється до блоку відхилення  $DB$ , потім проходить через поляризатор  $P$ , який перетворює його в ортогональну поляризацію першого променя. Після чого промінь проймає знову до блоку відхилення  $DB$ , а потім до об'єднувача  $M$ , де два промені об'єднуються і далі випромінюються через оптичну антену  $OA$ .

Приймач на іншій стороні отримує атмосферний промінь, який містить інформаційний сигнал  $S(t)$  і мультиплексний шум  $N_M(t)$  на оптичній антені. Далі цей сигнал прямує до розділювача, де він розділяється на дві частини. Після чого перший промінь проходить через поляризаційний аналізатор, а потім через оптичний демодулятор, де  $S(t)N_M(t)$  сигнал відділяється. Крім того, він іде на перший вхід розділювача променя, який ділить  $S(t)N_M(t)$  з  $N_M(t)$ , а потім ділить окремі інформаційного сигналу  $S(t)$ . Основним недоліком цієї системи, як показує аналіз, є те що вона має низьку спроможність зменшення шуму [2].

### 2.3 FSO канал з усуненням мультиплексного і додаткового шуму

Необхідно створити таку FSO систему, яка усуває не тільки мультиплексний шум, але й додатковий шум. Додатковий шум може бути усунений шляхом введення другої оптичної антени у приймачі поруч із першою (див. рисунок 2.3). Друга оптична антена повинна бути повністю ідентична першій за всіма параметрами, але вона розташовується на такій відстані, щоб інформаційний сигнал входив в зону її прийому. Враховуючи, що додатковий шум в FSO системах індукований в основному розсіюванням випромінювання з різних не локалізованих джерел простору (фонового випромінювання), то можна припустити, що додатковий шум  $N_A(t)$  на вході обох оптичних антен буде одноковий.

Лазерний промінь, який поширюється через атмосферу піддається модуляції інформаційного сигналу  $S(t)$  і мультиплексному шуму  $N_M(t)$ , а потім разом з додатковим шумом  $N_A(t)$  потрапляють на першу оптичну антену та розділювач, де він ділиться на два промені.

Після спрямованого з аналізатора поляризації променя до демодулятора, він виділяє сигнал такого виду.

$$U(t) = S(t) N_M(t) + N_A(t), \quad (2.1)$$

який потім прямує до першого суматорного пристрою.

Другий промінь, який є ортогональною поляризацією першого променя, переходить до другого аналізатора поляризації, отже, вихідний сигнал другого демодулятора складатиме суму від шумів оскільки інформаційний сигнал не був прийнятий на другій антені.

$$V(t) = NM(t) + N_A(t) \quad (2.2)$$

Ця сума шумів в кінці кінців переходить до другого суматора.

За схемою другої оптичної антени вона повинна включати демодулятор, який ізолює додатковий шум  $N_A(t)$ , зміщувач фази, який змінює її на  $180^\circ$  і розгалужувач, який додає до обох суматорів електричним сигналом еквівалентний  $N_A(t)$ .

В результаті на виході першого суматора отримаємо

$$U_1(t) = S(t) + NM(t). \quad (2.3)$$

а виході другого

$$U_2(t) = NM(t). \quad (2.4)$$

Потім обидва сигнали  $U_1(t)$  і  $U_2(t)$  переходять до дільника сигналу, де  $U_1(t)$  поєднується з  $U_2(t)$ , отже, мультиплексний шум усувається.

## 2.4 FSO система з використанням просторового розділення каналів

Складні завади атмосферних коливань вносять шум в передачу сигналу між різними каналами системи АОЛЗ. В системах АОЛЗ може бути використано просторово розділений канал, щоб зменшити такий ефект (див. рисунок 2.4).

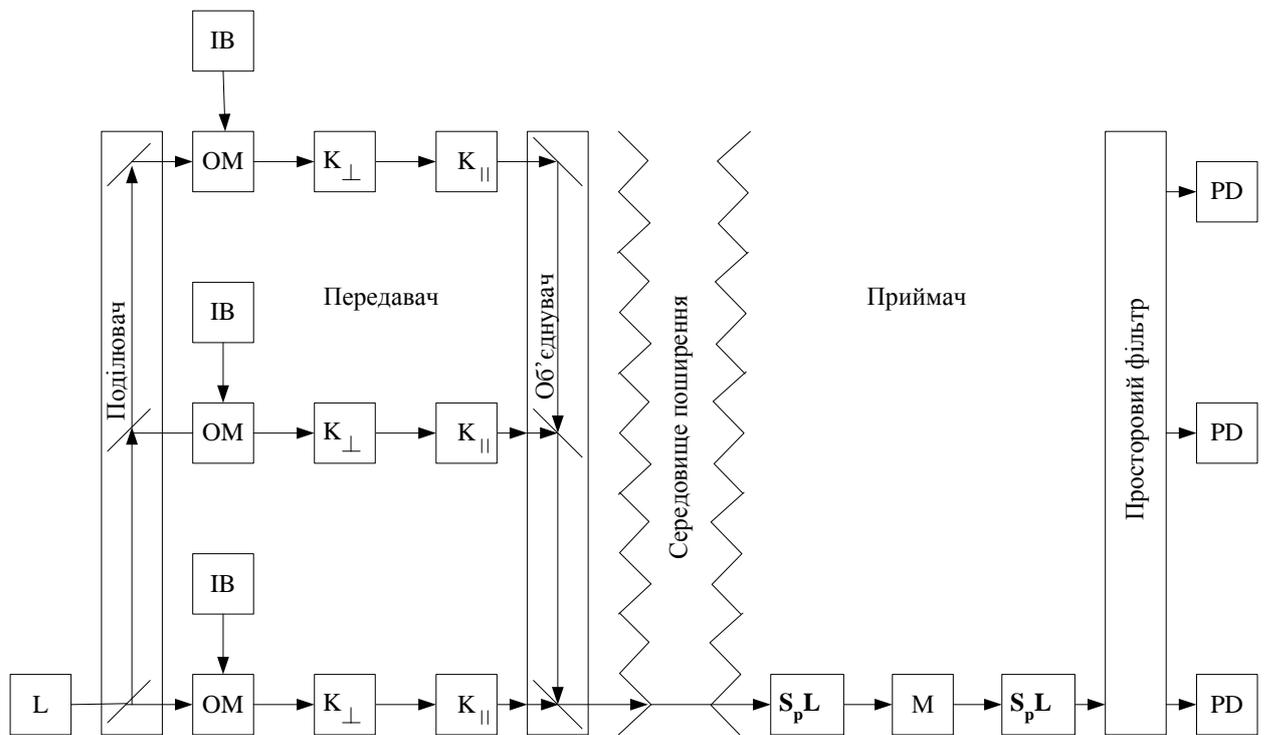


Рисунок 2.4 – Структурна схема системи АОЛЗ із просторовим розділенням каналів

Основною його особливістю є наявність двох взаємно перпендикулярних оптичних просторових кодерів, які модулюють інформаційний сигнал з джерела сигналу за допомогою фазової модуляції. Фаткорами передачі для двох кодерів є ортогональна функція.

Лазерний промінь ділиться на  $N$  променів відповідно до числа каналів. Кожен промінь проходить через модулятор  $OM$ , де інформаційний сигнал, що надходить від джерела  $S$  модулюється і потім проходять через два просторових взаємоперпендикулярних кодери  $K_{\perp}$  і  $K_{\parallel}$ . Фазова модуляція використана для того, щоб мати змогу використати закон проходження променя в просторі вздовж  $X$  і  $Y$  координат відповідно. Після цього промені об'єднуються об'єднувачем (мультиплікатором) після чого загальний промінь випромінюється в атмосферу [4].

Промінь в приймачі зазнає подвійного перетворення Фур'є, яке виконується сферичним лазером  $S_pL$  відповідно до Фур'є-спектрів в фокусі

плоскої лінзи. Матриця  $M$  є подвійним просторовим голографічним фільтром. Повні матриці фільтрів записані на єдиній голограмі з двох різних випадкових кутів відповідного променя.

Фактор передачі кожного фільтру з матриці приймає наступну форму:

$$K_i(w_x, w_y) = C \cdot \frac{T_i^*(w_x) \cdot T_i^*(w_y)}{W(w_x, w_y)}, \quad (2.5)$$

де  $T_i^*(w_x), T_i^*(w_y)$  – комплексні просторові спектри, які є кратним числу кодерів  $K_{\perp}$  і  $K_{\parallel}$  відповідно;

$W(w_x, w_y)$  – спектральна енергетична густина шуму;

$X$  та  $Y$  – миттєві координати;

$C$  – константа.

Фільтр з таким фактором передачі, що відповідає  $i$ -тому кодеру  $K_{\perp}$  і  $K_{\parallel}$  теоретично, має максимальне співвідношення сигнал/ шум (SNR).

Після матриці  $M$  одержаний промінь ділиться на  $N$  променів з кутом відхилення від оптичного еквівалента осі на різні кути  $\phi_i$  відповідного променя в записувальному фільтрі. Кожен окремий промінь формує канал і ці канали відокремлені завдяки використанню відповідного фільтру, що означає, що шум передачі між каналами має теоретичний обмежений мінімальний рівень.

Потім сферична лінза  $S_pL$  виконує зворотне перетворення Фурьє фільтрованих  $N$  променів, і результатом є формування точок світла в фокусній площині, яка знаходиться в задньому фокусі.

Світлові точки відповідають різним каналам і є наочною реалізацією двох просторових взаємоскорельованих функцій, які по суті є об'єднанням функцій фактора передачі кодерів  $K_{\perp}$  і  $K_{\parallel}$  при чому фактор передачі кожного  $i$ -го каналу відповідає просторовому голографічному матричному фільтру. Ці

канали потім розділяються просторовим фільтром і ми отримуємо промінь на фотодіоді PD.

## 2.5 Адаптивна FSO система зі зниженням шуму

Адаптивний метод використовується для зниження рівня шуму в системах АОЛЗ. Цей метод може використовуватися для передачі як дискретної так і цифрової інформації. На рисунку 2.5 показано повнодуплексна оптична система зв'язку

Така система складається з двох ідентичних модулів передавач-приймач. Головними елементами такої системи є:

1. Оптичний модулятор ОМ, що модулює лазерний промінь відповідно до інформаційного сигналу, який поступає з запам'ятовуючого пристрою МУ. Таким чином гарантується умова незалежності частоти модуляції від частоти дискретного сигналу, що надходить від джерела. Частотна модуляція залежить від типу частотного генератора G, який формує частоту на якій зчитується інформація з запам'ятовуючого пристрою.

2. Блок прийняття рішень ДВ, який знаходиться в приймачі. Цей блок приймає рішення згідно заданого оптимального критерію. Сигнали від адаптивного блоку також надходять до блоку прийняття рішень як показано на рисунку 6.

На рисунку 2.6 показано усі компоненти адаптивного блоку. Частина енергії, одержаної від лазера надходить до автокорелятора АС, потім на приймальній апертурі вимірюється, фазова (або амплітудна) просторова автокореляційна функція  $V(\rho)$  оптичного поля. Потім сигнальний еквівалент функції  $V(\rho)$  надходить до перетворювача сигналу ST, де визначається функція плоского спектрального коливання атмосферного індексу заломлення.

Після розділення в поділювачі сигнал поступає до обчислювального блоку СВ, де вираховується середня інтенсивність прийнятого лазерного

випромінювання, після чого інформація поступає до обчислювального блоку СВ1, а потім знову до блоку прийняття рішень [8].

Решта з поділених променів поступає до обчислювального блоку СВ2 на виході якого маємо сигнал пропорційний четвертому рівню функції когерентності  $\Gamma^4$ , потім сигнал надходить до обчислювального блоку СВ3, після чого на виході приймача обраховується співвідношення сигнал/шум SNR (Signal To Noise Ratio) за відомою функцією  $\Gamma^4$  і середньою інтенсивністю.

Обчислення SNR є головним завданням такого адаптивного блоку. Потім SNR надходить до пристрою управління СУ, в якому формується контрольний сигнал тактової частоти  $fT$ . Після цього сформована тактова надходить до контрольного входу генератора G.

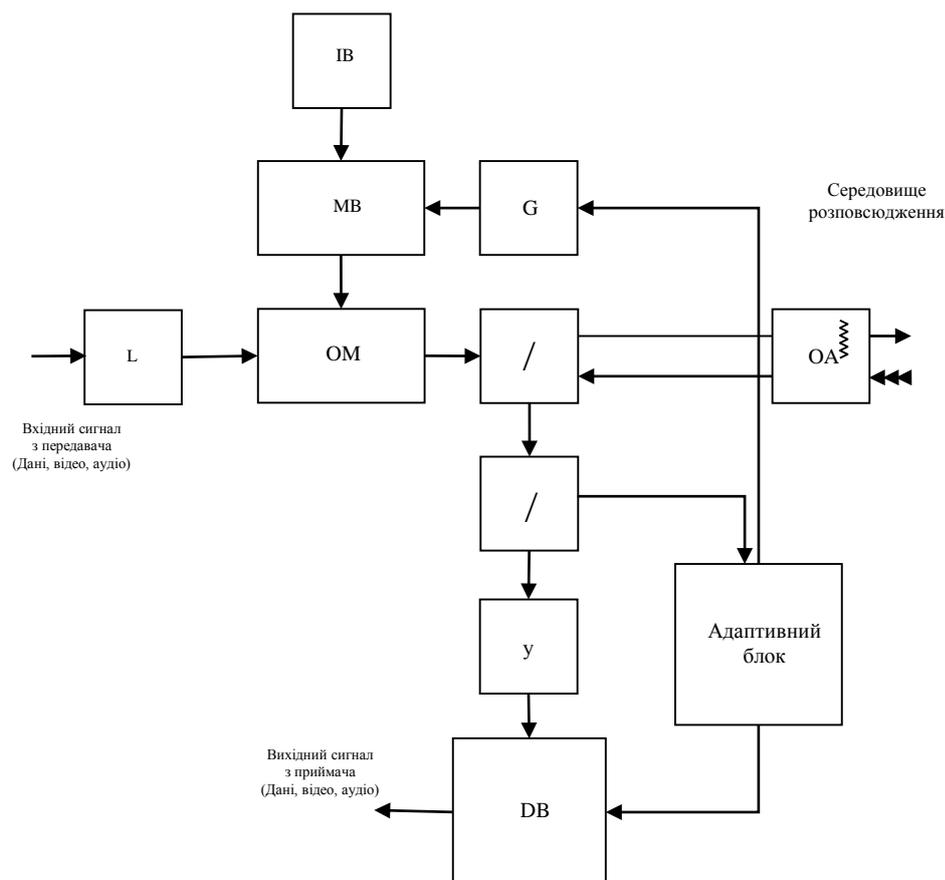


Рисунок 2.5 – Приймально-передавальний блок

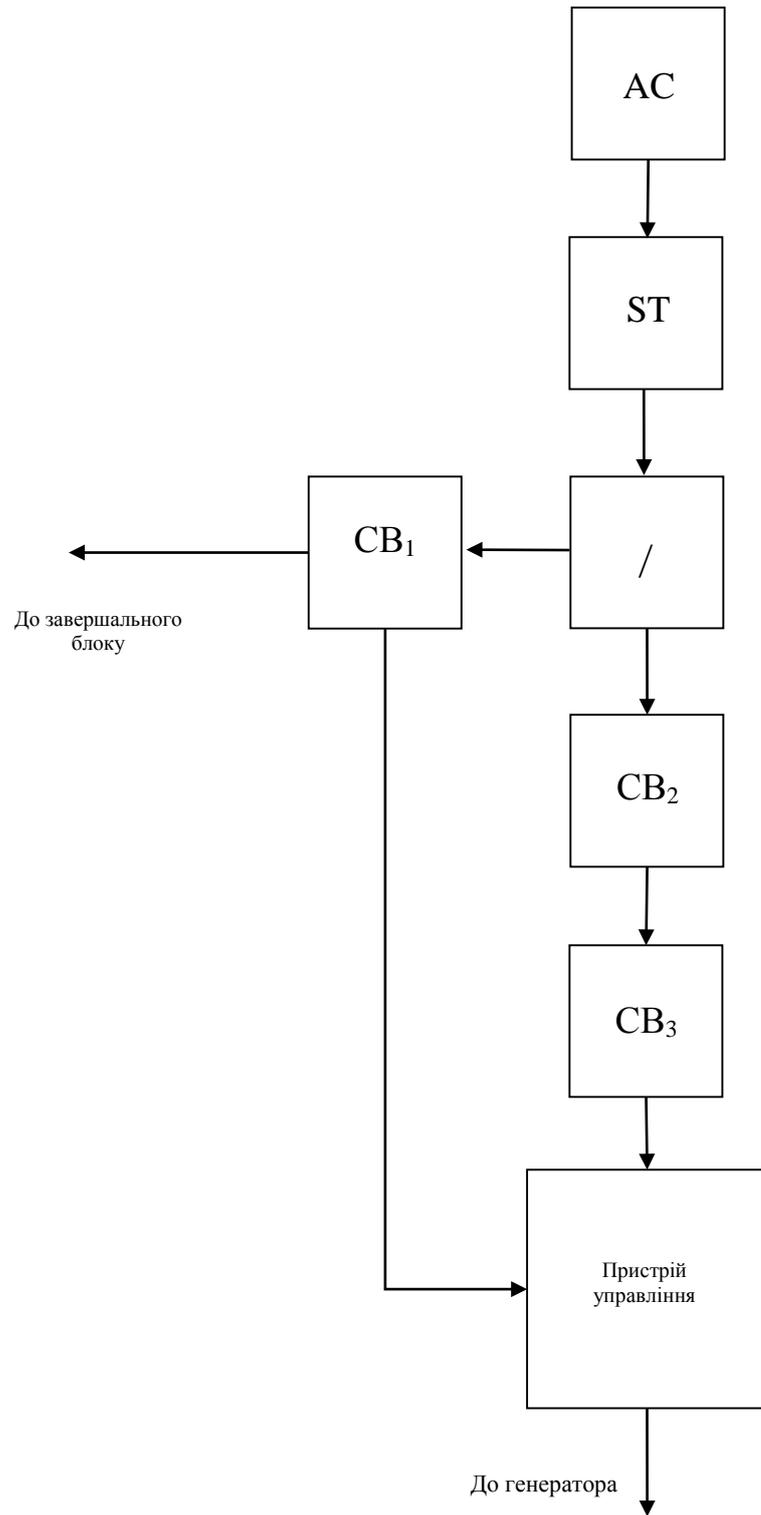


Рисунок 2.6 – Адаптивний блок

## 2.6 Вплив атмосфери на роботу FSO систем

Для успішного застосування АОЛЗ і передачі інформації лазерним променем необхідно враховувати залежність пропускання оптичного випромінювання від стану повітряного середовища. Тому були проведені комплексні дослідження поширення лазерного випромінювання в атмосфері [10-11].

Поширення лазерного випромінювання в атмосфері супроводжується цілим рядом явищ лінійної і нелінійної взаємодії світла із середовищем. При цьому жодне з цих явищ не виявляється окремо. По чисто якісних ознаках зазначені явища можна розділити на три основні групи: поглинання і розсіювання молекулами газів повітря, ослаблення на аерозолях (пил, дощ, сніг, туман) і флуктуації випромінювання на турбулентностях атмосфери.

Поглинання світлового потоку видимого й інфрачервоного діапазонів визначається, насамперед, молекулярним поглинанням, вкрай нерівномірним по частоті. Воно максимально на резонансних частотах молекул повітря, води, вуглекислого газу, озону й інших компонентів атмосфери.

На рисунку 2.7 приведений спектр поглинання сонячного випромінювання з малою спектральною роздільною здатністю. Кожна з зображених тут смужок, як правило, є результатом накладення і перекриття декількох смуг як одного й того самого газу, так і різних газів. В різних атмосферних умовах і різних регіонах подібні графіки будуть розрізнятися через різний вміст водяної пари і інших компонентів повітря. Є ділянки спектра, де поглинання незначне. Вони називаються вікнами прозорості. Однак при більшій роздільній здатності й у вікнах прозорості існують цілі сукупності різних смуг поглинання.

Якщо довжина хвилі лазера відома, то поглинання його випромінювання може бути заздалегідь визначене для будь-яких реальних умов в атмосфері.

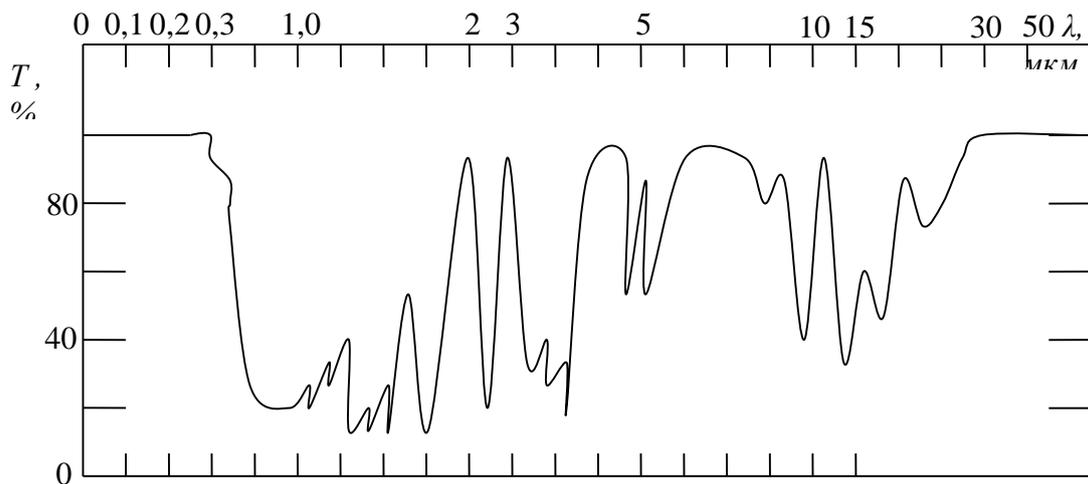


Рисунок 2.7 - Залежність поглинання  $T$  в атмосфері від довжини хвилі сонячного випромінювання.

Якщо лазерне випромінювання попадає в центр сильної лінії спектра, то воно поглинається атмосферою на 100% навіть на невеликій відстані. Тому для АОЛЗ варто брати лазери з випромінюванням, що знаходиться на ділянках спектра атмосфери, зайнятих широкими вікнами прозорості або в проміжках між слабкими лініями поглинання, у мікрівікнах прозорості.

При цьому частота випромінювання повинна бути стабілізована з досить високою точністю, особливо якщо вона знаходиться на близькій відстані від лінії поглинання газів.

Крім молекулярного поглинання поширенню променів заважає молекулярне розсіювання променистої енергії мікрозгустками молекул повітря, що мають різну щільність і різні показники заломлення. Ці неоднорідності в газовому середовищі досить нестабільні і залежать від місцевих температурних умов, часу року і доби, а також від змісту домішок у кожній конкретній мікрозоні атмосфери. Молекулярне розсіювання достатнє добре вивчено. Складено великі таблиці коефіцієнтів розсіювання у видимій і інфрачервоній областях спектра, що забезпечують досить точний кількісний розрахунок втрат енергії випромінювання на заданій відстані [9]. Цей тип

розсіювання не робить істотної шкоди АОЛЗ на відміну від аерозольного розсіювання.

Атмосфера являє собою механічну суміш з газів, пари, краплин рідини і твердих часток. У ній завжди в перемінній кількості присутні пил, дим, кристалики льоду. Тому атмосфера є аерозолем, склад якого безупинно змінюється через перемішування. Говорячи про аерозольне розсіювання загалом, мають на увазі аерозольне ослаблення, обумовлене не тільки розсіюванням, але і поглинанням випромінювання частками аерозолу.

Усі типи атмосферних аерозолів можна об'єднати в наступні основні класи: хмари, тумани, димки, морозь і опади - дощ або сніг. У хмарах і туманах найбільш ймовірне значення радіуса часток складає 5-6 мкм, а в димках на 1-2 порядку менше. Тому ослаблення мікронного випромінювання в димках нижче. Результати вимірів прозорості димок, туманів і опадів у різних кліматичних районах викладені в [11-12]. При цьому теоретично й експериментально показане, що ослаблення сигналу при дощі і снігопаді менше, ніж при тумані (таблиця 2.1).

Таблиця - 2.1. Ослаблення випромінювання в діапазоні 0,85 мкм у залежності від погодних умов [9].

Погодні умови	Загасання, дБ/км
Ясна погода	0 - 3
Слабкий дощ	3 - 6
Сильний дощ	6 - 17
Сніг	6 - 26
Легкий туман	20 - 30
Густий туман	50 - 100

З таблиці 2.1 і рисунка 2.7 видно, що головними обмежниками дальності АОЛЗ є густий сніг і густий туман, для яких аерозольне ослаблення

максимальне. На поширення лазерного променя сильний вплив робить також турбулентність атмосфери, тобто випадкові просторово-тимчасові зміни показника переломлення, викликані переміщенням повітря, флуктуаціями його температури і щільності. Тому світлові хвилі, що поширюються в атмосфері, випробують не тільки поглинання, але і флуктуації переданої потужності. На рисунку 2.8 приведені криві ослаблення лазерного сигналу в різних аерозолях.

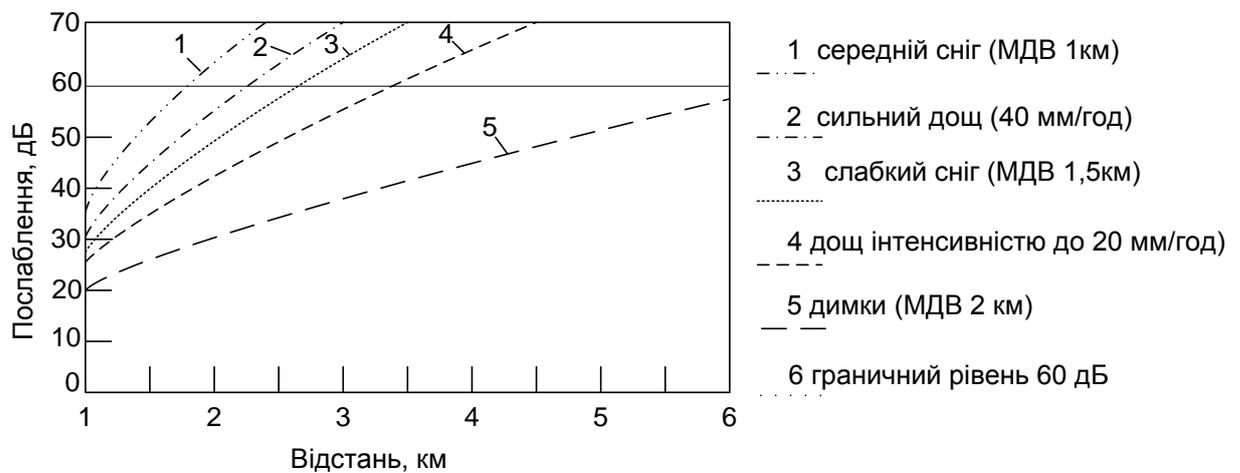


Рисунок 2.8 - Залежність ослаблення світла в аерозолях від відстані при різних метеофакторах.

1 - сніг середньої щільності (МДВ = 1 км), 2 - сильний дощ (40 мм/година), 3 - сніг невеликої щільності (МДВ = 1,5 км), 5 - димки (МДВ = 2 км), 6 - граничний рівень, 60 дБ

Турбулентність атмосфери приводить до перекручувань хвильового фронту і, отже, до коливань і розширення лазерного пучка і перерозподілові енергії в його поперечному перерізі. У площині прийомної антени це виявляється в хаотичному чергуванні темних і яскравих плям з частотою від часток герца до декількох кілогерців. При цьому іноді виникають завмирання сигналу (термін запозичений з радіозв'язку) і зв'язок стає нестійким. Завмирання найбільш сильне виявляється в ясну сонячну погоду, особливо в літні жаркі місяці, у годинник сходу і заходу сонця, при сильному вітрі.

Наприклад, на рисунку 2.9 показані дві крайні залежності ймовірності помилок BER для системи АОЛЗ від дальності зв'язку при ясній погоді - одна в умовах сильної турбулентності атмосфери, інша в слабкій. Звичайні значення BER лежать між цими кривими.

Найпростішим способом боротьби з завмираннями є збільшення розміру прийомної оптичної антени або використання декількох приймальних антен (до 8). При цьому відбувається усереднення флуктуацій випромінювання, прийнятого окремими елементами, і вирівнювання сигналу. Інший спосіб полягає в некогерентному додаванні в одному каналі випромінювання декількох лазерів.

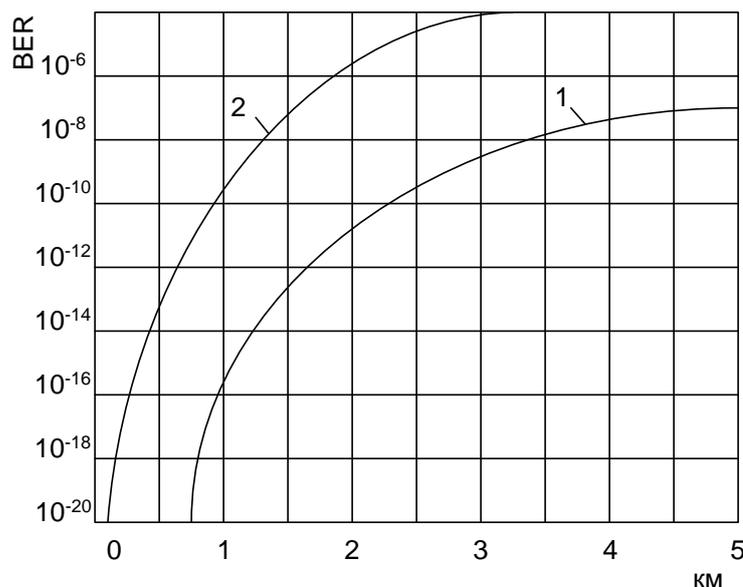


Рисунок 2.9 - Залежність ймовірності помилок *BER* від відстані при слабких завмираннях в атмосфері (крива 1) і сильних завмираннях (крива 2) для АОЛЗ. Дощ, туман, сніг, серпанок відсутні.

При практичному використанні лазерів у системах атмосферного зв'язку необхідно враховувати сукупний вплив взаємодії випромінювання з атмосферою - одночасно поглинаючим, розсіюючим і випадково неоднорідним середовищем. Цей вплив може змінюватися в надзвичайно

широкому діапазоні. Тому для забезпечення працездатності АОЛЗ на заданій дистанції з визначеним рівнем надійності (або доступності каналу) необхідно мати достатній динамічний запас енергетичного потенціалу.

## 2.7 Розрахунок робочої частоти системи

Вибираємо діапазон робочих частот, тип радіоапаратури і розраховуємо основні параметри мікрохвильового устаткування для безпроводної передачі цифрового сигналу заданої швидкості між 2 пунктами, попередньо розглянувши основні критерії для цього.

У цифрових системах, багато параметрів базується на понятті «коефіцієнт виявлення помилок».

$$BER = \frac{N_{ном}}{N} \quad (2.6)$$

де  $N_{ном}$  - число помилково прийнятих символів,  $N$  - загальне число переданих символів.

У багатьох випадках критерієм працездатності цифрового устаткування є  $BER = 10^{-3}$ . Іншими словами, працездатною вважається система зв'язку, якщо на 1000 переданих символів буде помилково прийнято не більш 1 символу.

Кількість помилок залежить від рівня сигналу на вході приймача. Чим більше рівень сигналу, тим менше помилок. Для кожного окремого типу устаткування виробники апаратури дають величину рівня сигналу на вході приймача, при якому  $BER = 10^{-3}$ . Такий рівень називається граничним ( $P_{гр.BER}$ ).

Отже, для того, щоб можна було б говорити про можливість використання тієї або іншої апаратури для рішення конкретної задачі, потрібно мати величину енергетичного запасу  $P_e$  оптичного каналу.

Вибираємо діапазон робочих частот і тип апаратури таким чином, щоб на інтервалі лінії зв'язку заданої довжини  $R_0$  і запас на завмирання був у межах від 38 до 42 дБ при мінімальних розмірах антен.

1. Враховуючи задану апертуру передавача (0,2м) розраховуємо його коефіцієнт підсилення за формулою:

$$G = 20 \lg(D) + 20 \lg(f) + 17,5 \text{ [дБ]}, \quad (2.7)$$

$$G = 20 \lg(0,2) + 20 \lg(0,2) + 17,5 = 17,8 \text{ (дБ)}.$$

де  $D$  – апертура передавача м;  $f$  - робоча частота модуляції антени, ГГц.

2. Визначаємо ослаблення сигналу у вільному просторі за формулою:

$$L_0 = 20 \lg(4,189 \cdot 10^4 R_0 f) \text{ [дБ]}, \quad (2.8)$$

$$L_0 = 20 \lg(4,189 \cdot 10^4 \cdot 2,3,4 \cdot 10^{14}) = 19,45 \text{ (дБ)},$$

де  $R_0$  - довжина інтервалу зв'язку, км,

3. Визначаємо втрати енергії променя в газах атмосфери ( $L_2$ ) за формулою:

$$L_2 = (y + \kappa) R_0 \text{ [дБ]}, \quad (2.9)$$

$$L_2 = (3 + 4) 5 = 20 \text{ (дБ)},$$

де  $y, \kappa$  - погонні загасання у водяних парах і атомах кисню атмосфери (для пари  $y=3$ , для кисню  $\kappa=4$ )(дБ/км).

4. Розраховуємо рівень сигналу на вході приймача при відсутності завмирань.

$$P_{np} = P_{nep} + G_1 + G_2 - L_0 - L_{\phi 1} - L_{\phi 2} - L_2 - L_{p\phi} - L_{дон}, \quad (2.10)$$

$$P_{np} = 150 + 17,8 - 19,45 - 0,5 - 0,5 - 20 - 0 - 1 = 126,35 \text{ (дБм)},$$

де  $P_{nep}$  - рівень потужності передавача, дБм,  $L_{\phi 1}, L_{\phi 2}$ - ослаблення сигналу у фідерних лініях, дБ.

## 5. Оцінемо радіус когерентності атмосфери

$$r_0 = (0,423 \times 4\pi^2 \times C_n^2 L / \lambda^2)^{-3/5}, \quad (2.11)$$

для випадку сильної турбулентності  $C_n^2 = 3 \cdot 10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$ , отримуємо  $r_0 \approx 1,18$  см.

6. Для розрахунку дисперсії фазових збурень в атмосфері скористаємось формулою Д.Фрида

$$\sigma_s^2 \approx 1,013 (D/r_0)^{5/3}, \quad (2.12)$$

звідки  $\sigma_s^2 \approx 12,9$

Оскільки в сучасній апаратурі фідерні лінії практично відсутні (прийомопередавачі об'єднані в один блок), втрати в  $L_{\phi 1}$  і  $L_{\phi 2}$  можна прийняти рівними по 0.5 дБ.  $L_{p\phi}$  – ослаблення сигналу в розділових фільтрах (прийmemo рівним 0 дБ),  $L_{\text{дон}}$  – додаткові втрати, що складають із втрат в обтіканні  $L_{ao}$  і втрат від перепаду висот приймальної і передавальної апертури  $L_{nv}$ . ( $L_{\text{дон}} = 1$  дБ).

7. Визначаємо енергетичний запас  $P_e$  оптичного каналу

$$P_e = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}}, \quad (2.13)$$

$$P_e = 102 - (-6) = 108 \text{ (дБ)},$$

де  $P_{\text{пер}}$  – рівень потужності випромінювання передавача, дБ;

$P_{\text{пр}}$  – рівень потужності випромінювання на вході приймача, дБ.

8. Скориставшись програмою Project 1 (каф. БМІОЕС, ВНТУ), визначаємо показник поглинання сигналу частинками води, які входять до складу атмосфери. Результат роботи програми представлено на рисунку 2.10.

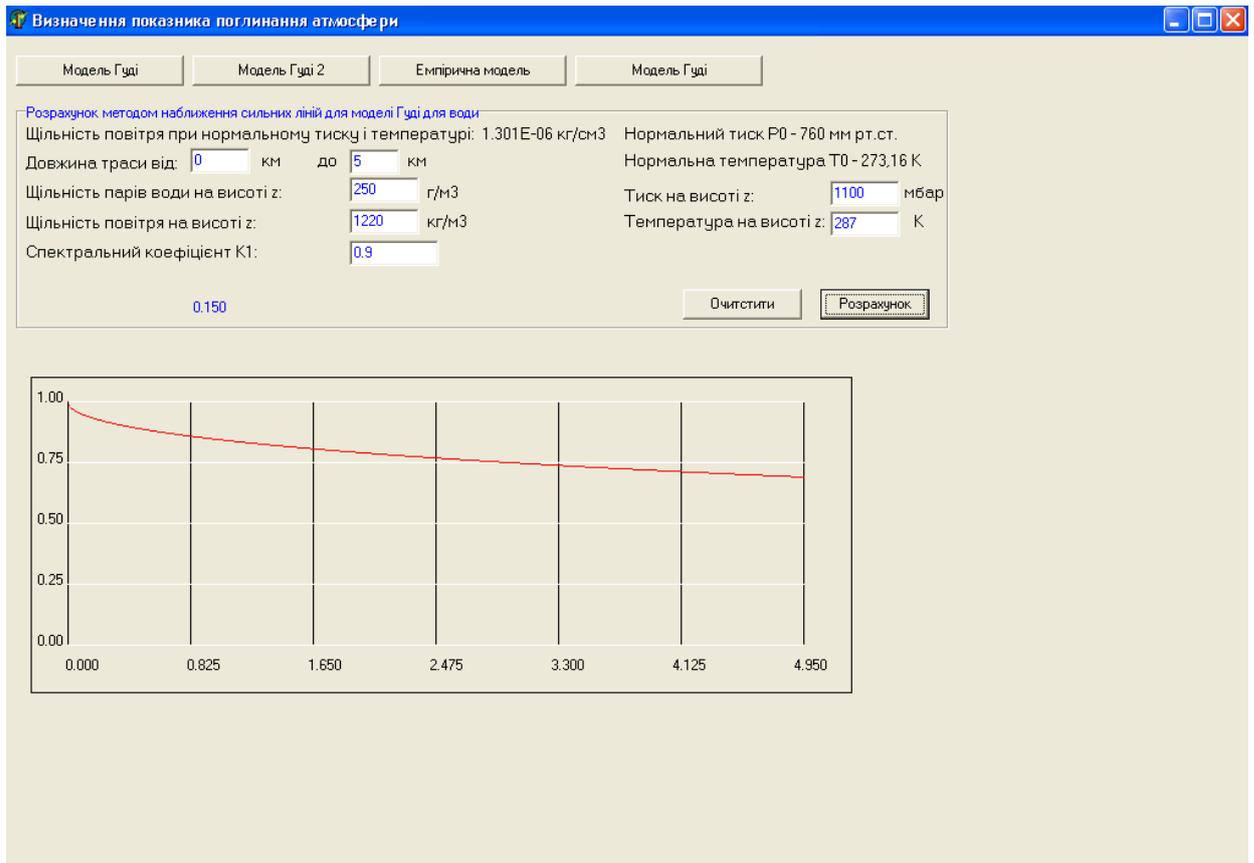


Рисунок 2.10 - Показник поглинання атмосфери частинками води.

## 2.8 Розрахунок надійності роботи системи

Для проведення аналітичних оцінок і визначення потенційних можливостей різних варіантів побудови АОЛЗ можна розглянути поняття еквівалентного ресурсу термінала  $BER$ , обумовлене наступним співвідношенням:

$$BER = \frac{P_{прд} \cdot D_{прм}^2}{\beta_{прд}^2 \cdot P_{прм}} \cdot \tau_{прд} \cdot \tau_{прм} \quad (2.14)$$

де  $P_{прд}$  - вихідна потужність лазерного передавача в міліватах;

$D_{прм}$  - еквівалентний діаметр антени лазерного приймача в метрах;

$\beta_{прд}$  - кутова розбіжність променя передавача в мілірадіанах;

$P_{прм}$  - гранична чутливість приймача в піковатах/(Гц)<sup>1/2</sup>;

$\tau_{прд}$ ,  $\tau_{прм}$  - коефіцієнти пропускання передавального і прийомного тракту відповідно.

Можна показати, що з урахуванням уведеного поняття рівняння передачі цифрової АОЛС в атмосфері прийме вигляд:

$$BER = L^2 \cdot \exp\left(2,75 \frac{L}{S_k}\right) \cdot \sqrt{10 \cdot \ln\left(\frac{1}{k}\right) \cdot C \cdot 10^{-6}}, \quad (2.15)$$

$$BER = 5^2 \cdot \exp\left(2,75 \frac{5}{0.061}\right) \cdot \sqrt{10 \cdot \ln\left(\frac{1}{10^{-3}}\right) \cdot 155 \cdot 10^{-6}} = 10^{-3},$$

де  $S_k$ -метеорологічна дальність видимості (МДВ);

$L$  - дальність зв'язку в кілометрах;

$C$  - швидкість передачі інформації в Мбіт/с;

$k$  - імовірність помилки на біт інформації.

Маючи залежність  $BER$  від дальності зв'язку і  $S_k$ , можна знайти імовірність зв'язку.

Значення  $S_k$  має випадковий характер і істотно залежить від часу спостереження (типове значення – 1 місяць). Як будь-яка випадкова величина  $S_k$  має функцію розподілу імовірностей  $F(S_k)$ , знаючи яку можна знайти залежність імовірності зв'язку  $P_{зв}$  від стану атмосфери.

З рівняння передачі випливає, що кожному значенню дальності зв'язку  $L$  відповідає мінімальна метеорологічна дальність видимості  $S_k^*$ . Тоді ймовірність зв'язку буде визначатися умовою

$$P_{зв} = P(S_k > S_k^*), \quad (2.16)$$

де  $S_k$  - довільне значення МДВ;

$S_k^*$  - значення МДВ, ймовірність не перевищення якого дорівнює  $F(S_k^*)$ .

При цьому ймовірність зв'язку і функція розподілу імовірностей МДВ зв'язані співвідношенням:

$$P_{зв} = 1 - F(S_k^*), \quad (217)$$

Таким чином, знаючи закон розподілу імовірностей МДВ, можна визначити ймовірність зв'язку.

Одним зі способів визначення закону розподілу  $S_k$  є вимірювання і статистична обробка отриманих значень. Такі дані були отримані й опубліковані в [1-5]. У таблиці 2.2 представлені отримані величини середнього значення  $S_m$  і її середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  на основі спостережень МДВ для Вінниці для всіх місяців року.

Розподілу МДВ для Вінниці щонайкраще апроксимуються бета-розподілом:

$$F(S_k) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a) \cdot \Gamma(b)} \cdot \int_0^{S_k} x^{a-1} \cdot (1-x)^{b-1} dx, \quad (218)$$

де  $\Gamma(...)$  - гамма-функція;  $a$  і  $b$ - параметри розподілу;  $S_m$ -середнє значення МДВ;  $\sigma$  - середньоквадратичне відхилення МДВ.

Визначені ймовірності розподілу МДВ у кожному місяці в Вінниці, отримані за допомогою статистичної обробки вимірів і попереднього співвідношення.

$$a = \frac{S_m}{10} \cdot \left[ \frac{S_m(10S_m)}{\sigma^2} \right] = \frac{7,83}{10} \left[ \frac{7,83 \cdot (10 \cdot 7,83)}{3,30^2} \right] = 44,08.$$

Визначаємо імовірності зв'язку проєктованих ліній у в середньому за рік для двох атмосферних лазерних терміналів зв'язку з наступними параметрами:

$$b = \frac{a \cdot (10 - S_m)}{S_m} = \frac{44,08 \cdot (10 - 7,83)}{7,83} = 12,22.$$

$$F(S_k) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a) \cdot \Gamma(b)} \cdot \int_0^{S_k} x^{a-1} \cdot (1-x)^{b-1} dx = 0,0061.$$

$$P_{3\sigma} = 1 - F(S_k^*) = 1 - 0,0061 = 0,9939.$$

Таблиця 2.2 - Середнє значення  $S_m$  і її середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  на основі спостережень МДВ для Вінниці для всіх місяців року.

Місяць	$S_m$ ,	$\sigma$ ,
Січень	6,62	3,49
Лютий	6,90	3,49
Березань	7,11	3,61
Квітень	8,28	3,12
Травень	9,01	2,41
Червень	9,28	2,07
Липень	8,89	2,51
Серпень	8,72	2,69
Вересень	8,22	3,07
Жовтень	7,97	3,25
Листопад	6,84	3,63
Грудень	6,16	3,70
Середньорічне	7,83	3,30

Слід зазначити, що розрахунки проведені на основі даних таблиці 2.2, де представлені отримані величини середнього значення  $S_m$  і її середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  на основі спостережень МДВ для Вінниці для всіх місяців року. Однак у зв'язку з потеплінням клімату сильні снігопади, що могли б привести до переривання зв'язку АОЛЗ, відбуваються усе рідше.

## 2.9 Ослаблення рівня корисного сигналу через зворотне розсіювання.

Наявність шуму, викликаного реєстрацією фотоприймачем зворотного розсіювання випромінювання в атмосфері, знижує рівень корисного сигналу на фотоприймачі. Потужність шуму, прийняту фотоприймачем можна оцінити за співвідношенням:

$$P_{ш.} = \frac{P_{випр.} \cdot d_0^2 \cdot \lambda_0 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_i \cdot \eta \cdot \Delta f \cdot k_p \cdot (\lambda) \cdot (1 - e^{-k_\lambda \cdot D_p})}{64D_p^2 \cdot K_\lambda}, \quad (2.19)$$

де  $P_{випр.}$  — потужність передавача, Вт;  $\Delta f$ ,  $\eta$  — смуга пропускання (Гц) і квантова ефективність;  $d$  — діаметр приймальної антени, см;  $\tau_1$ ;  $\tau_2$ ; — коефіцієнти пропускання передавального і прийомного каналів відповідно;  $D_p$  — відстань до розсіюючого шару атмосфери, км;  $\tau_i$  - тривалість імпульсу випромінювання, нс;  $K_\lambda$  — коефіцієнт ослаблення енергії на одиницю шляху променя, км<sup>-1</sup>;  $k_p(\lambda)$  — спектральний коефіцієнт розсіювання випромінювання в атмосфері, км<sup>-1</sup>.

Ослаблення в атмосфері. Для висот до 3 км над рівнем моря аерозольне розсіювання володіє над молекулярним поглинанням. Коефіцієнт ослаблення для визначеної метеорологічної дальності видимості  $S_{мдв}$  можна визначити за формулою:

$$k_\lambda \approx k_p(\lambda) = \frac{3,91}{S_{мдв}} \cdot \left(\frac{\lambda}{0,55}\right)^{-0,58^{1/3}}. \quad (2.20)$$

Згідно з початковими даними  $\lambda = 870$  нм, а  $S_{мдв} =$  до 5 км. Підставивши дані в формулу, визначимо коефіцієнт послаблення в атмосфері:

$$k_\lambda \approx k_p(\lambda) = \frac{3,91}{5000} \cdot \left(\frac{850 \cdot 10^{-9}}{0,55}\right)^{-0,58^{1/3}} = 4,9 \text{ Дб}$$

Скориставшись програмним продуктом Mathcad, можна побудувати залежність коефіцієнта послаблення від метрологічної дальності, при ясній погоді (див. рисунок 2.11):

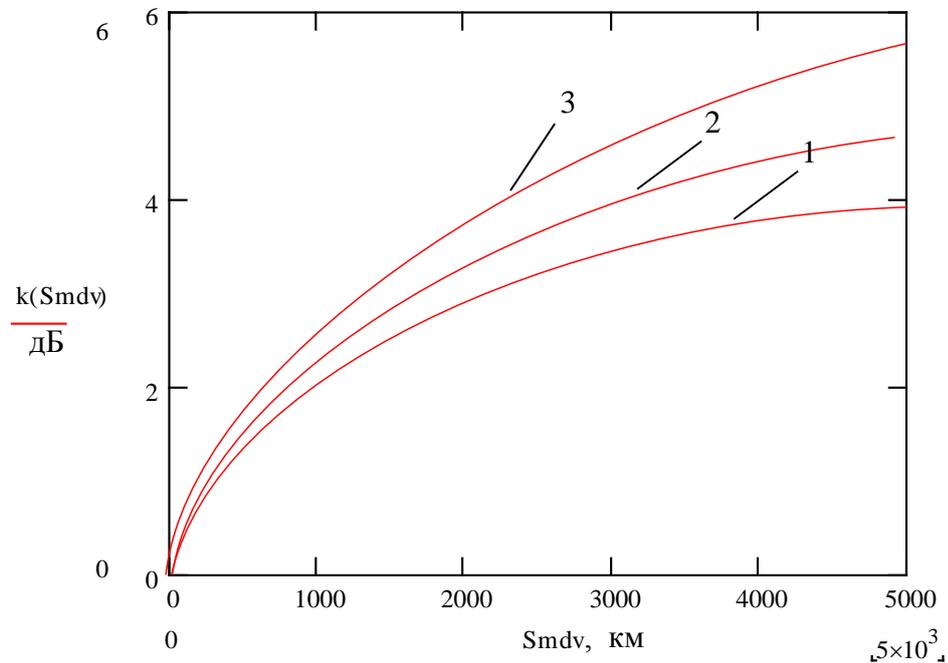


Рисунок 2.11 – Залежність коефіцієнта послаблення від метрологічної дальності. 1 – при ясній погоді, 2 – при тумані, 3 – при середніх опадах.

З рисунка видно, що при збільшенні метрологічної дальності загасання сигналу в атмосфері збільшується.

## 2.10 Моделювання роботи відкритого каналу з урахуванням особливостей застосування

Дальність дії лазера в умовах атмосфери обмежується особливостями поширення оптичних сигналів (зондувальних і відбитих) на трасі поширення. Звичайна атмосфера має локально неоднорідну структуру, що призводить до поглинання і розсіювання, тобто до ослаблення лазерного випромінювання при його поширенні. При роботі АОЛЗ в атмосфері поле на осі пучка первинного лазерного випромінювання при досить великому віддаленні від передавача лазерного локатора майже цілком визначається розсіяним

компонентом випромінювання. Крім того, наявність неоднорідностей середовища викликає значну просторову дифузію енергії лазерного випромінювання в напрямку від осі випромінювання: лазерний пучок по мірі віддалення від джерела випромінювання розпливається в просторі. Це призводить до додаткового послаблення лазерного випромінювання на осі пучка, що у свою чергу, зумовлює додаткове зменшення дальності дії, а також кутової точності і роздільної здатності лазерного локатора. Для наближених розрахунків оптичні середовища, у яких поширюється потік монохроматичного випромінювання, вважають однорідними (ізотропними). При цьому залежність послаблення від довжини хвилі випромінювання в середовищі може мати як селективний так і не селективний характер. Розглянемо основні закономірності послаблення лазерного випромінювання в оптичному середовищі. Нехай пучок рівнобіжних променів монохроматичного потоку випромінювання  $\Phi_{0\lambda}$  на довжині хвилі  $\lambda$  входить у шар однорідного середовища товщиною  $l$ . Припускаючи, що частки середовища послабляють потік випромінювання незалежно один від одного, можна представити зміну (зменшення) його величини при проходженні шару середовища товщиною  $dl$  із співвідношенням:

$$d\Phi_{l\lambda} = -\sigma_{\lambda}\Phi_{0\lambda}dl \quad (2.21)$$

де  $\sigma_{\lambda}$  - коефіцієнт послаблення потоку монохроматичного випромінювання, що залежить у загальному випадку від властивостей середовища і довжини хвилі,  $\text{км}^{-1}$ ;  $dl$  – товщина елементарного шару середовища, км.

При інтегруванні (2.21) по  $l$  для випадку однорідного оптичного середовища одержимо відоме вираження закону Бугера:

$$\Phi_{l\lambda} = \Phi_{0\lambda}e^{-\sigma_{\lambda}l} \quad (2.22)$$

де  $\Phi_{l\lambda}$  - потік монохроматичного випромінювання на виході шару середовища.

На підставі (2) можна записати вираження закону Бугера через інтенсивність випромінювання:

$$J_{l\lambda} = J_{0\lambda} e^{-\sigma\lambda l} = J_{0\lambda} \tau_{y\lambda}^l \quad (2.23)$$

де  $J_{0\lambda}$ ,  $J_{l\lambda}$  - інтенсивності монохроматичного випромінювання до і після проходження шару середовища, Вт/стерад.

Спектральний коефіцієнт прозорості середовища довжиною 1 км (питоме пропускання):

$$\tau_{y\lambda} = e^{-\sigma\lambda} \quad (2.24)$$

Добуток:

$$\sigma_{\lambda l} = \tau_{\lambda} \quad (2.25)$$

називають оптичною товщиною шару середовища, а експонентний множник у виразі (3):

$$e^{-\sigma\lambda} = \tau_{y\lambda}^l = T_{a\lambda} \quad (2.26)$$

спектральним коефіцієнтом пропускання (прозорості) оптичного середовища. Залежність  $T_{a\lambda} = f(\lambda)$  для атмосфери має селективний характер.

Таким чином, вираз (2.23) приймає наступний вид:

$$J_{l\lambda} = J_{0\lambda} T_{a\lambda} \quad (2.27)$$

Розглянемо основні фактори, що визначають величину послаблення (загасання) лазерного випромінювання в атмосфері Землі. Такими факторами є селективне молекулярне поглинання і розсіювання, а також селективне розсіювання на частках (аерозолях). Як відомо, атмосфера Землі являє собою оптичне середовище, що складається із суміші газів і водяної пари зі зваженими в ній сторонніми твердими і рідкими частками – аерозолями, розмір яких коливається від  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$  см. Азот (78%) і кисень (21%) є

основними постійними компонентами приземного шару атмосфери. На долю інших газів приходить менш одного відсотка обсягу. На оптичні властивості атмосфери впливають в основному вода в газовій і в рідкій фазах, вуглекислий газ, озон, а також аерозолі. Вміст їх в атмосфері Землі по-різному на різних висотах, у різних географічних районах і залежить від метеорологічних умов. Крім того сполука атмосфери безупинно міняється через турбулентність – хаотичних вихрових рухів шарів атмосфери. Концентрація водяної пари в атмосфері залежить від географічного положення району, пори року, висоти шару атмосфери, місцевих метеумов і коливається в обсязі від 0.001 до 4 %.

Концентрація  $O_2$  при збільшенні висоти від 0 до 25 км міняється незначно: від 0.03 до 0.05% по обсязі. Концентрація ж озону по висотах нерівномірна. Основна його частина знаходиться в шарах атмосфери на висоті 15-40 км із максимумом концентрації на висоті 25-30 км (більш 0.001%); у нижніх шарах атмосфери концентрація озону не перевершує  $10^{-5}$  %. Оксид вуглецю має смугу поглинання на довжині хвилі 47 мкм; озон – слабку смугу поглинання при 4 мкм і сильну на довжинах хвиль 4,5 і 7,8 мкм.

Послаблення випромінювання в атмосфері обумовлено не тільки його поглинанням, але і розсіюванням. Внаслідок оптичної неоднорідності атмосфери виникають заломлення, відбивання і дифракція електромагнітних коливань на цих неоднорідностях. Якщо розміри часток, які поширюються в атмосфері, малі в порівнянні з довжиною хвилі коливань, то відбувається молекулярне розсіювання, що відбувається за законом Релея. Відповідно до цього закону інтенсивність розсіювання випромінювання обернено пропорційна довжині хвилі в четвертому ступені. Молекулярне розсіювання значне у видимій і інфрачервоній областях спектра. Послаблення випромінювання в результаті релєйського розсіювання може бути в багато разів більше, ніж молекулярне поглинання. При розмірах часток, однакових з довжиною хвилі випромінювання, спостерігається дифракційне розсіювання. Якщо розміри часток набагато більші довжини хвилі, то відбувається геометричне розсіювання, що виявляється головним чином в інфрачервоній

області спектра оптичних випромінювань. У реальній атмосфері мають місце всі види розсіювання, оскільки в ній присутні частки майже всіх зазначених розмірів. Найбільше розсіювання променистих потоків спостерігається на невеликих висотах (до 1000 м) у містах, де дим промислових підприємств і пил сильно засмічують атмосферу. Оскільки наш прилад буде розміщуватись на дахах будинків, то висота на якій він буде знаходитись дорівнює 0 – 1000 м.

Селективний характер поглинання і розсіювання лазерного випромінювання атмосферою обумовлює наявність у ній «вікон прозорості», що найбільш виражені в діапазонах хвиль 0.38-0.9 і 9-13 мкм.

Отже, послаблення лазерного випромінювання за рахунок розсіювання приблизно на два порядки більше, ніж за рахунок поглинання, що в основному справедливо і для інших «вікон прозорості» атмосфери в оптичному діапазоні хвиль. Тому для вікон прозорості атмосфери справедливі наближені рівності:

$$\sigma_{\lambda} \approx \sigma_{p\lambda} \text{ і } T_{a\lambda} \approx e^{-\tau_{p\lambda}} .$$

Зауважимо, що закон Бугера (2.23) справедливий при  $\sigma_{\lambda} \leq 15-20 \text{ км}^{-1}$ . Наприклад, при  $\sigma_{\lambda} = 25 \text{ км}^{-1}$  відхилення від цього закону складає приблизно 30%.

При цьому потужність оптичного сигналу на вході приймача прямо пропорційна квадрату спектрального коефіцієнта однобічного пропускання атмосфери:

$$P_{2\lambda} = P_{20\lambda} T_{a\lambda}^2 \quad (2.2.28)$$

де  $P_{20\lambda}$  - потужність прийнятого оптичного сигналу на вході приймача при його роботі у вільному просторі.

Отже, в інтервалі малих дальностей ( $R < R_r$ ), тобто при роботі з протяжністю шляху, дальність дій ЛЛС в атмосфері:

$$R = R_0 T_{a\lambda} \quad (2.29)$$

максимальна дальність дії

$$R_{\max} = R_{0\max} T_{a\lambda} \quad (2.30)$$

де  $R_{0\max}$  в залежності від виду мети визначається виразом:

$$R_{0\max} = \sqrt{P_u K k_0 S_A \rho_D (\alpha) \xi / (\pi P_{\text{нор}})}$$

чи

$$R_{0\max} = \sqrt{1.4 P_u K k_0 \Omega_1 S_A \rho_3 \xi / (\Theta_{\text{Л}}^2 \Theta_3^2 P_{\text{нор}})}$$

В інтервалі великих дальностей ( $R > R_r$ ), тобто при роботі з точковим джерелом, дальність дій ЛЛС в атмосфері

$$R = R_0 \sqrt{T_{a\lambda}} \quad (2.31)$$

$$R_{\max} = R_{0\max} \sqrt{T_{a\lambda}} \quad (2.32)$$

де  $R_{0\max}$  визначається виразом:

$$R_{0\max} = \sqrt[4]{P_u K k_0 S_A S_{0D} / (\pi^2 \Theta_{\text{Л}}^2 P_{\text{нор}})}$$

чи

$$R_{0\max} = \sqrt[4]{1.4 P_u K k_0 S_A S_{03} / (\Theta_{\text{Л}}^2 \Theta_3^2 P_{\text{нор}})}$$

Формули (2.29) – (2.32) свідчать про те, що послаблення потужності лазерного зондувальних і відбитого оптичних сигналів атмосферою призводить до зменшення співвідношення сигнал/завада на вході приймача ЛЛС; це, у свою чергу, знижує дальність лазерного виявлення цілі.

На практиці для визначення коефіцієнта  $T_{a\lambda}$  при роботі в «вікнах прозорості» атмосфери користаються емпіричною формулою:

$$T_{a\lambda} = \exp\left[-\frac{3.91 I_p}{R_M} x_\lambda\right] \quad (2.33)$$

де  $l_p$  - товщина шару атмосфери, що розсіює  $x_\lambda$ ;  $= \rho_\lambda / \rho_\lambda^0$  (для видимого діапазону  $x_\lambda$  хвиль (1));  $\rho^0 = 0,5$  мкм.

Метеорологічна дальність видимості (м. д. в.)

$$R_M = \frac{1}{\sigma_{p\lambda 0}} \ln \frac{1}{V_{\min}} \quad (2.34)$$

$$R_M = \frac{1}{0,5 \cdot 10^6} \ln \frac{1}{2} =$$

де  $V_{\min} = 0,02$  – гранична контрастна чутливість ока спостерігача;

$\lambda_0 = 0,5$  мкм.

Таблиця 2.3 – Метеорологічна дальність видимості при певних станах атмосфери

Стан атмосфери (видимість)	Бал по коду	Питоме пропускання $\tau_{y\lambda}$ , км <sup>-1</sup>	Метеорологічна дальність видимості $R_M$ , км
Туман:			
Дуже сильний	0	Менш $10^{-34}$	Менш 0,05
Сильний	1	$10^{-34} - 10^{-8,5}$	0,05 – 0,2
Помітний	2	$10^{-8,5} - 10^{-3,4}$	0,2 – 0,5
Слабкий	3	$10^{-3,4} - 2 \cdot 10^{-2}$	0,5 – 1
Димки:			
Дуже сильна	4	0,02 – 0,14	1 – 2
Сильна	5	0,14 – 0,38	2 – 4
Помітна	6	0,38 – 0,68	4 – 10
слабка	7	0,68 – 0,82	10 – 20
Гарна видимість	8	0,82 – 0,92	20 – 50
Відмінна видимість	9	0,92 і більш	50 і більш

Під м. д. в.  $R_M$  прийнято розуміти граничну дальність видимості темних предметів з кутовим розміром  $0,5^{\text{про}}$  стандартного спостерігача ( $V_{\text{min}} = 0,02$ ) у денний час на тлі неба. Для визначення  $R_M$  можна використовувати таблицю 2.3.

Таким чином у даному розділі було розглянуто основні методи усунення шумів при передачі інформації у системах FSO. Також був проаналізований вплив атмосфери на роботу систем атмосферного оптичного зв'язку. Розглянуто основні закономірності послаблення лазерного випромінювання в оптичному середовищі. Були визначені особливості проходження пучка світла через середовище розповсюдження. Виконано розрахунок робочої частоти та надійності роботи системи. Проведений аналіз та розрахунки дають представлення про роботу розроблюваної адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку.

## 3 РОЗРОБКА АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ АТМОСФЕРНОГО ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

### 3.1 Інфрачервоні системи зв'язку

Велика частина бездротових мереж, встановлених в Україні та за кордоном, використовує радіохвилі, а методи, засновані на оптичних технологіях все ще не здобули великої популярності. Їх розвиток стимулюється як досягненнями в проектуванні і виробництві твердотільних лазерів, так і зростаючими потребами користувачів в захищених високошвидкісних каналах зв'язку. Системи, що функціонують в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні, мають цілий ряд переваг перед альтернативними розробками.

По-перше, за рахунок роботи в оптичній області довжин хвиль такі системи не претендують на яку-небудь частину радіочастот, не створюють перешкод в РЧ-спектрі і самі не чутливі до подібних перешкод. Для їх експлуатації не потрібно одержувати дозволів на використання дефіцитного радіочастотного ресурсу [8].

По-друге, інфрачервоні канали зв'язку забезпечують високу захищеність інформації, що передається. Потоки даних не можуть бути просканувані аналізаторами спектра або контрольним обладнанням радіомереж. До того ж вони, як правило, кодуються за допомогою патентованих алгоритмів. По-третє, самі по собі бездротові оптичні системи не накладають ніяких принципових обмежень на швидкість транспортування даних. Нарешті, важливим чинником є малий час їхнього розгортання.

В останні роки інфрачервоні системи передачі інформації викликають все більший інтерес у операторів, Internet-провайдерів та корпоративних замовників. До можливих варіантів їх застосування відносяться формування фізичних з'єднань в корпоративних мережах передачі даних (Ethernet / Fast Ethernet, ATM, FDDI) і магістральних мережах операторів наземного зв'язку

(SDH, PDH), створення резервних каналів, побудова каналів доступу для вирішення проблеми «останньої милі», забезпечення з'єднань з базовими станціями та їх контролерами в мережах мобільного зв'язку, розгортання тимчасових мереж на період модернізації основної кабельної інфраструктури або в районах стихійних лих, передача даних від систем відеоспостереження та телеметрії при неможливості прокладки кабелю. Перш за все відзначимо, що основний принцип впровадження ІЧ-систем зв'язку полягає в заміні визначеної ділянки фізичної лінії (яку часто просто неможливо прокласти) бездротовим каналом. Цей принцип має два важливі наслідки:

1. ІЧ-системи дозволяють встановлювати тільки з'єднання типу «точка-точка», причому приймач і передавач повинні знаходитися в зоні прямої видимості;
2. ІЧ-системи формують транспортну середу фізичного рівня і ніяк не впливають на протоколи, пов'язані з канальним, мережевому і більш високим рівням моделі OSI.

Остання обставина означає, що бездротові інфрачервоні (оптичні) канали можуть служити для зв'язку самих різних мережевих інфраструктур.

Спільними властивостями всіх перерахованих систем є висока потужність лазерного променя (середня потужність 300 мВт, рівень ІЧ-випромінення  $7 \text{ Вт/м}^2$ ) і значний час напрацювання на відмову (для лазерів воно становить 130 тис. годин). Потужність, споживана кожним з пристроїв, дорівнює приблизно 20 Вт, тому навіть при збої в мережі електроживлення приймач може працювати від безперебійного джерела в протягом декількох годин.

Особливістю ІЧ-обладнання є швидкість його розгортання: середній час, що витрачається на інсталяцію. Відсутність прив'язки до кабельної інфраструктури забезпечує можливість багаторазового використання однієї і тієї ж системи шляхом її демонтажу та встановлення на новому місці. Ще важливіше висока ремонтпридатність даного обладнання. Воно спроектоване так, що заміна передавача, що супроводжується переходом на нову довжину

хвилі з діапазону 860-920 нм, не вимагає модернізації приймача (бо останній працює з довжинами хвиль від 750 до 950 нм).

Інфрачервоний зв'язок передбачає наявність передавача і приймача. При підключенні до комп'ютера зовнішнього пристрою потрібен спеціальний приймач інфрачервоних променів (трансивер, адаптер), що знаходиться в області прямої видимості з пристроєм. Він підключається до інфрачервоному порту комп'ютера, який повинен бути передбачений на материнській платі.

Стандарт Ethernet 100Base-TX має кілька базових рівнів: інфрачервоний канал фізичного рівня (Serial Infrared Physical Layer Link, SIR), протокол доступу по інфрачервоному каналу (Link Access Protocol, LAP), протокол керування каналом (Link Management Protocol, LMP), а також не обов'язкові транспортні протоколи (Transport Protocols TP і Tiny TP). Стек протоколу Ethernet 100Base-TX має три базових шару: фізичні шари SIR, LAP і LMP. Дані можуть передаватися LMP безпосередньо від додатків через прикладний програмний інтерфейс API або через додатковий транспортний протокол стека (TP) [20].

На фізичному рівні модернізований інтерфейс використовує характеристики універсального асинхронного приймача/передавача (UART) у СОМ-порту. Такий порт є практично на всіх комп'ютерах. UART має кілька темпів передачі даних у діапазоні від 2400 біт/с до 115 Кбіт/с. Обладнання SIR складається з кількох компонентів для прийому та передачі: кодера/декодера для кодування інфрачервоного сигналу при передачі і декодування при прийомі, інфрачервоного перетворювача у складі драйвера виводу та випромінювача для передачі, а також приймача/передавача. Кодер/декодер має інтерфейс з UART. При передачі модернізовані приймально-передавальні модулі передають сигнал у потік введення/виведення послідовного порту. Дані поступають до передавача через послідовний інтерфейс. І замість того, щоб посилати сигнал по мідному дроту, як це винонується при передачі датовим способом, він посиляє фотони в атмосферу в напрямку модернізованого інфрачервоного приймача.

Пристрої перетворюють дані у світло: біти перетворюються у інфрачервоний сигнал, при цьому спалах відповідає "0", а відсутність сигналу - "1". ЦПУ на приймаючому кінці навіть не підозрює про те, що дані передаються у вигляді світла. Вони бачить, що й завжди, так як кодування здійснюється передавачами на передавальному кінці і детектором на приймаючому кінці інфрачервоного каналу. Вся інфрачервона передача відбувається в інфрачервоному діапазоні від 850 нанометрів до 880 нанометрів.

### 3.2 Протокол зв'язку – Ethernet 100Base-TX

Розглянемо основні моменти стандарту Ethernet 100Base-TX.

Отже, протокол Ethernet 100Base-TX дозволяє з'єднуватися з периферійним устаткуванням без кабелю за допомогою ІЧ-випромінювання з довжиною хвилі 880nm. Порт дозволяє встановлювати зв'язок в режимі точка-точка. Ethernet 100Base-TX не намагався створювати локальну мережу на основі ІЧ-випромінювання, оскільки мережеві інтерфейси дуже складні і вимагають великої потужності, а в мету Ethernet 100Base-TX входили низьке споживання та економічність. Інтерфейс Ethernet 100Base-TX використовує вузький ІЧ-діапазон (850-900 nm з 880nm "піком") з малою потужністю споживання, що дозволяє створити недорогу апаратуру і не вимагає сертифікації FCC (Федеральної Комісії зі Зв'язку).

Пристрій інфрачервоного інтерфейсу підрозділяється на два основні блоки: перетворювач (приймально-передавальний модуль і діод з керуючою електронікою) та кодер-декодер. Блоки обмінюються даними по електричному інтерфейсу, в якому в тому ж вигляді транслиуються через оптичне з'єднання, за винятком того, що тут вони пакуються в кадри простого формату - дані передаються 10bit символами, з 8bit даних, одним старт-бітом на початку і одним стоп- бітом наприкінці даних.

Сам порт заснований на архітектурі комунікаційного COM-порту ПК, який використовує універсальний асинхронний прийомо-передавач UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) і працює зі швидкістю передачі даних 2400-115200 bps.

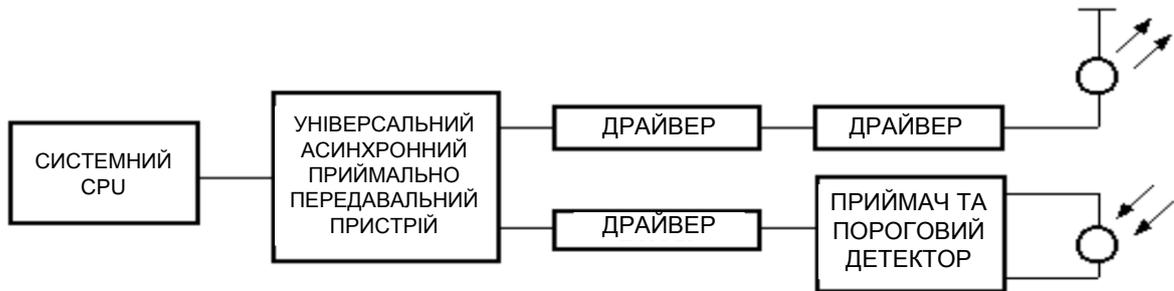


Рисунок 3.1 – Архітектура порту Ethernet 100Base-TX

Розглянемо фізичні основи Ethernet 100Base-TX. Передавальна частина. Байт, який потрібно передати, надсилається в блок UART з CPU командою запису введення-виведення. UART додає старт-стоп біти і передає символ послідовно, починаючи з молодшого значення біта. Стандарт Ethernet 100Base-TX вимагає, щоб всі послідовні біти кодували таким чином: логічний "0" передається одиничним ІЧ-імпульсом довжиною від 1.6ms до 3 / 16 періоду передачі бітової осередку, а логічна "1" передається як відсутність ІЧ-імпульсу. Мінімальна потужність с.м споживання гарантується при фіксованій довжині імпульсу 1.6

Після закінчення кодування бітів необхідно виконати збудження одного або кількох ІЧ-світлодіодів струмом відповідного рівня, щоб виробити ІЧ-імпульс необхідної інтенсивності. Стандарт Ethernet 100Base-TX вимагає,  $\mu 30^\circ$  була в діапазоні 40-50  $\pm$  щоб інтенсивність випромінювання в конусі  $W / Sr$ , причому інфрачервоний світлодіод повинен мати довжину хвилі 880nm, як вже зазначалося раніше. Радіальна чутливість приймача і довжини зв'язку встановлюються, виходячи з вимог самої специфікації Ethernet 100Base-TX.

Приймальна частина. Надіслані ІЧ-імпульси надходять на PIN-діод, що перетворює імпульси світла в імпульси струму, які посилюються, фільтруються і порівнюються з пороговим рівнем для перетворення в логічні рівні. ІЧ-імпульс в активному стані генерує "0", при відсутності світла генерується логічна "1". Протокол Ethernet 100Base-TX вимагає, щоб приймач точно вловлював ІЧ-імпульси потужністю від  $4 \pm 500 \text{ mW/sm}^2$  в кутовому діапазоні.

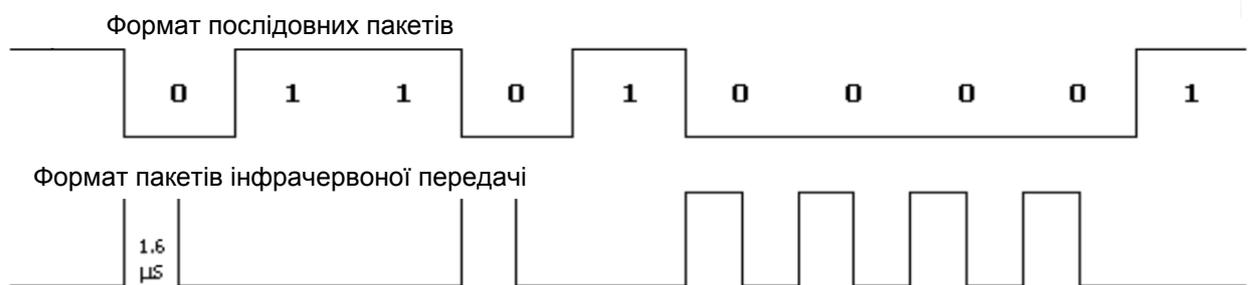
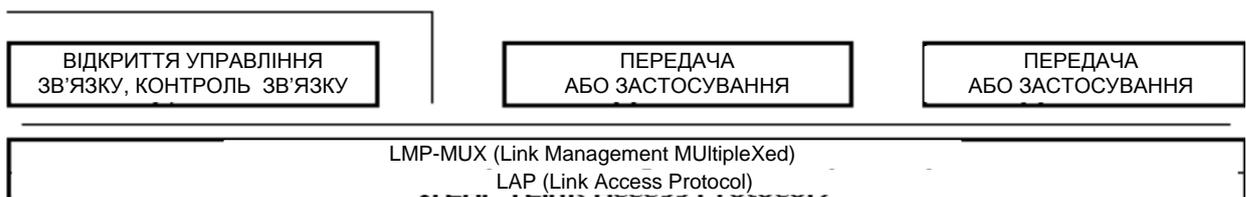


Рисунок 3.2 – Формат даних Ethernet 100Base-TX

Для ІЧ-випромінювання існує два джерела перешкод, основним з яких є сонячне світло, але на щастя в ньому переважає постійна складова. Правильно спроектовані приймачі повинні компенсувати великі постійні струми через PIN-діод. Інше джерело перешкод - флюорисцентні лампи - часто застосовуються для загального освітлення. Добре спроектовані приймачі повинні мати смуговий фільтр для зниження впливу таких джерел перешкод. Імовірність помилок зв'язку буде залежати від правильного вибору потужності передавача та чутливості приймача. У Ethernet 100Base-TX вибрані такі значення, які гарантують, що описані вище перешкоди не будуть впливати на якість зв'язку [20].

Стандарт Ethernet 100Base-TX включає в себе стек протоколів трьох узгоджених обов'язкових рівнів: PL (Physical Layer), LAP (Link Access Protocol) і LMP (Link Management Protocol).

Фізичний рівень (Physical Layer). Специфікація цього протоколу встановлює стандарти для передавачів, методи модуляції та схеми кодування/декодування, а також ряд фізичних параметрів. Стандарт передбачає використання довжини хвилі в діапазоні 850-900 nm. Мінімальна і максимальна  $W / S_{\text{рм}}$  інтенсивність передавача становить 40-50 відповідно всередині  $30^\circ$  конуса. Для стандарту Ethernet 100Base-TX (швидкість передачі даних 115.2Kbps) схема кодування аналогічна використовуваної в традиційній UART: біт старту ("0") і стоп-біт ("1") додаються перед і після кожним байтом відповідно. Але замість схеми NZR (Non-Return to Zero) використовується кодування, подібне RZ (Return to Zero), тобто двійковий "0" кодується одиничним імпульсом, а "1" - його відсутністю. Кадри відокремлюються один від одного байтами Escape-последовності, що містяться в тілі самого кадру. Для визначення помилок (EDt - Error Detection) використовується 16bit циклічна контрольна сума. Наприклад, в стандарті Ethernet 100Base-TX для протоколу обміну 1.152Mbps (синхронізація виконується як в протоколі HDLP - High-level Data Link Protocol високого рівня) і 4Mbps (використання 4-PPM - Pulse-Phase Modulation) старт-біт і стоп-біт не застосовуються. Так, фрейми, одержувані від більш високорівневого протоколу LAP, вкладаються в полі даних фреймів SIR, за використанням методом кодування. Стандарт не містить обов'язкових варіантів реалізації цієї процедури і допускає варіювання алгоритмів залежно від можливостей конкретного устаткування. Залежно від швидкості з'єднання пропонуються методи кодування: асинхронний (ASYNC, 9600-115200 bps), синхронний (HDLC, 0.576-1.152 Mbps) і 4-PPM (4Mbps).



### Рисунок 3.3 – Програмна структура Ethernet 100Base-TX

Програмний протокол. Він включає в себе: LAP (Link Access Protocol), що займається розбиванням даних на блоки, контролем помилок і іншими функціями низького рівня, і LMP (Link Management Protocol), що дозволяє по одній ПЧ-лінії обмінюватися даними між декількома додатками. Даний протокол базується на існуючих стандартах асинхронної напівдуплексної передачі даних HDLC і SDLC. Інфрачервона технологія підтримує тільки однонапрямкова передачу інформації, тому, в наслідок напівдуплексний природи SIR, виникла архітектура з одним головним (первинним) і множинними підлеглими (вторинними) пристроями. Схема звернення пристроїв представляє собою звичайний протокол обміну даними, де є фази запитів (Request) і відповідей (Response). Так, первинний пристрій який відповідає за організацію з'єднання, обробку помилок і пердані йому фрейми називаються керуючими (Command Frames), а пакети вторинних пристроїв іменуються відповідними (Response Frames). Обмін інформацією йде тільки з первинним пристроєм, який завжди виступає ініціатором з'єднання, проте його роль може грати будь-який з пристроїв, що підтримують необхідні для цього функції. За бажанням може бути включений протокол транспортного рівня, що дозволяє здійснювати контроль передачі між додатками у разі одночасної роботи декількох додатків на одній фізичній лінії. Для різних рівнів є три інтерфейси. Службові примітиви рівня LM-SVC дозволяють одному з пристроїв дізнатися які сервіси і протоколи зареєстровані на іншому пристрої. Примітиви доступу до рівня M-SVC керують режимом зв'язку, відкриттям і закриттям незалежних з'єднань між клієнтами, а також відправленням і прийомом даних. Інтерфейс L-SVC дає доступ до функцій протоколу LAP.

Пристрої, що відповідають стандарту Ethernet 100Base-TX, перед початком передачі повинні в першу чергу спробувати встановити не ведеться будь-яка передача в межах його досяжності. Якщо така активність виявлена,

то до програми, яка видає запит, надсилається відповідне повідомлення, а сам блок відкладає передачу. Оскільки обидва з'єднувальні пристрої можуть бути комп'ютерами (а не комп'ютер і принтер, або клавіатура, миша), то будь-який з них може бути провідним. Вибір залежить від того, який пристрій першим проявить ініціативу.

Кожен пристрій має 32bit адресу, що виробляється випадковим чином при встановленні з'єднання. Кожному кадру в межах з'єднання ведучий пристрій при старті привласнює 7bit-адресу з'єднання. Для можливих, але небажаних випадків, коли два пристрої мають однакову адресу, передбачений такий механізм, коли ведучий пристрій дає команду всім підлеглим пристроям змінити їх адреси. У процесі встановлення зв'язку два пристрої "домовляються" про максимальну швидкість, з якою вони обидва можуть працювати. Усі первинні передачі, що виконуються до фази переговорів, за замовчуванням ведуться на швидкості 9.6Kbps. Максимальний квант передачі може дорівнювати 100, 200 або 500 ms. Він являє собою максимальний час, протягом якого пристрій передає дані до того, як перейде до прослуховування підтвердження прийому і залежить від швидкості передачі, ємності буфера в приймаючому пристрої. Мінімальна тривалість передачі визначається нездатністю передавального пристрою перейти до прийому даних відразу після видачі останнього біта. Справа в тому, що підсилювач PIN-діода в передавальному пристрої входить у стан насичення від власної передачі. Час відновлення приймача - змінна величина, складова 0.001-10 ms. Цей параметр для даного пристрою повинен бути заздалегідь відомий і повинен враховуватися у фазі переговорів про встановлення з'єднання. Процедури розширеного відновлення включають в себе функцію скидання, яка перериває зв'язок, але потім відновлює активний стан з параметрами з'єднання, використовувани за замовчуванням. Стандартом передбачено два основних стани: NRM (Normal Response Mode) і NDM (Normal Disconnect Mode). Перший - це стан з'єднання з розподіленими ролями первинного і вторинних пристроїв. Другий передбачає функції

детектування доступних пристроїв, збір інформації про них, дозвіл адресних конфліктів, а також дозволяє передавати дані широкомовно, без встановлення з'єднання. У протоколі LAP використовується три типи кадрів за аналогією з HDLC. Поле даних присутнє тільки у першого і останнього виду фреймів, воно не обмежено по довжині, але число біт у ньому має бути кратно 8. Ненумеровані (U-кадри) використовуються для встановлення зв'язку: операції з'єднання і роз'єднання, інформування про помилки та передачі даних, якщо немає необхідності в нумерації послідовностей. Інформаційні (I-кадри) використовуються для передачі інформації і призначені для передачі даних. Їх командне поле містить номер фрейма в послідовності, що допомагає приймачу пристрою відслідковувати порушення черговості. Нумерація організована так, що служить одночасно засобом підтвердження прийому: S-і I-фрейми можуть нести номер пакету, який очікується на вході пристрою-відправника. Лічильник дозволяє ідентифікувати тільки 8 фреймів, таким чином, номер наступного очікуваного приймачем пакета може надсилатися не з кожним фреймом, а тільки після отримання декількох проміжних пакетів. Величина, яка визначає їх кількість, називається розміром вікна. Четвертий біт контрольного поля у фреймі, згенерований первинним пристроєм, означає запит даних, а у відповідному фреймі він грає роль кінцевого біта, що сигналізує про завершення передачі.

Супервізорні (S-кадри) використовуються для функцій handshaking (процедура узгодження пристроїв про параметри синхронізації).

ADDRESS (8 BIT)	CONTROL (8 BIT)	DATA (8 BIT)
-----------------	-----------------	--------------

Рисунок 3.4– Структура фрейму

Домовляючись про з'єднання, пристрої обмінюються інформацією про швидкість, максимальної і мінімальної тривалості циклу, максимальну

величину фрейма, розміри вікна, кількості додаткових прапорів BOF (Beginning Of Frame) і пороговому часу розриву з'єднання (проміжок, протягом якого не було прийнято жодного коректного фрейму). Під максимальним циклом (maximum turn-around time) мається на увазі відрізок часу, після якого пристрій повинен встановити у своєму фреймі кінцевий біт, а під мінімальним - тривалість паузи, починаючи з моменту відсилання останнього байта останнього фрейму, запитаного передавальним пристроєм, щоб підготуватися до прийому даних. BOF виконує роль затримки перед посилкою чергового фрейму пристроїв з більшою затримкою. Передбачена команда зміни ролей XCHG, що дозволяє передавати право називатися первинним пристроєм, як естафету. Для перевірки правильності передачі фрейму до нього в кінці дописується поле FCS (Frame Check Sequence), яке містить контрольну суму формату CRC-CCITT.

Протокол LAR встановлює правила доступу до ІЧ-середовища, процедури відкриття каналу, узгодження абонентів мережі, обміну інформацією і т.д. Хоча LAR і обов'язковий рівень Ethernet 100Base-TX, але не всі його особливості є такими. Будь-яка станція, не приймає в даний момент часу участі в обміні, перед тим як почати передачу, повинна прослуховувати канал не менш 500ms, щоб переконатися у відсутності трафіку. З іншого боку, станція, що бере участь в обміні, повинна вести передачу не більше 500ms. Доступ до середовища передачі регулюється за допомогою спеціального біта PF (Poll / Final), який встановлюється в тілі кадру і виконує функції, аналогічні маркеру. LAR допускає передачі без встановлення попереднього з'єднання. За своєю природою така передача є ширококомовної і не вимагає отримання підтвердження станції одержувача. Процедура відкриття каналу в цьому випадку передбачає обмін ідентифікаційної інформацією (ID). Ініціатор ширококомовного обміну передає ID зумовлене кількість разів і прослуховує канал в інтервалах між посиленнями (слот, Slot). Станція-одержувач випадковим чином вибирає слот і посилає у відповідь свій ID. При виявленні колізії процедура повторюється і застосовується для узгодження операційних

параметрів станцій (швидкість посилки біт, максимальна довжина пакету). При встановленні з'єднання обмін даними, об'єм яких не повинен перевищувати 64 байти, здійснюється зі швидкістю 9.6Kbps. Після того, як з'єднання встановлено, швидкість обміну і величина пакету даних можуть бути за "домовленістю" збільшено до максимальних. Крім пакетів з призначеними для користувача даними, в обміні беруть участь спеціальні, службовці для управління потоком, корекції помилок і передачі маркера. Зв'язок може здійснюватися в режимі "1:1" або "1: n". У процесі обміну одна станція є первинною, а решта - вторинними. Крім описаних процедур існують і інші: дозвіл конфліктів адрес, зміна ролі станції "первинна-вторинна" і т.д.

Протокол керування каналом LMP є обов'язковим, однак його деякі особливості можуть бути опційні. Кожен пристрій містить таблицю сервісів і протоколів, доступних в даний момент. Ця інформація може запитуватися у інших пристроїв. Мультиплексор адміністратора з'єднань і його схема управління дозволяють декільком додаткам обмінюватися даними по одному фізичній з'єднанню. Протокол LMP містить два компоненти: LM-IAS (Link Management Information Access Service) і LM-MUX (Link Management MULTipleXed). LM-IAS управляє інформаційною базою так, що станції можуть запитати, які служби надаються. Ця інформація зберігається як ряд об'єктів, з кожним з яких пов'язаний набір атрибутів. Наприклад, Device є обов'язковим і має атрибути DeviceName, LMPSupport (номер версії протоколу, підтримка ISA і MUX). LM-MUX виконує мультиплексування каналів поверх одного з'єднання, що встановлюється протоколом LAP. З цією метою в станції визначається безліч точок доступу каналу - LSAP (Link Service Access Point) - кожна з унікальним селектором. Таким чином кожне з LSAP-з'єднань визначає логічно різні інформаційні потоки. Протокол LM-MUX забезпечує передачу даних між точками доступу як всередині однієї, так і між іншими станціями. Він може працювати в одному з двох режимах: ексклюзивному (активується тільки одне з'єднання LSAP) і мультиплексівном (кілька з'єднань LSAP можуть розділяти один канал LAP). У цьому випадку керування потоком

повинно бути забезпечено протоколами верхнього рівня або безпосередньо додатком [19]. Отже, LMP функціонує в двох режимах: мультиплексувальному та ексклюзивному. Перший дозволяє розділяти одне фізичне з'єднання на декілька завдань, другий віддає всі ресурси одному-єдиному додатком. Кожне віртуальне з'єднання представлено своєю LSAP, таким чином, зв'язок відбувається на рівні двох LSAP (LSAP Connection). Також передбачено три варіанти доступу: з встановленням попереднього з'єднання, без встановлення попереднього з'єднання (Connectionless) і режим збору інформації про можливості, сервіси та додатках віддаленого пристрою (XID\_Discovery).

APPLICATIONS	
LMP -IAS-SERVICES	TRANSPORT SERVICES
LMP-MUX	
LDA LAP	

Рисунок 3.5– Структурна доступу LAP

TP (Transport Protocol) працює над використанням в якості транспортного протоколу ISO-8073. Його застосування дозволяє пропускати по лінії кілька потоків даних, з власним управлінням для кожного. Але використання цього протоколу не обов'язково. TinyTP (Tiny Transport Protocol) - транспортний протокол, який здійснює функції управління потоком незалежними для будь-якого LSAP-з'єднання. Кожна точка доступу цього протоколу (TTPSAP - TinyTP Service Access Point) ідентифікується з єдиною точкою доступу LMP і використовує єдиний з нею адресу. TinyTP також відає сегментацією та складанням фреймів). COMM - протокол емуляції послідовного й паралельного портів, заснований на чотирьох типах сервісу: 3-Wire Raw, 3-Wire, 9-Wire і Centronics. Перший працює тільки через одне ексклюзивне з'єднання і використовується, коли необхідно передавати виключно дані. Другий емулює паралельну передачу по трьох каналах (Signal

Common, TD, RD), використовуючи можливості TinyTP. Дев'ять проводний призначений для емуляції послідовних портів і обробляє, крім трьох вищезазначених, ще шість сигналів (RTS, CTS, DSR, DTR, CD, RI). Centronics - це не що інше, як віртуальний паралельний інтерфейс на базі TinyTP).

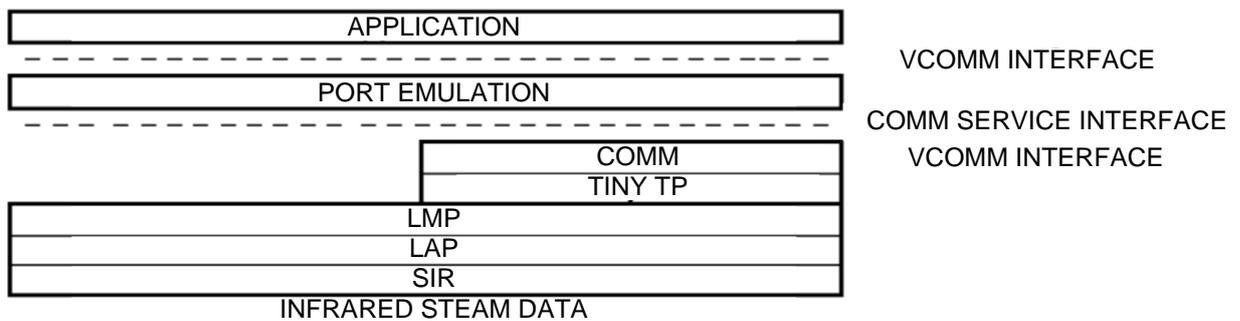


Рисунок 3.6– Емуляція послідовного та паралельного портів

Протокол Tran-P, введений для передачі зображень, складається з трьох шарів (SCEP, bFTP, UPF) і користується послугами згадуваного раніше IrCOMM. Призначення SCEP (Simple Command Execute Protocol) - ізоляція вищого рівня від реальний конкретного інтерфейсу. Завдяки високому рівню абстракції вдалося спроектувати протокол bFTP (binary File Transfer Protocol) таким чином, що він може одноманітно обслуговувати потреби самих різних пристроїв в самих різних конфігураціях з'єднання. Файл упаковується разом з даними в єдиний блок, передбачені функції опитування віддаленого пристрою і узгодження параметрів подання інформації, що максимально автоматизує процес. UPF (Uni Picture Format) забезпечує гарантоване відтворення зображень, переданих з одного пристрою на інший. UPF ґрунтується на форматі JPEG і дозволяє зберігати, крім зображення, ще і всі додаткові відомості про нього, звичайно фіксуються цифровими камерами (дата, орієнтація, рівень білого, рівень чорного і т. д.). Щоб пристрої, які містять апаратно-зафіксовані алгоритми обробки зображень, могли адекватно сприймати модифікований формат, вся розширена інформація винесена в

заголовок, а саме зображення залишається недоторканим.

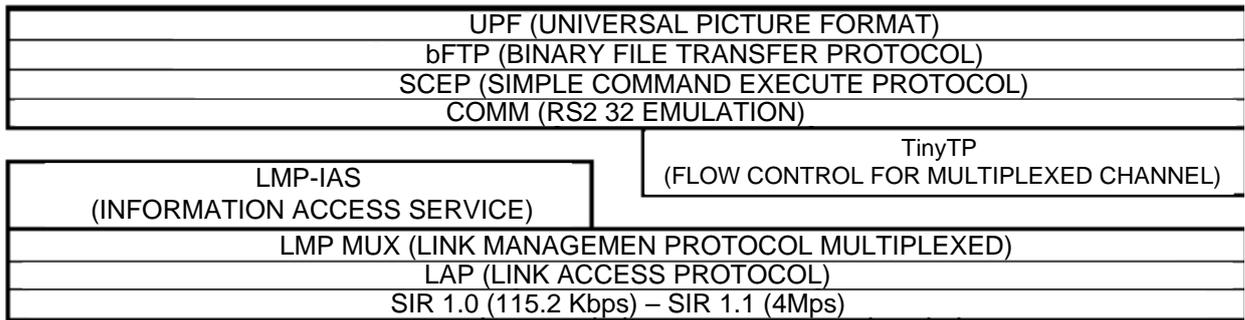


Рисунок 3.7 – Протокол пересилання зображення

VFIR (Very Fast IR) - додаток до стандарту 100Base-TX, що дозволяє підвищити швидкість передачі даних до 16Mbps. Введено новий формат фрейма, в якому першим йде поле преамбули (Preamble), що складається з 240bit або слотів, після LAP-фрейма та контрольної суми - поле FB (Flush Byte - 8 нульових біт), в кінці - поле Null (24 нульових біта) . Вся передана інформація кодується за алгоритмом ННН, що забезпечує від 1 до 13 порожніх слотів між імпульсами. Звичайно, необхідні зміни були зроблені і в протоколі LAP: додано позначення для швидкості 16Mbps в полі Baud Rate, а також збільшено максимально можливий розмір вікна з 7 до 127 фреймів. IrBus (IrControl). Специфікація, що регулює питання, пов'язані з підключенням різної периферії, що вимагає взаємодії з системними контролерами. Її положення застосовуються також до пристроїв віддаленого управління ПК, телевізорами високої чіткості (HDTV) і побутовими приладами.

Фізичний рівень забезпечує передачу даних, закодованих за схемою модуляції послідовними імпульсами 16-PSM (Pulse Sequence Modulation - 8 слотів, де тільки 2 або 4 можуть містити імпульс) зі швидкістю 75Kbps. Однак, при використанні такої схеми кодування, імпульс означає "1", його відсутність - "0". Частота несучої основного сигналу - 1.5MHz з мінімальною дальністю дії 5м. Дані пересилаються в пакетах двох видів: довгі (776bit) і короткі (72bit),

структура яких абсолютно ідентична, за винятком значення стартового прапора, а також розрядності контрольної суми. Так, протокол MAC (Media Access Control) регламентує процеси взаємодії множинної периферії з єдиним основним пристроєм (Host) та обміну інформацією між ними.

HID-DEVICES APPLICATIONS	DOMENIK APPLICATIONS	FUTURE APPLICATIONS
HID-BUS LLC	HA LLC	FUTURE LLC
BUS MAC		
BUS PHY		

Рисунок 3.8– Структурна стеку сімейства протоколу IrControl

Існує три режими роботи ведучого пристрої: сон (з низьким енергоспоживанням), нормальний і співіснування з випромінювачем. Якщо від периферії довгий час не надходить жодних даних, то Host автоматично переходить в стан сну, причому сам периферійний пристрій у разі потреби може самостійно перевести його в нормальний режим роботи. Host отримує дані шляхом  $s$ , в ході  $\mu$  циклічного опитування периферії (Poll) із періодом 13.8 якого обслуговується до чотирьох пристроїв з критичним часом латентності  $\mu$  (для менш вибагливою периферії гарантується період опитування в 69  $s$ ). Формат MAC-пакета складається з поля адреси основного пристрою (HA - Host Address), поля адреси периферії (PA - Peripheral Address) і контрольного поля (MAC). Значення структури MAC залежить від того, основний або периферійний пристрій є "автором" пакету, і містить допоміжну системну інформацію.

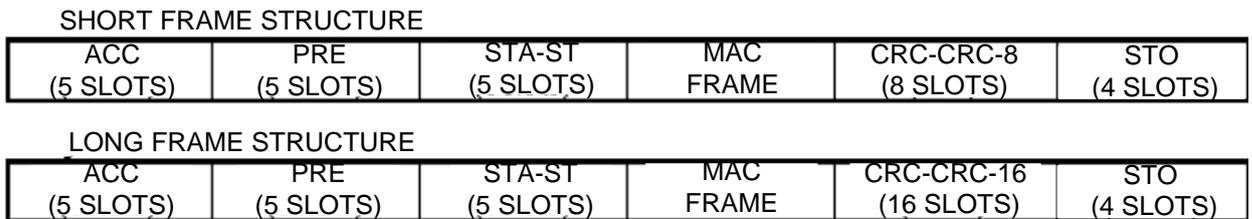


Рисунок 3.9 – Структурна пакетів

Перш ніж почнеться обмін даними, повинен пройти процес ідентифікації усієї доступної "лідерської" периферії (Enumeration), для чого призначений спеціальний формат пакета, званий "окликом" (Hail). Після ідентифікації пристрою та реєстрації відомостей про його максимально можливий час опитування воно включається до загального цикл Host-опитування. Залежно від його подальшої активності частота звернень може бути підвищена або знижена.

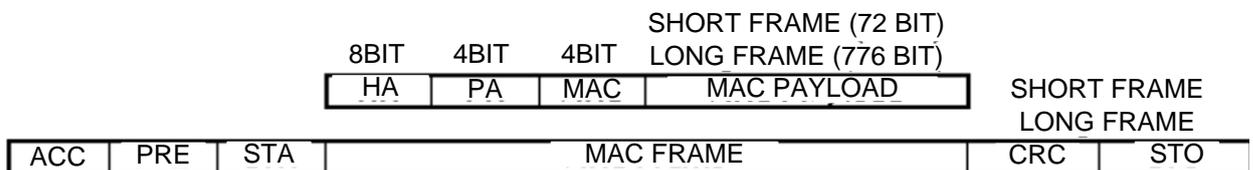


Рисунок 3.10– Формат MAC-пакета

У режимі співіснування  $\mu$  відводить на здійснення SIR $\mu$  основний пристрій в перші 50  $\mu$  s виробляє опитування периферії.  $\mu$ 1.1-комунікацій, а наступні 10 Пристрої, чутливі до часу затримки, не можуть отримати у цьому режимі належного обслуговування, та й кількість некритичною до циклу опитування обладнання зменшується до двох пристроїв. Над рівнем MAC розташовується шар LLC (Logical Link Control), функції якого зводяться до забезпечення надійного з'єднання для вищого рівня. Саме LLC відає пересиланням підтверджень про успішну доставку пакетів. Кожному пристрою тут присвоюється чотири кінцеві точки (Endpoints): перша

обслуговує "віртуальне" контрольне з'єднання, друга і третя - вхідні та вихідні з'єднання відповідно, а четверта є опціональною і може служити для ще одного вхідного або вихідного з'єднання. На прикладному ж рівні визначено лише два стандартні, обслуговуючих LLC, протоколу - HA (Home Appliances) і HID (Human Interface Device). Останній підтримує підключення USB-периферії за допомогою Control Transceiver Module (IRB-TM), що також є USB-пристроєм і функціонує як хаб (Hub).

LAN. Протокол забезпечує доступ в локальну мережу за допомогою інфрачервоного з'єднання (мережеве середовище LAN), де основними є клієнт і провайдер. Провайдер пасивний і чекає прояву ініціативи з боку клієнта, на якого покладаються всі функції з детектування і конфігурування з'єднання. Для цього використовується контрольний канал - через нього клієнт одержує необхідні відомості про провайдера з його IAS. Передбачено три методи доступу в мережу: через точку доступу (Access Point), типу "порт-порт" (Peer-to-Peer) і режим основного функціонування (Hosted). Access point представляє собою спеціалізований пристрій, що має доступ до мережі і IR-адаптер. При з'єднанні "порт-порт" два пристрої зв'язуються через інфрачервоне з'єднання, а LAN лише емулює локальну мережу. У цьому випадку кожен з учасників повинен грати ролі клієнта і провайдера одночасно. У режимі "хост" комп'ютер-провайдер не тільки надає послуги підключення до мережі для віддалених пристроїв, але і сам користується ними, тому що провайдер і клієнт ділять один і той же мережеву адресу і виникає потреба в спеціальному маршрутизуючому і фільтруючому ПЗ. При ініціалізації з'єднання встановлюються два "віртуальних каналу" - даних і контролю, причому обидва користуються TinyTP. У каналі даних зараз підтримуються пакунки типів 802.3 (Ethernet) і 802.5 (Token Ring). Формат фрейму даних LAN аналогічний формату ретранслюється мережевого протоколу. Драйвер LAN зазвичай не модифікує вміст пакетів, за винятком дескрипторів, і лише в режимі Hosted можуть бути внесені певні зміни. У каналі контролю обмін здійснюється на основі фреймів іншого формату. У першому його 8bit-поле міститься команда,

в такому ж наступному - кількість супутніх параметрів, а далі йдуть самі параметри, які "вкладаються" в проміжок 0-8160 bit.

Практично, сьогодні вже немає більш-менш поважаючої компанії, яка б не виробляла компоненти для ІЧ портів. Наприклад, компанія Crystal Semiconductor випускає прийнятно- передавальну мікросхему серії CS8130. Цей прилад є інтерфейсом між блоком UART, випромінюючим світлодіодом і світлочутливим PIN-діодом. Він працює у форматах ASK і TV форматі бездротового управління, має функції програмування потужності передачі та порогу спрацьовування приймача. Мікросхема виконана в корпусі типу SSOP дуже малого розміру (5x7 mm).

Як приклад "інтеграції" можна розглянути інтерфейс Ethernet 100Base-TX, доданого на материнську плату звичайного ПК (у зв'язку зі складністю схеми вона не додається). Блок UART, наявний на платі, можна використовувати як для того, щоб керувати провідним COM-портом інтерфейсу RS-232, використовуючи, наприклад, перетворювач напруги MAX562, так і для управління ІЧ-портом, відповідним стандарту Ethernet 100Base-TX, використовуючи трансівер CS8130. Зовнішній вивід PWRDN # мікросхеми CS8130 використовується для перекладу в третій стан ліній RXD і FORM / BSY, що дозволить використовувати UART. І навпаки, за допомогою висновків EN і SHDN # можна перевести в третій стан виходи R2OUT і R3OUT мікросхеми MAX562, передаючи управління UART трансіверу CS8130. В якості другого прикладу можна навести схему (також не додається) зовнішнього модуля, який можна підключити до наявного COM-порту іншого комп'ютера. Цей модуль дуже компактний і розташований в кінці метрового кабелю, вільно орієнтується в просторі.

### 3.3 Типові схеми передачі

#### 3.3.1 Точка-точка



Рисунок 3.11 – тип зв'язку «точка-точка»

Довжина з'єднання "точка-точка" варіюється в залежності від конкретної моделі обладнання. При створенні такого з'єднання слід завжди вибирати трасу таким чином, щоб виключити появу в майбутньому нездоланих перешкод, наприклад ріст дерев. Установка приймально-передавальних модулів може бути здійснена як на даху будівлі, так і на стіні. Ідеальна альтернатива будь-якому кабельному рішенням за ціною, швидкості установки, ліквідності капіталовкладень.

### 3.3.2 Точка доступу

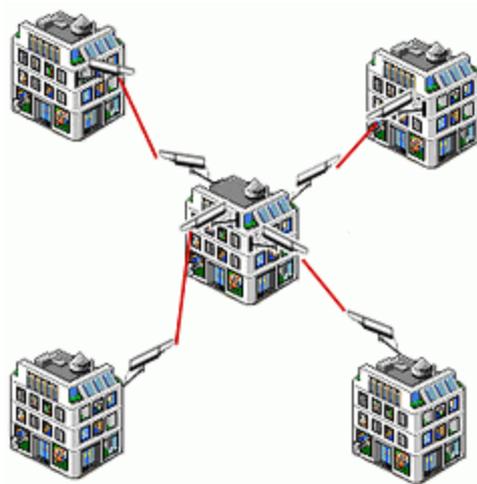


Рисунок 3.12 – тип зв'язку «точка доступу»

Інфрачервона передача даних від точки доступу має всі передумови на успіх завдяки комітету за стандартами, активно взявшись за справу, швидкості передачі в 4 Мбіт/с і сумісності між конкуруючими продуктами.

### 3.3.3 Магістраль

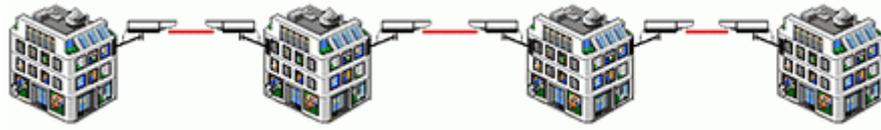


Рисунок 3.13 – тип зв'язку «магістраль»

Стандарт Ethernet (IEEE 802.3) визначив, що між двома вузлами локальної мережі може знаходитися не більше 4 активних пристроїв: HUB-ів, репітерів. Однак це обмеження легко усувається за допомогою більш інтелектуальних пристроїв: комутаторів, мостів, маршрутизаторів. Обладнання інфрачервоних каналів (для локальних мереж) не належить до класу активних або пасивних пристроїв Ethernet, а є конвертером електричних сигналів в оптичні. Тому при створенні магістралей обмеження на 4 активних пристроїв не буде діяти, якщо в точці з'єднання двох відрізків магістралі для зв'язку двох прийомопередатчиків використовується cross - over кабель. При дотриманні цього правила довжина магістралі теоретично не обмежена [12].

Для розроблюваної системи обрано тип зв'язку «точка-точка»

### 3.4 Структура апаратних засобів адаптивної FSO системи

Розглянемо структуру адаптивної FSO системи

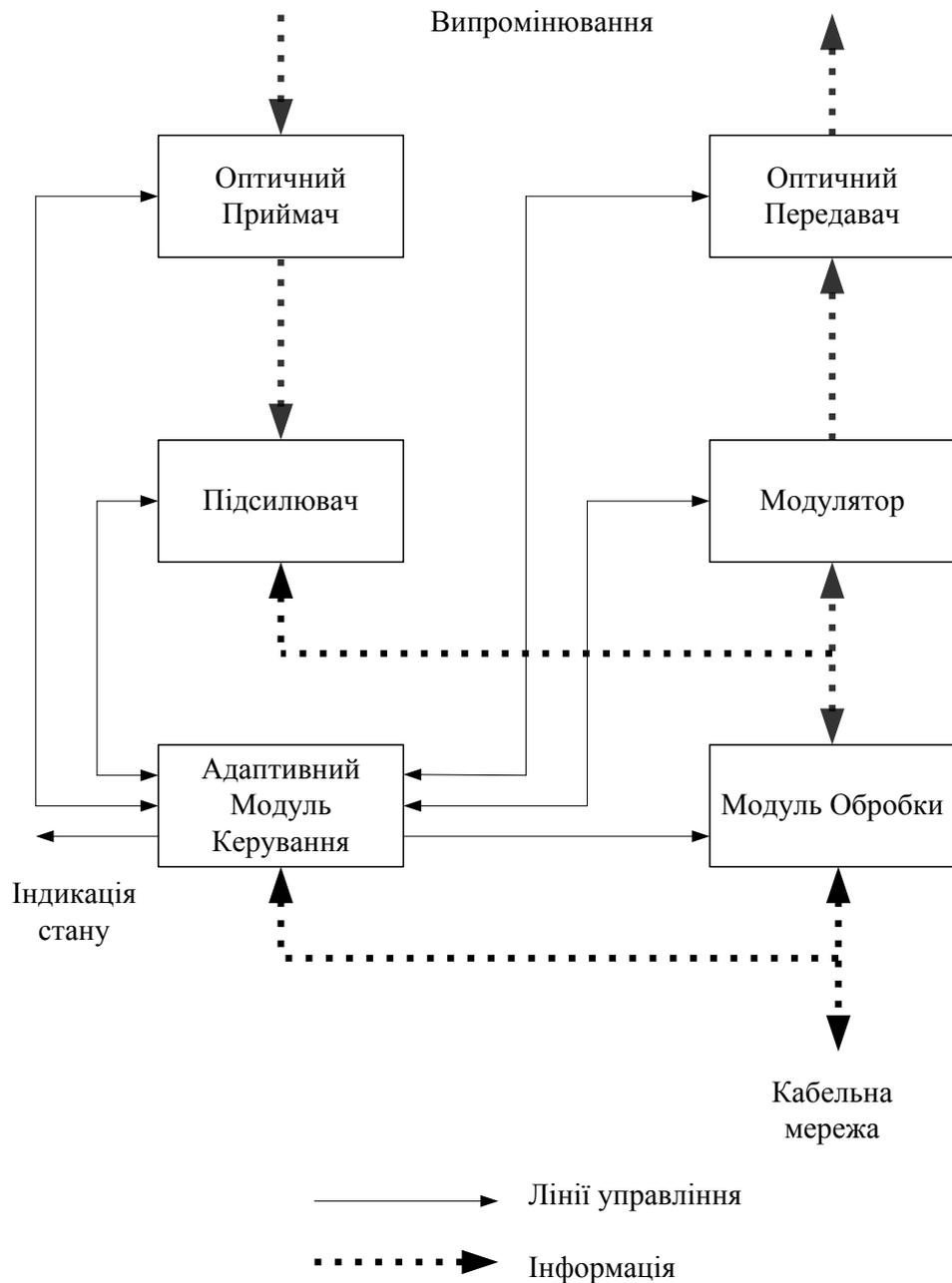


Рисунок 3.14 – Структура схема адаптивної FSO системи

Модуль обробки здійснює операції по логічному перетворенню даних.

Оптичний приймач виконує прийом оптичного сигналу. Може виконувати його перетворення в електричний сигнал. Підсилення сигналу від оптичного приймача перед введенням його модуль обробки виконується окремим підсилювачем. Оптичний передавач є пристроєм для створення

світлового потоку і залежно від конструкції може включати набір лазерних елементів або світлодіодів, оптичний пристрій фокусування і т.д.

Модулятор призначений для управління випромінювачем світлових хвиль відповідно до сигналів, що поступають від модуля обробки. Для контролю за станом і роботою адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку введено адаптивний модуль контролю. Адаптивний модуль контролю має такі функції:

1. Виконує моніторинг роботи всіх компонентів адаптивної FSO системи.
2. Виконує обмін інформацією з іншим пристроями.
3. Здійснює взаємодію із зовнішнім управляючим пристроєм через спеціальний порт або через мережевий інтерфейс.
4. Від датчиків одержує інформацію про температуру, вологість, атмосферний тиск, на підставі якої здійснює корекцію потужності випромінювача.
5. Від оптичного приймача та оптичного передавача одержує інформацію про фізичний стан оптичного каналу – рівні фонового засвічення, потужності сигналу, відхиленні світлового потоку і т.д.
6. У випадку непрацездатності каналу (погіршення погодних умов) вмикає адаптивний блок.

### 3.5 Структура схема модулятора та демодулятора FSO системи

Розроблювана АОЛС забезпечує передачу сигналів через атмосферу такого стандарту як 10base-T. Функціональна схема представлена модулятора та демодулятора на рисунку 3.15

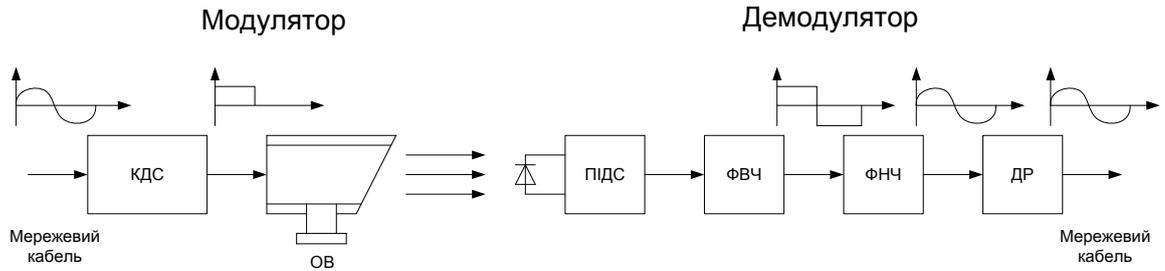


Рисунок 3.15– Структурна схема модулятора та демодулятора

Сигнал по мережевому кабелю надходить до керуючого джерела струму КДС, який вмикає оптичний випромінювач ОВ на додатні півперіоди початкового сигналу. На приймальній стороні оптичне випромінювання детектується фотодіодом та підсилюється підсилювачем ПДС. На виході підсилювача встановлений тригер Шмітта, який підвищує завадостійкість системи. У сигналі не повинно бути частотних складових більше ніж 10 МГц, тому сигнал проходить через фільтр нижніх частот ФНЧ. Фільтр високих частот необхідний для того щоб повернути сигнал у нуль після завершення передачі кадру. Драйвер ДР забезпечує підвищення потужності та розв'язку по постійному струму.

Далі більш детально розглянемо структурну схему демодулятора

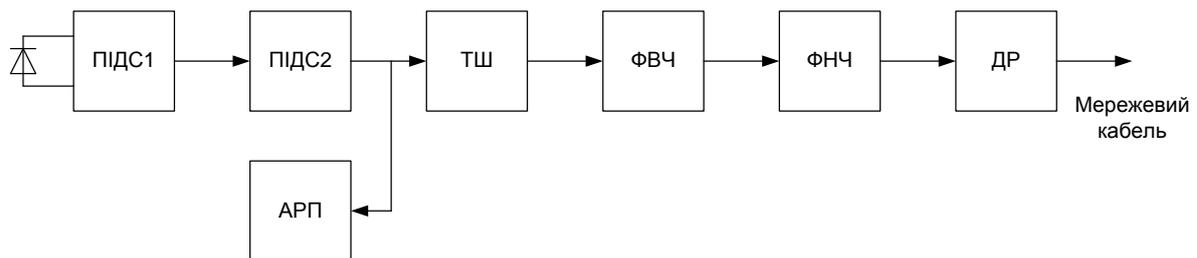


Рисунок 3.16– Структурна схема демодулятора

Потужність сигналу від фотодіода змінюється на декілька порядків в залежності від потужності ОВ, відстані до нього, погодних умов та інших факторів. Було встановлено, що при використанні ОВ потужністю 5 мВт, на

довжині хвилі близькій до 500 нм та дистанції 300-400 м є необхідним сумарий коефіцієнт підсилення близько  $1 \cdot 10^5$ . Цього можна добитися використанням лише як мінімум двукаскадного підсилювача. Сигнал з фотодіода, підсилений двома каскадами ПДС1 та ПДС2 потрапляє на тригер Шмідта ТШ. ТШ дозволяє нейтралізувати завади з амплітудою, меншою амплітудою сигналу, що суттєво підвищує завадостійкість. Дуже важливим елементом є автоматичний регулятор підсилення АРП. Від дозволяє ПДС2 уходити в стан насичення. Також АРП зберігає відношення сигнал/шум максимально високим. Це суттєво зменшує кількість помилок.

### 3.6 Електрична принципова схема модулятора

Схема передавача виконана на основі сучасної інтегральної мікросхеми 3646 фірми Maxim, яка дозволяє передавати інформацію з швидкістю від 155,5 МБіт/с до 622 МБіт/с. В якості джерела випромінювання використовується напівпровідниковий інжекційний лазерний діод ADL-85051TL (виробник Arima Lasers).

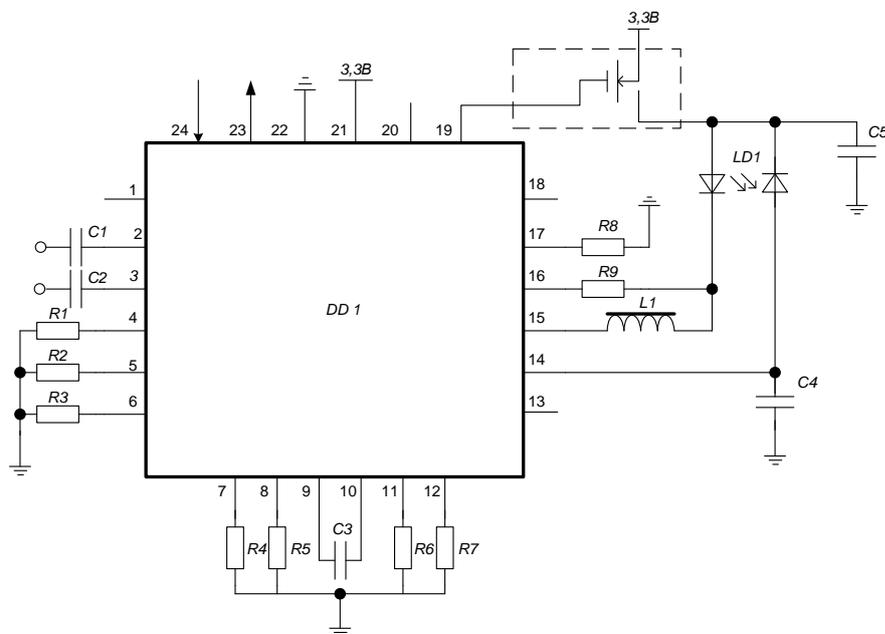


Рисунок 3.17– Схема електрична принципова передавача

### 3.7 Структурна схема термінального пристрою із резервним каналом

Термінальний пристрій може бути як єдиним фізичним пристроєм, так і являти собою окремі модулі, що з'єднуються інтерфейсами передачі даних. Необхідність інсталяції двох і більше частин однієї системи ускладнюють її встановлення та первинне налаштування. Загальна схема FSO термінального пристрою, що допускає наявність резервного каналу, представлена рис. 3.8.



Рисунок 3.8 – Схема електрична принципова приймача

Функціонально термінальний пристрій складається з модуля підключення до зовнішнього мережевого інтерфейсу, модуля підключення до резервного мережевого інтерфейсу (радіо-каналу), зовнішнього опціонального модуля контролю стану, модуля оптичного приймача-передавача, і модуля керування.

### 3.8 Розробка алгоритму роботи адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку та його програмна реалізація

#### 3.8.1 Опис алгоритму роботи і лабораторного макету адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку

Робота системи базується на взаємодії двох мобільних терміналів через проміжні апаратні вузли (ESP32 + лазер/сенсор). Загальна логіка функціонування комплексу складається з послідовних етапів перетворення інформації (див. додаток В): від вводу тексту в Android до його фізичної передачі світлом та зворотного декодування.

## 1. Ініціалізація та Інтерфейс Користувача (Додаток Е, Додаток Д)

При запуску мобільного додатку завантажуються графічний інтерфейс, описаний мовою XML (див. Додаток Е). Користувачу доступні такі елементи керування:

1. Вибір пристрою: Випадаючий список Spinner (@+id/deviceSpinner), куди завантажуються список спарених Bluetooth-пристроїв.
2. Керування з'єднанням: Кнопка Connect (@+id/btnConnect) для ініціалізації зв'язку з апаратною частиною.
3. Сервісні функції: Кнопки Calibrate (для налаштування лазера) та Clear Logs (очищення екрану).
4. Комунікація: Поле вводу тексту EditText та кнопка Send для відправки повідомлень.

Згідно з кодом(див. Додаток Д), при старті (onCreate) програма перевіряє наявність дозволів на використання Bluetooth (BLUETOOTH\_CONNECT, BLUETOOTH\_SCAN) для версій Android 12+.

## 2. Встановлення з'єднання (Додаток Г, Додаток Д)

Алгоритм підключення детально зображений на початку блок-схеми (див. Додаток Г):

1. Користувач обирає пристрій зі списку та натискає "Connect".

2. Система перевіряє стан адаптера. Якщо з'єднання ще не встановлено, викликається функція `connectToDevice`.
3. У окремому потоці створюється RFCOMM сокет за стандартним UUID (00001101-...).
4. Виконується спроба підключення `bluetoothSocket?.connect()`. У разі успіху статус змінюється на "Connected", а інтерфейс оновлюється.
5. Якщо виникає помилка, вона перехоплюється блоком `catch (e: IOException)` і виводиться на екран.

### 3. Передача даних (TX) (Додаток В, Додаток Г)

Процес передачі повідомлення ініціюється натисканням кнопки Send.

Відповідно до блок-схеми (див. Додаток Г) (гілка "Ввід тексту") та алгоритм (див. Додаток В) виглядає так:

1. Ввід: Текст зчитується з поля `etMessage`, перевіряється на порожнечу.
2. Кодування: Функція `sendData` перетворює рядок у масив байтів (`message.toByteArray()`).
3. Відправка: Байти записуються у вихідний потік Bluetooth (`outputStream?.write`).
4. Апаратна обробка (ESP32): Згідно з логікою системи (схема Додаток В), мікроконтролер ESP32 отримує ці дані та активує лазер, модулюючи промінь для передачі через повітряний простір.

### 4. Прийом даних (RX) (див. Додаток В)

Прийом інформації відбувається у фоновому режимі. Після встановлення з'єднання автоматично запускається функція `listenForData`. Алгоритм прийому, зображений у нижній частині блок-схеми (див. Додаток Г), працює наступним чином:

1. Очікування: Цикл `while (isConnected)` постійно моніторить вхідний потік `inputStream`.

2. Зчитування: Як тільки ESP32 (RX) декодує світловий сигнал від сенсора і передасть його по Bluetooth, додаток зчитує байти у буфер buffer.
3. Візуалізація: Отримані байти конвертуються у рядок (String) і через метод `runOnUiThread` додаються до текстового поля `tvLogs`.
4. Автопрокрутка: Для зручності реалізовано автоматичний скрол до останнього повідомлення (`fullScroll(View.FOCUS_DOWN)`).
5. Режим калібрування (див. Додаток Д)

Для точного наведення лазера на фотоприймач реалізовано спеціальний алгоритм, доступний через кнопку `btnCalibrate`.

1. При натисканні запускається функція `startCalibrationLoop` у окремому потоці.
2. Система циклічно відправляє символ "C" кожні 100 мілісекунд (`Thread.sleep(100)`), що змушує лазер мерехтіти з високою частотою, дозволяючи візуально налаштувати оптичний канал.
3. Повторне натискання зупиняє цей цикл.

### 3.9 Програмна реалізація моделювання роботи адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку

За створеним алгоритмом (наведені у додатку В) було виконано програмну реалізацію мобільного додатку на мові Kotlin (див. Додаток Д) та прошивки мікроконтролера на мові C (див. Додаток Ж). Графічний інтерфейс користувача реалізовано мовою розмітки XML (див. Додаток Е).

Було створено програмний комплекс, який забезпечує передачу текстової інформації через оптичний канал та керування апаратною частиною системи за допомогою технології Bluetooth.

Для того, щоб скористатись програмою, користувачу необхідно виконати наступні дії:

1. Увімкнути живлення апаратного модуля (ESP32) та запустити мобільний додаток із назвою «LaserMessenger». Після цього користувач побачить на екрані інтерфейс керування із випадаючим списком доступних пристроїв (див. Додаток Е).
2. У списку вибрати пристрій (наприклад, «Laser\_Transceiver») та натиснути кнопку «Connect». Після встановлення з'єднання статус у полі «Status» зміниться на «Connected».
3. Для передачі повідомлення необхідно ввести текст у поле вводу та натиснути кнопку «Send». Після цього система автоматично перетворить текст у байти, передасть їх на лазерний випромінювач, а на стороні приймача повідомлення буде декодовано та виведено у полі логування на екрані смартфона.
4. Для налаштування оптичного каналу передбачено режим «Calibrate». При натисканні відповідної кнопки система переходить у циклічний режим передачі контрольного сигналу для юстування лазера.

Найменування програми — «LaserMessenger». Для роботи програми на мобільному пристрої необхідно близько 15 МБ вільного місця. Програма написана мовою Kotlin у середовищі розробки Android Studio.

Моделювання роботи алгоритму та тестування системи здійснювалося на смартфоні під управлінням операційної системи Android (версія 12 і вище) та мікроконтролері ESP32 DevKit V1.

Результати роботи програми показано на рисунку 3.19.

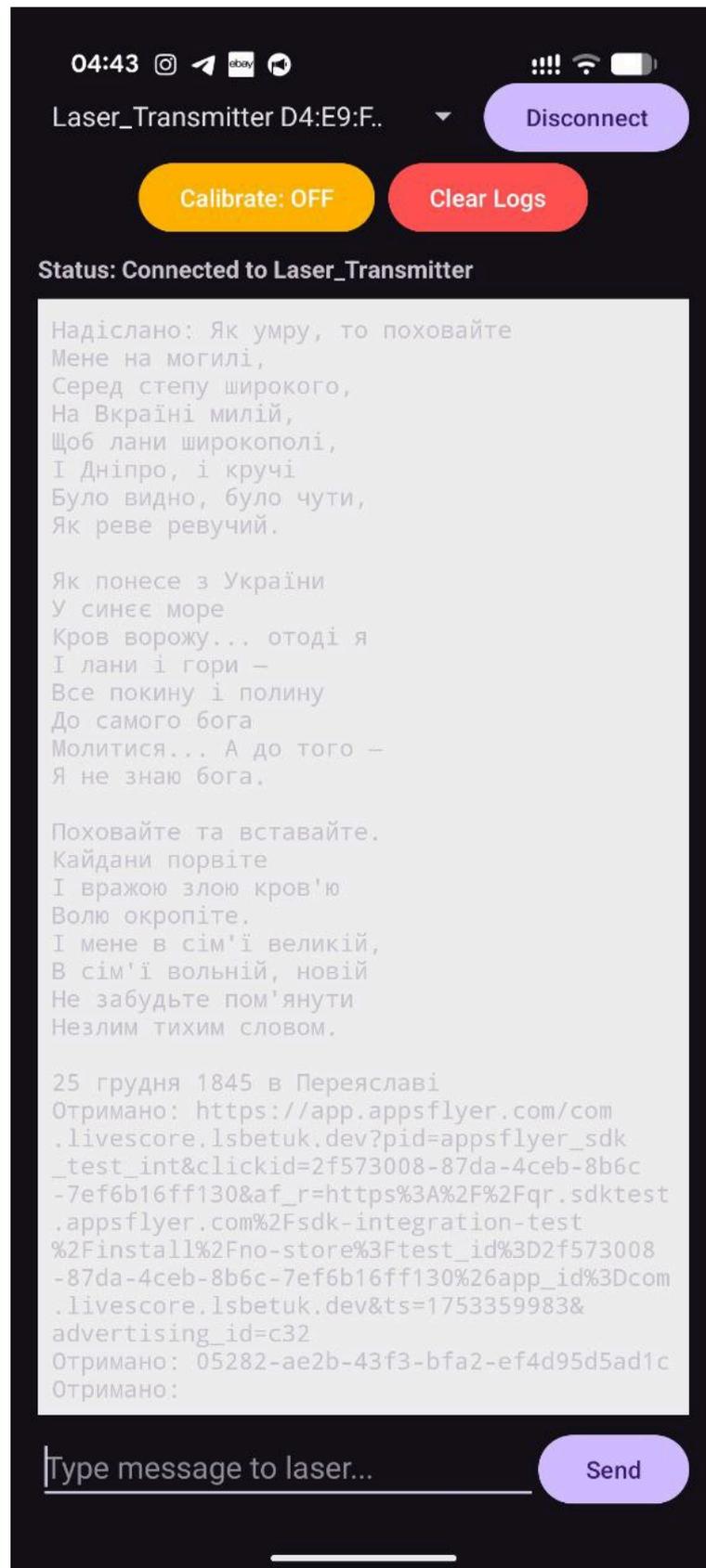


Рисунок 3.19 – Результати роботи програми

### 3.10 Апаратна реалізація пристрою адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку

Апаратна частина розробленої системи складається з двох ідентичних прийомо-передавальних вузлів (трансиверів), кожен з яких забезпечує дуплексний зв'язок між мобільним терміналом та оптичним каналом.

Основою апаратної реалізації обрано налагоджувальну плату ESP32 DevKit V1 на базі мікроконтролера ESP-WROOM-32. Вибір даної платформи обумовлений наявністю вбудованого модуля Bluetooth (для зв'язку зі смартфоном) та декількох апаратних інтерфейсів UART для керування периферією.

До складу апаратного комплексу входять наступні функціональні блоки:

1. Блок керування (MCU): Мікроконтролер ESP32, який виконує роль шлюзу даних. Він приймає пакети даних через протокол Bluetooth Serial Port Profile (SPP) та ретранслює їх у послідовний інтерфейс UART.

2. Блок оптичного випромінювання (TX): Реалізовано на базі лазерного модуля KY-008 (довжина хвилі 650 нм, потужність <5 мВт). Модуль підключено до цифрового виходу GPIO 14 (TX2) мікроконтролера. Для забезпечення температурної стабільності та енергоефективності в програмному коді реалізовано інвертовану логіку керування живленням лазера.

3. Блок фотоприйому (RX): Використано модуль фотосенсора з компаратором, який перетворює оптичні імпульси в цифрові електричні сигнали. Вихід сенсора підключено до входу GPIO 13 (RX2). Для узгодження логічних рівнів між сенсором (5В) та мікроконтролером (3.3В) застосовано дільник напруги, що забезпечує захист вхідних портів ESP32.

Електрична схема пристрою живиться від стандартної шини USB (5В), що дозволяє використовувати як джерело живлення портативні акумулятори (Power Bank) або USB-порт комп'ютера, забезпечуючи мобільність системи.

Взаємодія компонентів здійснюється на швидкості 9600 бод, що є компромісним рішенням для забезпечення стабільності передачі даних в умовах атмосферних завад при використанні найпростіших модулів модуляції/демодуляції.

Для збирання макету пристрою не потрібне виготовлення друкованої плати; монтаж виконано на безпачній макетній платі (breadboard) з використанням з'єднувальних провідників, що забезпечує гнучкість при налаштуванні та модернізації апаратної частини.

На рисунку 3.20 показаний пристрій для передачі інформації за допомогою атмосферного оптичного зв'язку

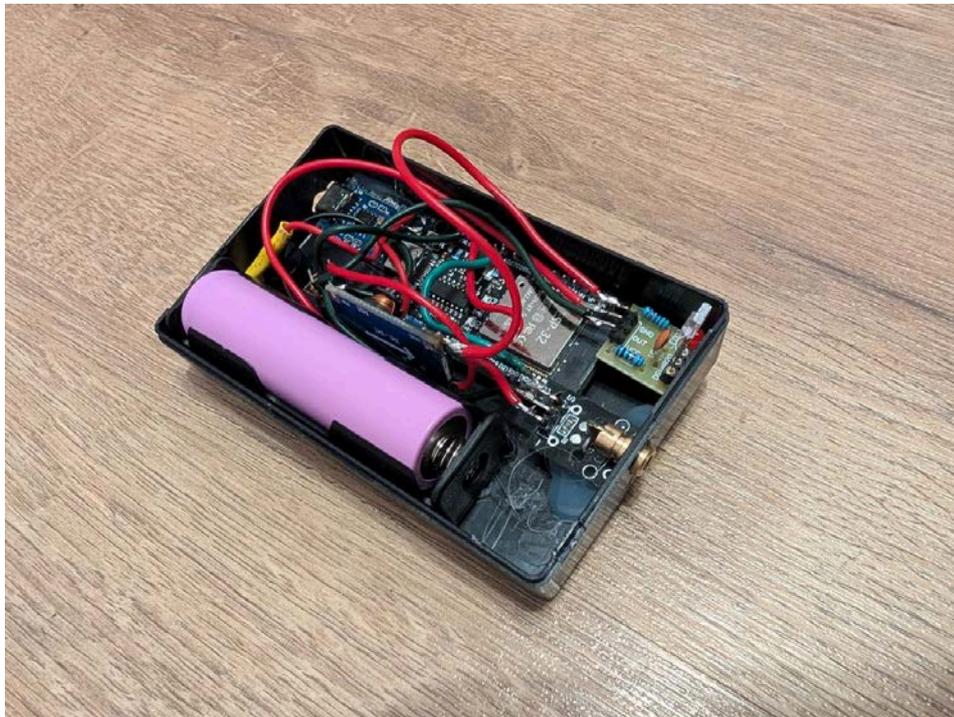


Рисунок 3.20 – Пристрій для передачі інформації за допомогою атмосферного оптичного зв'язку

### 3.11 Висновки до розділу 3

Отже можна зробити підсумок зробленої роботи. Було проаналізовано обрано методи передачі інформації, які будуть використовуватись у розроблюваній адаптивній системі атмосферного зв'язку. Було розглянуто протоколи які та стандарти передачі, які також будуть застосовуватись у запропонованій адаптивній FSO системі. Розроблено структурну схему систем. Також розроблено функціональну схему модулятора та демодулятора. Обрано елементну базу для розроблюваної системи, наведено електрично принципові схеми приймача та передавача. Для отримання уявлень про роботу розроблюваної системи, за складеною структурною схемою було розроблено макет пристрою та алгоритм роботи адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку. Також була виконана його програмна реалізація. В результаті були проаналізовані основні характеристики адаптивної FSO системи.

#### 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Науково-технічна розробка має право на існування та впровадження, якщо вона відповідає вимогам часу, як в напрямку науково-технічного прогресу та і в плані економіки. Тому для науково-дослідної роботи необхідно оцінювати економічну ефективність результатів виконаної роботи.

##### 4.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту дослідження за темою «Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку» є оцінювання науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу рекомендується здійснювати із застосуванням 5-ти бальної системи оцінювання за 12-ма критеріями [23].

Таблиця 4.1 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

Критерії	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції	4	3	3
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	4	4	3
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	3	3	3
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	2	2	3
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	3	4	3
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	3	3	3
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	3	2	2
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	4	4	4
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	2	2	2
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	3	4	4
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	3	4	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	3	2	3
Сума балів	37	37	37
Середньоарифметична сума балів $CB_c$	37,0		

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 4.1, зробимо висновок щодо науково-технічного рівня і рівня комерційного потенціалу розробки. При цьому використаємо рекомендації, наведені в [23].

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку» становить 37,0 бала, що, відповідно до [23], свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

#### 4.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки

Узагальнений коефіцієнт якості ( $B_n$ ) для нового технічного рішення розрахуємо за формулою [24]:

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i, \quad (4.1)$$

де  $k$  – кількість найбільш важливих технічних показників, які впливають на якість нового технічного рішення;

$\alpha_i$  – коефіцієнт, який враховує питому вагу  $i$ -го технічного показника в загальній якості розробки. Коефіцієнт  $\alpha_i$  визначається експертним

шляхом і при цьому має виконуватись умова  $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$ ;

$\beta_i$  – відносне значення  $i$ -го технічного показника якості нової розробки.

Результати порівняння зведемо до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Порівняння основних параметрів розробки та аналога.

Показники (параметри)	Одиниця вимірювання	Аналог	Проектований продукт	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
1 Робочий спектральний діапазон	нм	980	980+1540	1,57	0,25
2 Швидкість передачі інформації	Гбіт/с	1	1	1	0,2
2 Дальність зв'язку	км	10	15	1,5	0,3
4 Кут розбіжності лазерних модулів	мрад	2	2	1	0,15
5 Діаметр апертури передавача/приймача	см	20	20	1	0,1

Узагальнений коефіцієнт якості ( $B_n$ ) для нового технічного рішення складе:

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i = 1,57 \cdot 0,25 + 1 \cdot 0,2 + 1,5 \cdot 0,3 + 1 \cdot 0,15 + 1 \cdot 0,1 = 1,29.$$

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,29 рази.

### 4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

#### 4.3.1 Витрати на оплату праці

##### Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [23]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

де  $k$  – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

$M_{ni}$  – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

$t_i$  – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці,  $T_p=20$  дні.

$$Z_o = 24650,00 \cdot 30 / 20 = 36975,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.3 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник науково-дослідної роботи (менеджер проєкту) з дослідження лазерних оптичних систем	24650,00	1232,50	30	36975,00
Інженер-розробник адаптивної лазерної системи	23870,00	1193,50	40	47740,00
Консультант (провідний фахівець телекомунікаційних систем і мереж)	22600,00	1130,00	5	5650,00
Технік	9200,00	460,00	15	6900,00
Всього				97265,00

#### Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

де  $C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

$t_i$  – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.4)$$

де  $M_M$  – розмір мінімальної місячної заробітної плати, прийmemo  $M_M=8000,00$  грн;

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення (табл. Б.2, додаток Б) [23];

$K_c$  – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок;

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 20$  дн;

$t_{зм}$  – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 8000,00 \cdot 1,50 \cdot 1,15 / (20 \cdot 8) = 86,25 \text{ грн.}$$

$$Z_{pl} = 86,25 \cdot 12,00 = 1035,00 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.4 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Монтаж обладнання	12,00	4	1,50	86,25	1035,00
Підготовка робочого місця розробника	8,00	3	1,35	77,63	621,00
Інсталяція програмного забезпечення розробки	7,50	4	1,50	86,25	646,88
Інсталяція програмного забезпечення підтримки адаптивної лазерної системи оптичного зв'язку	9,50	4	1,50	86,25	819,38
Монтаж компонентів досліджуваної техніки	24,00	5	1,70	97,75	2346,00
Випробування дослідних блоків	16,00	5	1,70	97,75	1564,00
Налагодження оптичних модулів	5,50	6	2,00	115,00	632,50
Технічна підтримка експерименту	16,00	3	1,35	77,63	1242,00
Всього					8906,75

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де  $H_{\text{дод}}$  – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{дод}} = (97265,00 + 8906,75) \cdot 10 / 100\% = 10617,18 \text{ грн.}$$

#### 4.3.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуемо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (4.6)$$

де  $H_{zn}$  – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (97265,00 + 8906,75 + 10617,18) \cdot 22 / 100\% = 25693,56 \text{ грн.}$$

#### 4.3.3 Сировина та матеріали

Витрати на матеріали ( $M$ ), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{в}j}, \quad (4.7)$$

де  $H_j$  – норма витрат матеріалу  $j$ -го найменування, кг;

$n$  – кількість видів матеріалів;

$C_j$  – вартість матеріалу  $j$ -го найменування, грн/кг;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ );

$B_j$  – маса відходів  $j$ -го найменування, кг;

$C_{\text{в}j}$  – вартість відходів  $j$ -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 4,000 \cdot 212,00 \cdot 1,05 - 0 \cdot 0 = 890,40 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.5 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Офісний папір BIC Fine COPY 500/80 A4	212,00	4,000	0	0	890,40
Папір для записів BIC Fine Papers A5	85,00	4,000	0	0	357,00
Органайзер офісний BIC Fine	215,00	3,000	0	0	677,25
Канцелярське приладдя (набір офісного працівника) BIC Fine	235,00	3,000	0	0	740,25
Картридж для принтера EPSON EX530 black	1159,00	1,000	0	0	1216,95
Диск оптичний BIC Fine CD-RW	30,60	4,000	0	0	128,52
Flesh-пам'ять Kingston Data Traveler 128 GB	299,00	1,000	0	0	313,95
Тека для паперів BIC Fine	102,00	4,000	0	0	428,40
Інше	200,00	1,000	0	0	210,00
<b>Всього</b>					<b>4962,72</b>

#### 4.3.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_e$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.8)$$

де  $H_j$  – кількість комплектуючих  $j$ -го виду, шт.;

$C_j$  – покупна ціна комплектуючих  $j$ -го виду, грн;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ ).

$$K_e = 1 \cdot 6780,00 \cdot 1,08 = 7322,40 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.6 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Лазерний модуль 1 p=200 мВт, l=980 нм	1	6780,00	7322,40
Лазерний модуль 2 p=300 мВт, l=1540 нм	1	7420,00	8013,60
Адаптивна модель передавача (швидкість передачі даних – до 1Гбіт/сек)	1	4890,00	5281,20
Адаптивна модель приймача (дальність і тип зв'язку – 15 км, точка- точка)	1	3860,00	4168,80
Оптичний модуль трансівера (коліматор, фільтр, об'єктив)	1	9899,00	10690,92
Блок мікропроцесорного управління	1	2790,00	3013,20
Всього			38490,12

#### 4.3.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

де  $C_i$  – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.}i}$  – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 22599,00 \cdot 1 \cdot 1,08 = 24406,92 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.7 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Смартфон Xiaomi 15T 12/512GB Rose Gold	1	22599,00	24406,92
Маршрутизатор інтернет WiFi6 TP-Link Archer AX12	1	2789,00	3012,12
Всього			27419,04

#### 4.3.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.}i} \cdot K_i, \quad (4.10)$$

де  $C_{\text{инрг}}$  – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.}i}$  – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 415,00 \cdot 2 \cdot 1,03 = 854,90 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Абонентна плата доступу до мережі Internet (за місяць)	2	415,00	854,90
Підтримка домену (місяць)	2	36,80	75,81
Доступ до Open AI API	2	699,00	1439,94
Підписка Visual Studio Code	2	40,56	83,55
Всього			2454,20

#### 4.3.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б}}{T_{г}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.11)$$

де  $Ц_{б}$  – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$  – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{г}$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (23999,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 1333,28 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.9 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Персональний комп'ютер розробника програмного забезпечення (Ноутбук HP Pavilion 15-eh3018ua (9H8T3EA) Fog Blue / 15.6" IPS Full HD / AMD Ryzen 5 7320U / RAM 16 ГБ / SSD 512 ГБ)	23999,00	3	2	1333,28
Робоче місце розробника системи	8520,00	5	2	284,00
Пристрої виводу інформації (HP Laser)	7899,00	4	2	329,13
Оргтехніка	7450,00	5	2	248,33
Приміщення лабораторії розробки	385000,00	35	2	1833,33
Робоче місце фахівця	8999,00	3	2	499,94
Пристрої передачі цифрової інформації	1789,00	4	2	74,54
OS Windows 11 Pro	10450,00	3	2	580,56
Пакет Microsoft Office	7560,00	3	2	420,00
Всього				5603,11

## 4.3.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію ( $B_e$ ) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.12)$$

де  $W_{yi}$  – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

$t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

$C_e$  – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; прийmemo  $C_e = 12,56$  грн;

$K_{eni}$  – коефіцієнт, що враховує використання потужності,  $K_{eni} < 1$ ;

$\eta_i$  – коефіцієнт корисної дії обладнання,  $\eta_i < 1$ .

$$B_e = 0,08 \cdot 320,0 \cdot 12,56 \cdot 0,95 / 0,97 = 321,54 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.10 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер розробника програмного забезпечення (Ноутбук HP Pavilion 15-eh3018ua (9H8T3EA) Fog Blue / 15.6" IPS Full HD / AMD Ryzen 5 7320U / RAM 16 ГБ / SSD 512 ГБ)	0,08	320,0	321,54
Робоче місце розробника системи	0,10	320,0	401,92
Пристрої виводу інформації (HP Laser)	0,12	1,8	2,71
Оргтехніка	0,25	2,3	7,22
Робоче місце фахівця	0,32	40,0	160,77
Пристрої передачі цифрової інформації	0,06	320,0	241,15
Лазерний модуль 1 р=200 мВт, l=980 нм	0,02	100,0	25,12
Лазерний модуль 2 р=300 мВт, l=1540 нм	0,03	100,0	37,68
Адаптивна модель передавача (швидкість передачі даних – до 1Гбіт/сек)	0,10	100,0	125,60
Адаптивна модель приймача (дальність і тип зв'язку – 15 км, точка-точка)	0,10	100,0	125,60
Всього			1449,31

## 4.3.9 Службові відрядження

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cb} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cb}}{100\%}, \quad (4.14)$$

де  $H_{cb}$  – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo  $H_{cb} = 20\%$ .

$$B_{св} = (97265,00 + 8906,75) \cdot 20 / 100\% = 21234,35 \text{ грн.}$$

4.3.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{сн} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{сн}}{100\%}, \quad (4.15)$$

де  $H_{сн}$  – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo  $H_{сн} = 35\%$ .

$$B_{сн} = (97265,00 + 8906,75) \cdot 35 / 100\% = 37160,11 \text{ грн.}$$

#### 4.3.11 Інші витрати

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_s = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{is}}{100\%}, \quad (4.16)$$

де  $H_{is}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{is} = 55\%$ .

$$I_s = (97265,00 + 8906,75) \cdot 55 / 100\% = 58394,46 \text{ грн.}$$

#### 4.3.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.17)$$

де  $H_{нзв}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo  $H_{нзв} = 100\%$ .

$$B_{нзв} = (97265,00 + 8906,75) \cdot 100 / 100\% = 106171,75 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{ood} + Z_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (4.18)$$

$$B_{заг} = 97265,00 + 8906,75 + 10617,18 + 25693,56 + 4962,72 + 38490,12 + 27419,04 + 2454,20 + 5603,11 + 1449,31 + 21234,35 + 37160,11 + 58394,46 + 106171,75 = 445821,67 \text{ грн.}$$

Загальні витрати  $ZB$  на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.19)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta=0,9$ .

$$ZB = 445821,67 / 0,9 = 495357,41 \text{ грн.}$$

4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором

Результати дослідження проведені за темою «Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку» передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку.

В цьому випадку майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних:

$\Delta N$  – збільшення кількості споживачів пристрою, у періоди часу, що аналізуються, від покращення його певних характеристик;

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік	4-й рік
Збільшення кількості споживачів, осіб	20	40	50	30

$N$  – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, прийmemo 1200 осіб;

$C_o$  – вартість пристрою у році до впровадження результатів розробки, прийmemo 68599,00 грн;

$\pm \Delta C_o$  – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, прийmemo 2065,21 грн.

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора  $\Delta \Pi_i$  для кожного із 4-х років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховуємо за формулою [23]:

$$\Delta \Pi_i = (\pm \Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\mathcal{G}}{100}\right), \quad (4.20)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2025 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт  $\lambda = 0,8333$ ;

$\rho$  – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).  
Прийmemo  $\rho = 35\%$ ;

$\mathcal{G}$  – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2025 році  $\mathcal{G} = 18\%$ ;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\Delta \Pi_1 = (2065,21 \cdot 1200,00 + 70664,21 \cdot 20) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 927002,11 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\Delta\Pi_2 = (2065,21 \cdot 1200,00 + 70664,21 \cdot 60) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 1600318,95 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\Delta\Pi_3 = (2065,21 \cdot 1200,00 + 70664,21 \cdot 110) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 2441964,99$$

грн.

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\Delta\Pi_4 = (2065,21 \cdot 1200,00 + 70664,21 \cdot 140) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 2946952,62$$

грн.

Приведена вартість збільшення всіх чистих прибутків  $ПП$ , що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки:

$$ПП = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^i}, \quad (4.21)$$

де  $\Delta\Pi_i$  – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, грн;

$T$  – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки;

$\tau$  – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні,  $\tau = 0,11$ ;

$t$  – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

$$\begin{aligned} ПП &= 927002,11/(1+0,11)^1 + 1600318,95/(1+0,11)^2 + 2441964,99/(1+0,11)^3 + \\ &+ 2946952,62/(1+0,11)^4 = 835137,04 + 1298854,76 + 1785543,75 + 1941248,97 = 58607 \\ &84,52 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Величина початкових інвестицій  $PV$ , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки:

$$PV = k_{инв} \cdot 3B, \quad (4.22)$$

де  $k_{инв}$  – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію, приймаємо  $k_{инв}=2$ ;

$3B$  – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо 495357,41 грн.

$$PV = k_{инв} \cdot 3B = 2 \cdot 495357,41 = 990714,82 \text{ грн.}$$

Абсолютний економічний ефект  $E_{абс}$  для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки становитиме:

$$E_{абс} = ПП - PV \quad (4.23)$$

де  $ПП$  – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 5860784,52 грн;

$PV$  – теперішня вартість початкових інвестицій, 990714,82 грн.

$$E_{абс} = ПП - PV = 5860784,52 - 990714,82 = 4870069,70 \text{ грн.}$$

Внутрішня економічна дохідність інвестицій  $E_e$ , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки:

$$E_e = \sqrt[T_{жс}]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1, \quad (4.24)$$

де  $E_{абс}$  – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 4870069,70 грн;

$PV$  – теперішня вартість початкових інвестицій, 990714,82 грн;

$T_{жс}$  – життєвий цикл науково-технічної розробки, тобто час від початку її розробки до закінчення отримання позитивних результатів від її впровадження, 4 роки.

$$E_g = T_{жс} \sqrt[4]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1 = (1 + 4870069,70/990714,82)^{1/4} = 0,56.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій  $\tau_{мін}$  :

$$\tau_{мін} = d + f, \quad (4.25)$$

де  $d$  – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні  $d = 0,1$ ;

$f$  – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, приймемо 0,3.

$\tau_{мін} = 0,1 + 0,3 = 0,4 < 0,56$  свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій  $E_g$ , вища мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати в науково-дослідну роботу за темою «Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку» доцільно.

Період окупності інвестицій  $T_{ок}$  які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g}, \quad (4.26)$$

де  $E_g$  – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{ок} = 1 / 0,56 = 1,79 \text{ р.}$$

$T_{ок} < 3$ -х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

#### 4.5 Висновки до розділу 4

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку» становить 37,0 бала, що, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

При оцінюванні за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,29 рази.

Також термін окупності становить 1,79 р., що менше 3-х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

Отже можна зробити висновок про доцільність проведення науково-дослідної роботи за темою «Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку».

## ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження сучасних методів та засобів оптичного зв'язку, зокрема технологій FSO (Free Space Optics). На основі проаналізованих даних визначено ключові переваги лазерних атмосферних систем, такі як висока пропускну здатність та несприйнятливість до електромагнітних завад. Окрему увагу приділено аналізу впливу атмосферних умов (дощу, снігу, серпанку), які є основним обмежуючим фактором для стабільності оптичного каналу.

Як ефективний метод підвищення надійності та завадостійкості системи запропоновано та вдосконалено алгоритм адаптивного контролю. Принцип дії розробленого рішення базується на автоматичному керуванні потужністю лазерного випромінювача залежно від поточних характеристик середовища передачі, з використанням контролю сигналу на двох довжинах хвиль.

Практична складова роботи полягала у проектуванні та створенні макета адаптивної системи лазерного атмосферного зв'язку. У ході розробки було:

1. Проаналізовано сучасні методи і засоби оптичного зв'язку, принципи і технології FSO систем.
2. Проведено аналіз впливу атмосферних умов на роботу FSO систем та методів підвищення їх завадостійкості .
3. Удосконалено метод адаптивного контролю потужності лазерного випромінювача FSO системи, який базується на аналізі поточних характеристик каналу передачі інформації.
4. Обґрунтовано вибір елементної бази функціональних блоків адаптивної лазерної системи відкритого оптичного зв'язку.
5. Розроблено експериментальний макет адаптивної системи лазерного атмосферного зв'язку та комп'ютерну програму автоматизованого контролю потужності випромінювача.
6. Виконано економічне обґрунтування та розрахувати техніко-економічні показники розробки.

Отримані результати свідчать про те, що запропонований підхід дозволяє розширити функціональні можливості системи та підвищити надійність передачі даних у відкритому просторі. Також у роботі виконано розрахунок техніко-економічних показників, що підтверджує доцільність впровадження розробки

**ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Васюра А. С., Павлов С. В., Прокопова М. О., Тужанський С. Є., Козловська Т. І. Адаптивна оптика. Навчальний посібник, 2015, 284 с.
2. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання : навч. посіб. : у 2 кн. / В. О. Чадюк. Київ : Політехніка, 2019. Кн. 2. 336 с.
3. Кожем'яко В. П., Павлов С. В., Тарновський М. Г. Оптоелектронна схемотехніка. Навчальний посібник, 2009, 189 с. ISBN 978-966-641-284-6
4. Бобицький Я. В. Лазерні технології : навч. посіб. / Я. В. Бобицький, Г. Л. Матвіїшин. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2015. – 320 с.
5. Оптоелектронні і лазерні системи в електроніці та медицині : навчальний посібник / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха, І. М. Лукавенко. Суми : Сумський державний університет, 2022. 127 с.
6. Рязанов С.С., Токар Л.О. Аналіз атмосферного загасання каналу Free Space Optical, Харківський національний університет радіоелектроніки, УДК 681.7:004.7
7. Кожем'яко В.П. Оптоелектронна схемотехніка. / В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов, М.Г. Тарновський. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 189 с.
8. Блаженний Н.В. Постановка задачі структурного синтезу атмосферно-оптичної системи. / Кирпач Л.А., Блаженний Н.В., Голубенко О.І. / Науково-практичний журнал «Зв'язок». К.: ДУТ, 2021. № 3 (2021). С. 22 – 26.
9. Кожем'яко В.П., Готра З.Ю., Павлов С.В., Микитюк З.М., Готра О.З. Схемотехніка сучасного приладобудування. Ч.3 – Оптичні сенсори. Навчальний посібник. Вінниця: ВДГУ, 2002. 164 с.
10. Толубко В.Б. Підвищення показників якості системи управління послугами мережами майбутнього / В. Б. Толубко, Л.Н. Беркман, Л. П. Крючкова, А. Ю. Ткачов // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. 2018. № 3. С. 5-11.

11. Гаджиев М.М. Аналіз, синтез і оптимізація мереж зв'язку. Математичні основи оптимізації телекомунікаційних систем: підручник [для студ. вищ. техн. навч. закл.] / [М.В. Захарченко, М.М. Гаджиев, С.М. Горохов та ін.]; під ред. М.В. Захарченко. Одеса, ОНАЗ ім. О.С. Попова. 2010. 240 с.

12. Сайко В.Г., Казіміренко В.Я., Літвінов Ю.М. Мережі бездротового широкосмугового доступу. К.: ДУТ, 2015. 196 с.

13. Розорінов Г. М Соловійов Д.О., Яковенко Л. В. Мережі передавання даних: Напрямні системи оптичного зв'язку. Навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 128 с.

14. Коломійцев О.В. Метод передачі даних у атмосферно-оптичній лінії зв'язку для технології остання миля / О.В. Коломійцев, В.Ф. Третьак, А.М. Катунін, О.В. Філіппенков, В.В. Посохов, О.В. Любченко // Grail of Science. – 2025. – Iss.

15. О. В. Любченко., Системи управління, навігації та зв'язку УДК 004.7:004.38:621.373.8:621.39151. – С. 606-616

16. Arduino Project Hub: [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://create.arduino.cc/projecthub>

17. Альошин Г. В. Ефективність лазерних інформаційно-вимірювальних систем / Г.В. Альошин, О. В. Коломійцев, В. В. Посохов, С. І. Клівець // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2018. т. 2. С. 59-65. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS\\_2018\\_2\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2018_2_9).

18. Бурковський, С.І., Рощупкін, Є.С., & Шрамков, А.Ю. (2004). Вплив похибок визначення координат виносних пунктів пасивної багатопозиційної системи на точність вимірювання координат джерела випромінювання. Збірник наукових праць XI ВПС, 2(11), 103–108. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5088274>

19. Козлюк І. О., Панченко О. В. Аналіз ефективності використання атмосферних оптичних ліній зв'язку в сучасних мережах доступу // Вісник

Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2018. № 5. С. 112-116.

20. Конахович Г. Ф., Климчук В. П. Беспроводові мережі передачі даних. "МК-Прес", 2006.

21. Каток В. Б. Волоконно-оптичні системи зв'язку: Навч. посібник. — Університет «Україна», 2009.

22. Стеклов В. К., Беркман Л. Н. Телекомунікаційні мережі: Підручник. — Техніка, 2001. 392 с.

23. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. Вінниця : ВНТУ, 2021. 42 с.

24. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепа. Вінниця : ВНТУ, 2016. 113 с.

## ДОДАТКИ

ДОДАТОК А  
(Обов'язковий)  
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. каф. БМІОЕС,

к.т.н., доц.

 Л.Г. Коваль

« 30 » 09 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ  
на магістерську кваліфікаційну роботу  
«Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку»  
08-41. МКР.001.00.000 ТЗ

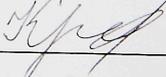
Керівник роботи

к.т.н., доцент,

доцент кафедри БМІОЕС

 Тужанський С.Є.

Виконавець: ст. гр. ЛТО-24м

 Кріт Є.І.

## 1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету від 24.09.2025 р., №313 та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 14.09.2025 р.

Дата закінчення: 15.12.2025 р.

## 2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Мета роботи – розширення функціональних можливостей лазерної системи відкритого оптичного зв'язку з адаптацією до атмосферних умов з моделюванням її роботи.

Для досягнення мети в магістерській кваліфікаційній роботі було поставлено такі завдання:

- проаналізувати основні компоненти FSO систем та загальні принципи їх побудови;
- проаналізувати вплив атмосферних умов на роботу FSO систем та методів за допомогою яких можна підвищити завадостійкість системи;
- розробити алгоритм роботи адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку та подальшу його програмну реалізація;
- отримати розрахунок надійності роботи системи;
- оцінити технічні характеристики основних параметрів роботи системи

*Об'єкт дослідження* – процеси передачі інформації у відкритих оптичних каналах зв'язку.

*Предмет дослідження* – лазерні методи та системи для передачі інформації у відкритих оптичних каналах зв'язку із адаптацією до змін атмосферних умов.

## 3 Джерела розробки МКР

1. Васюра А. С., Павлов С. В., Прокопова М. О., Тужанський С. Є., Козловська Т. І. Адаптивна оптика. Навчальний посібник, 2015, 284 с.
2. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання : навч. посіб. : у 2 кн. / В. О. Чадюк. Київ : Політехніка, 2019. Кн. 2. 336 с.
3. Кожем'яко В. П., Павлов С. В., Тарновський М. Г. Оптоелектронна схемотехніка. Навчальний посібник, 2009, 189 с. ISBN 978-966-641-284-6.
4. Бобицький Я. В. Лазерні технології : навч. посіб. / Я. В. Бобицький, Г. Л. Матвіїшин. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2015. – 320 с.
4. Оптоелектронні і лазерні системи в електроніці та медицині : навчальний посібник / Л. В. Однорорець, І. М. Пазуха, І. М. Лукавенко. Суми : Сумський державний університет, 2022. 127 с.

#### 4 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Основними вимогами є:

1. Функціональне призначення системи: передача інформації по відкритому двохвилевому оптичному каналу зв'язку FSO із адаптацією потужності лазерного випромінювання до атмосферних умов.
2. Характеристики випромінювача: 2 напівпровідникові лазери, довжини хвиль 0,85 мкм та 1,55 мкм, потужність кожного – 100 мВт .
3. Характеристики передачі інформації: дальність – до 2000м, пропускна здатність - від 100Мбіт/с.

#### 5 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	закінчення	
1.	Розробка, погодження та затвердження технічного завдання (ТЗ)	14.09.2025	20.09.2025	Розроблене ТЗ
2.	Аналіз методів і систем відкритого оптичного зв'язку.	20.09.2025	09.10.2025	Розділ 1 пояснювальної записки
3.	Розробка методів, моделей та архітектури адаптивної системи FSO	09.10.2025	09.11.2025	Розділ 2 пояснювальної записки
4.	Експериментальна реалізація системи	09.11.2025	19.11.2025	Розділ 3 пояснювальної записки
5.	Економічна частина	09.11.2025	01.12.2025	Розділ 4 пояснювальної записки
6.	Оформлення необхідної технічної документації. Підготовка МКР до публічного захисту	01.12.2025	10.12.2025	МКР

## 6 ПОРЯДОК КОНТРОЛЮ І ПРИЙМАННЯ

Контроль за виконанням МКР та її етапів покладається на керівника. Приймання МКР здійснюється шляхом публічного захисту перед Державною екзаменаційною комісією, призначеною за наказом ректора ВНТУ.

## 7 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

**Додаток Б**  
**(обов'язковий)**  
**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

Назва роботи: «Адаптивна лазерна система оптичного атмосферного зв'язку»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра БМІОЕС, факультет ІЕС, ЛТО- 24м

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism (КП1) 27%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Коваль Л.Г., зав. каф. БМІОЕС

Заболотна Н.І., проф. каф. БМІОЕС

  
\_\_\_\_\_

Особа, відповідальна за перевірку СЗ

Тужанський С.Є.

З висновком експертної комісії ознайомлений:

Керівник СЗ

Тужанський С.Є., доц. каф. БМІОЕС

Здобувач СЗ

Кріт Є.І.

Додаток В  
(обов'язковий)

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**

Структурна схема адаптивної системи передачі інформації атмосферного оптичного зв'язку

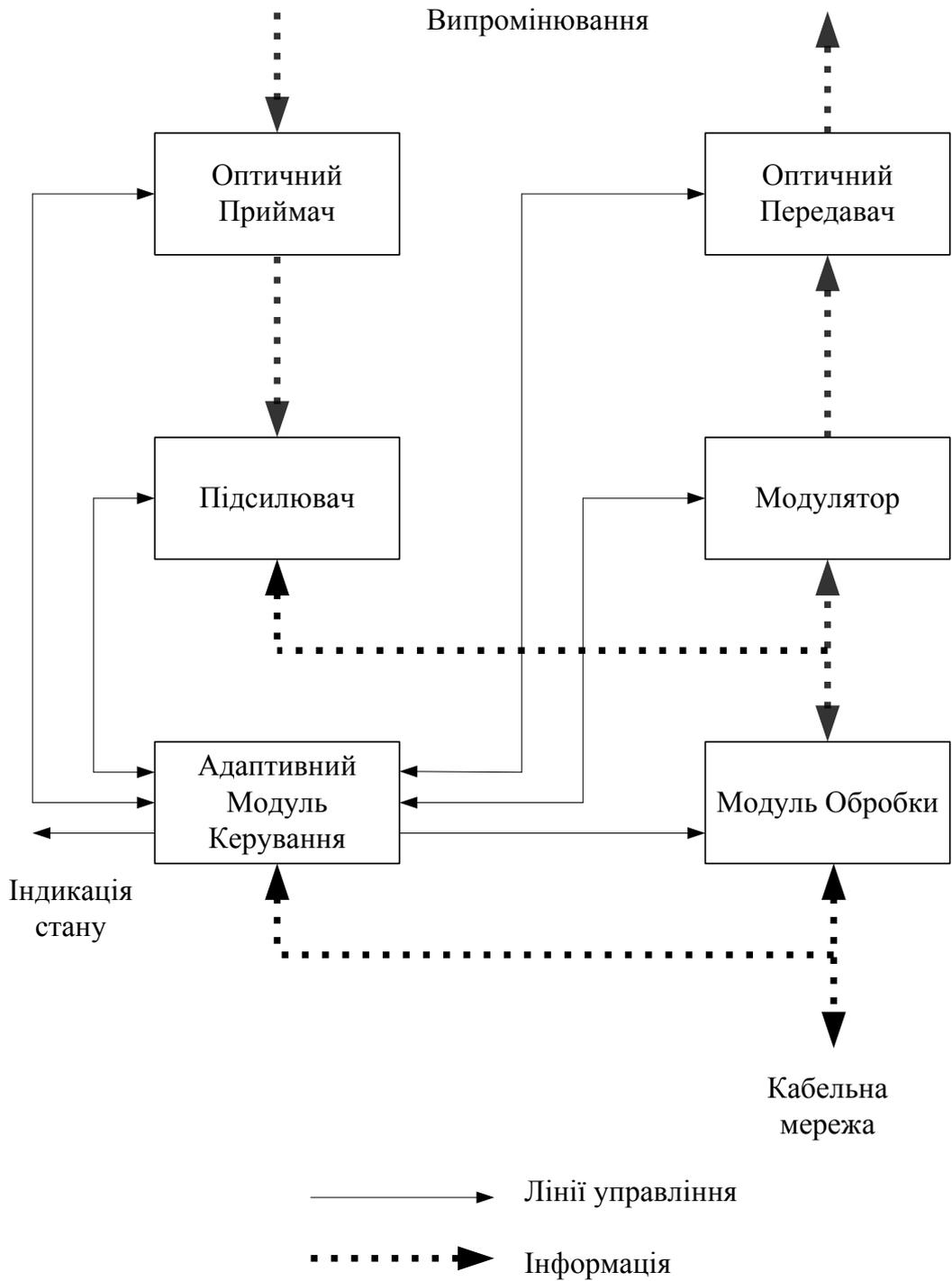
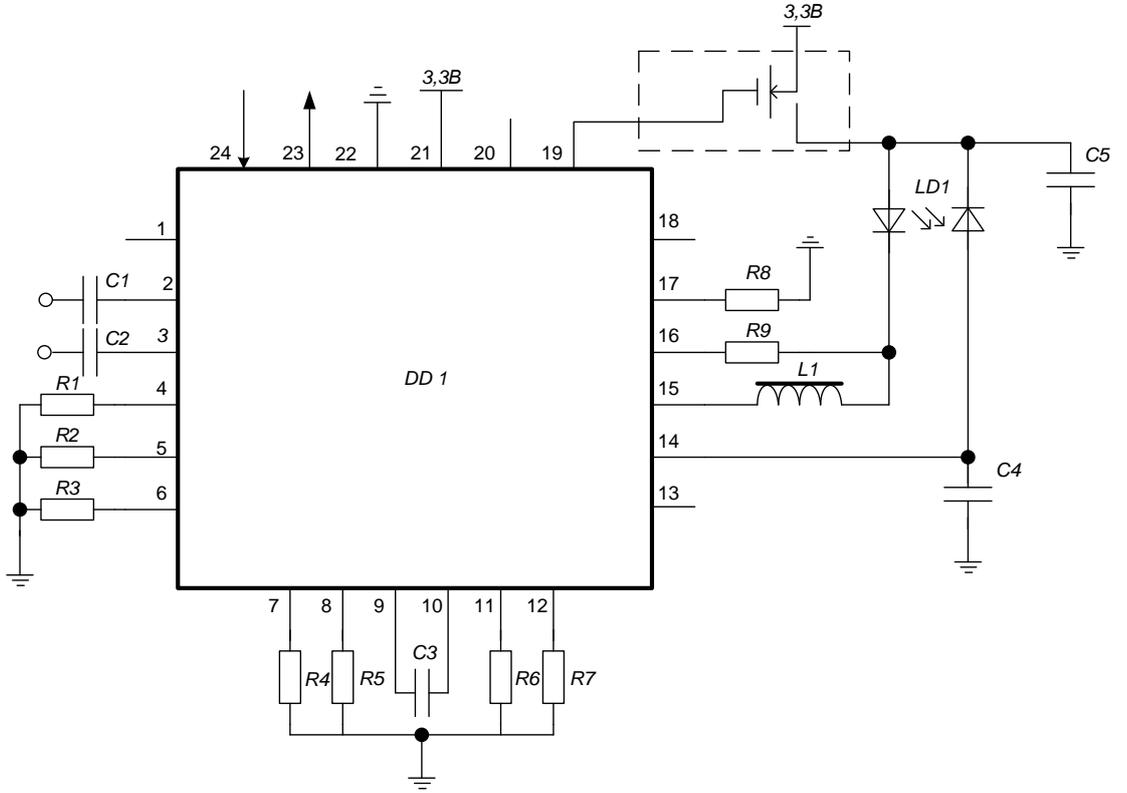


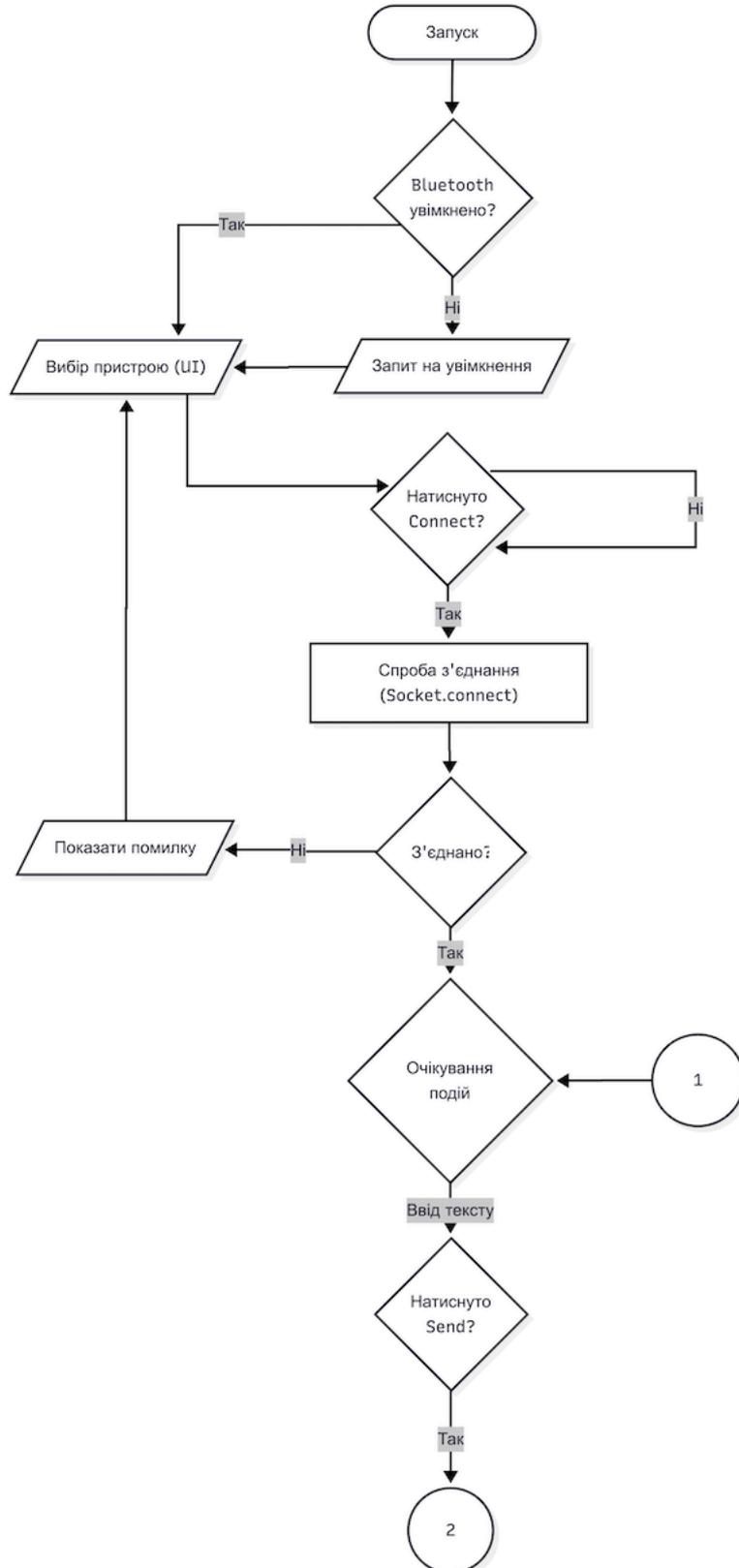
Схема електрична лазерного модуля FSO-системи

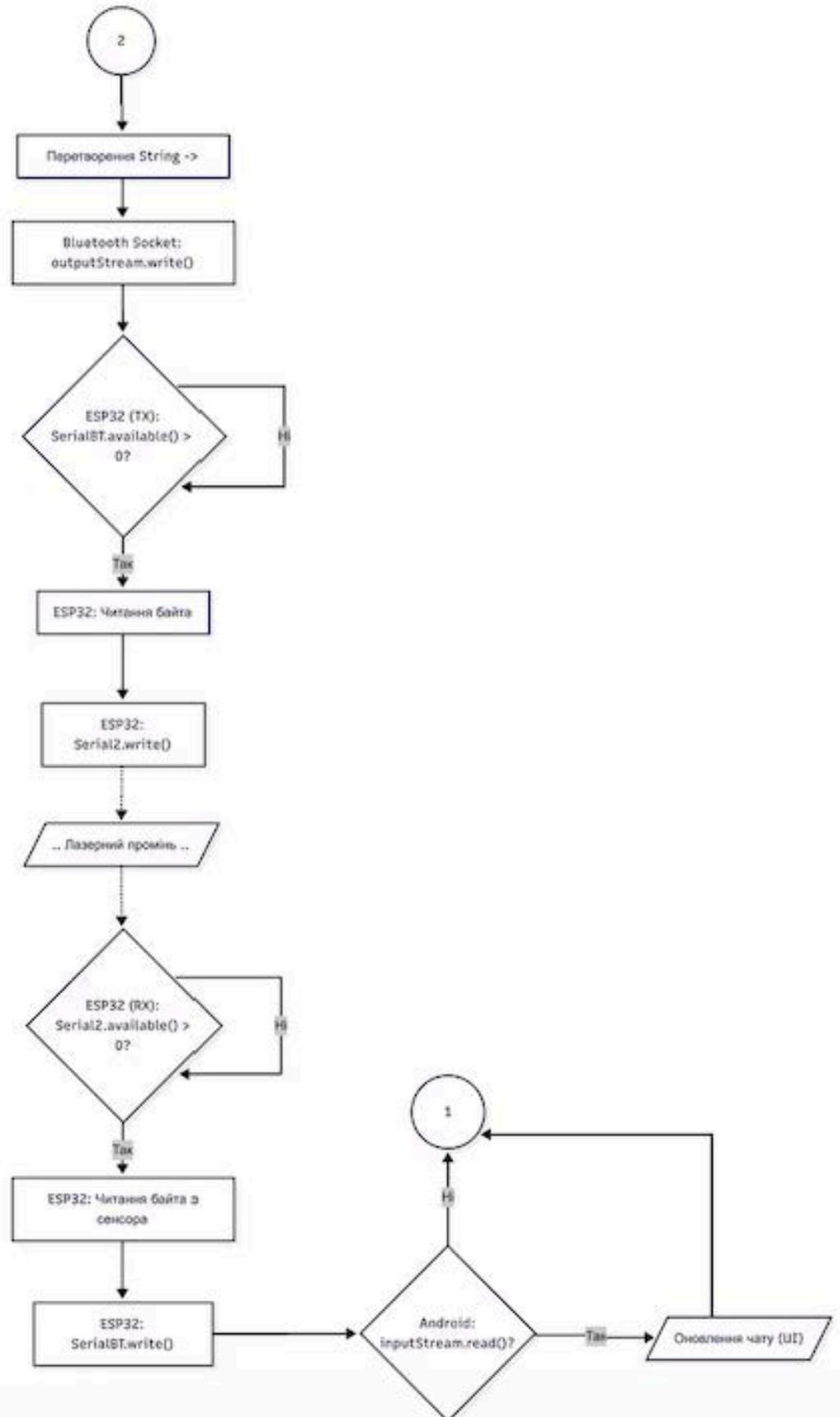


Блок-схема роботи макета адаптивної лазерної FSO-системи передачі інформації



Блок-схема алгоритму роботи мобільного додатку адаптивної системи  
атмосферного оптичного зв'язку





Функціональна схема макета адаптивної лазерної FSO-системи передачі інформації

