

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут електроенергетики
Факультет інформаційних технологій
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеню магістра

студента Васильєва Данііла Геннадійовича
академічної групи 172М-19-1
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
спеціалізації _____
за освітньо-професійною програмою Телекомунікації та радіотехніка
на тему Розробка лабораторного макета лазерного каналу зв'язку для систем передачі інформації

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.			
розділів:				
спеціальний	ас. Рибальченко Ю.П.			
економічний	к.е.н., доц. Романюк Н.М.			
Рецензент				
Норм.контроль	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.			

Дніпро
2020

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри
безпеки інформації та телекомунікацій
_____ д.т.н., проф. Корнієнко В.І.

« _____ » _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеня магістра**

студенту Васильєва Данііла Геннадійовича академічної групи 172М-19-1
(прізвище ім'я по-батькові) (шифр)

спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і назва спеціальності)

на тему Розробка лабораторного макета лазерного каналу зв'язку для систем передачі інформації

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від _____ № _____

Розділ	Зміст	Термін виконання
Розділ 1	Огляд літератури за темою роботи, розглянуто сучасний стан систем розробки та проектування оптичних систем, вивчена проблематика АОЛС.	27.09.2020 - 06.10.2020
Розділ 2	Розробка та дослідження розробленого лабораторного пристрою.	07.10.2020 - 15.11.2020
Розділ 3	Розраховані трудомісткість та капітальні витрати що необхідні для проектування пристрою.	16.11.2020 - 24.11.2020

Завдання видано

_____ (підпис керівника)

Гусєв О.Ю.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі: 21.09.2020 р

Дата подання до екзаменаційної комісії: 30.11.2020 р.

Прийнято до виконання

_____ (підпис студента)

Васильєв Д.Г.
(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 68 с., 16 рис., 5 табл., 6 додатків, 21 джерел.

Об'єкт дослідження: бездротова оптична лінія зв'язку.

Предмет дослідження: пристрій для вивчення бездротових оптичних ліній зв'язку.

Мета кваліфікаційної роботи: – ознайомлення з принципами та видами систем лазерного зв'язку, демонстрація практичної роботи системи на прикладі лабораторного макета.

У першому розділі проаналізовано існуючі системи лазерного зв'язку, наведено їх класифікацію, приклади реалізації та основні недоліки та переваги.

У спеціальній частині роботи був спроектований і побудований лабораторний макет системи лазерного зв'язку, наведені його характеристики і складений аналіз його роботи. За результатами аналізу роботи системи були зроблені висновки щодо її ефективності, актуальності та умов застосування.

В економічній частині розрахований час, який необхідно для розробки лабораторного макета лазерного каналу зв'язку для систем передачі інформації, заробітну плату інженера, витрати на необхідне програмне та апаратне забезпечення.

АТМОСФЕРНИЙ ЛАЗЕРНИЙ ЗВ'ЯЗОК, ЛАЗЕРНЕ
ВИПРОМІНЮВАННЯ, ПРОСТІР, ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка: 68 с., 16 рис., 5 табл., 6 приложений, 21 источников.

Объект исследования: беспроводная оптическая линия связи.

Предмет исследования: устройство для изучения беспроводных оптических линий связи.

Цель квалификационной работы: - ознакомление с принципами и видами систем лазерной связи, демонстрация практической работы системы на примере лабораторного макета.

В первом разделе проанализированы существующие системы лазерной связи, приведена их классификация, примеры реализации и основные недостатки и преимущества.

В специальной части работы был спроектирован и построен лабораторный макет системы лазерной связи, приведены его характеристики и составлен анализ его работы. По результатам анализа работы системы были сделаны выводы о ее эффективности, актуальности и условий применения.

В экономической части рассчитанное время, которое необходимо для разработки лабораторного макета лазерного канала связи для систем передачи информации, заработную плату инженера, расходы на необходимое программное и аппаратное обеспечение.

АТМОСФЕРНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВЯЗЬ, ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ,
ПРОСТРАНСТВО, ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ.

THE ABSTRACT

Explanatory note: 68 pages, 16 fig., 5 tab., 6 appendixes, 21 sources.

Subject of development: wireless optical communication line.

Subject of study: device for studying wireless optical communication lines.

The Purpose of qualifying work: - familiarization with the principles and types of laser communication systems, demonstration of the practical operation of the system using the example of a laboratory model.

In the first section, the existing laser communication systems are analyzed, their classification, examples of implementation and the main disadvantages and advantages are given.

In a special part of the work, a laboratory model of a laser communication system was designed and built, its characteristics were given and an analysis of its work was made. Based on the results of the analysis of the system's operation, conclusions were drawn about its effectiveness, relevance and conditions of use.

In the economic part, the calculated time required for the development of a laboratory layout of a laser communication channel for information transmission systems, the salary of an engineer, the cost of the necessary software and hardware.

ATMOSPHERIC LASER COMMUNICATION, LASER RADIATION,
SPACE, INFORMATION SYSTEMS.

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АОЛ(П) – атмосферна оптична лінія (передачі);

АОЛЗ – атмосферний оптичний лінія зв'язку;

БОКЗ – бездротовий оптичний канал зв'язку;

БОЛЗ – бездротова оптична лінія зв'язку;

ВЧ – високочастотний;

ЛФД – лавинні фотодіоди;

ЛАЛ – лазерна атмосферна лінія;

СВД – світловипромінювальний діод;

РРЛЗ – радіорелейні лінії;

FSO – Free Space Optics;

ЗМІСТ

	с.
ВСТУП.....	9
1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	11
1.1 Загальні відомості про лінії зв'язку.....	11
1.2 Узагальнено-структурна модель АОЛЗ.....	12
1.3 Загальні відомості про АОЛЗ.....	13
1.4 Основні схеми побудови АОЛЗ.....	20
1.4.1 Активна схема побудови АОЛЗ	20
1.4.2 Пасивна схема побудови АОЛЗ.....	21
1.4.3 Змішана схема побудови АОЛЗ.....	22
1.5 Принцип роботи.....	24
1.5.1 Світловипромінюючі діоди.....	27
1.5.2 Лазерні діоди.....	28
1.6 Приймачі випромінювання.....	30
1.6.1 р-І-n-фотодіоди.....	30
1.6.2 Лавинні фотодіоди.....	31
1.6.3 Приймач випромінювання схеми АОЛЗ.....	32
1.7 Постановка задач дослідження.....	32
1.8 Висновки до першого розділу.....	33
2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	34
2.1 Вибір режимів випромінювання лазерного передавача.....	34
2.1.1 Безперервний режим оптичного випромінювання.....	34
2.1.2 Імпульсний режим оптичного випромінювання	35
2.2 Процедура виявлення оптимального прийому сигналів.....	37
2.2.1 Методика розрахунку АОЛЗ	37
2.2.2 Дальність оптичної локації в атмосфері.....	39
2.2.3 Розрахунок впливу фонового випромінювання.....	41
2.2.4 Розрахунок параметрів оптичної системи.....	44

2.2.5 Приклад розрахунку АОЛЗ.....	44
2.3 Структура апаратних засобів макета АОЛЗ.....	46
2.4 Результати розробки.....	49
2.5 Висновки до другого розділу.....	50
3 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	51
3.1 Визначення трудомісткості розробки лабораторного макета лазерного каналу зв'язку	51
3.2 Визначення середньої заробітної плати спеціаліста в галузі телекомунікацій.....	52
3.3 Розрахунок витрат на заробітну плату.....	53
3.4 Розрахунок витрат на необхідне програмне та апаратне забезпечення..	54
3.5 Розрахунок капітальних витрат.....	55
3.6 Висновок.....	55
ВИСНОВКИ.....	56
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	57
ДОДАТОК А. Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи.....	59
ДОДАТОК Б. Лістинг програми передавача.....	60
ДОДАТОК В. Лістинг програми приймача.....	62
ДОДАТОК Г. Перелік документів на оптичному носії.....	64
ДОДАТОК Д. Відгук керівника економічного розділу.....	67
ДОДАТОК Е. Відгук керівника кваліфікаційної роботи.....	68

ВСТУП

Бурхливий розвиток телекомунікаційного ринку вимагає високошвидкісних ліній передачі даних. Проте впровадження дротових технологій (наприклад, прокладка оптичного волокна) вимагає солідні інвестиції і не завжди можливе. Альтернативою в цьому випадку є бездротові лінії зв'язку. На сьогоднішній день існує декілька основних бездротових рішень - це використання широкосмугових радіоканалів WiFi / WiMax, радіорелейних ліній (РРЛЗ) або атмосферних оптичних ліній зв'язку (АОЛЗ). Однак бездротовий зв'язок в радіодіапазоні обмежений перевантаженістю і дефіцитом частотного діапазону, недостатньою скритністю, схильністю перешкодам (у тому числі і навмисним, і з сусідніх каналів), підвищеним енергоспоживанням. Крім того, при експлуатації РРЛЗ доводиться вирішувати питання, пов'язані з отриманням дозволів на використання робочих частот, що на сьогоднішній день представляє велику проблему. Застосування лазерних засобів знімає ці питання.

Інтерес до комерційного використання АОЛЗ викликаний загальними тенденціями розвитку ринку послуг зв'язку та передачі даних, де як і раніше гостро стоїть питання доставки інформації кінцевому споживачеві. Високий ККД, унікальні спектральні можливості випромінювання, а також потрапляння робочої довжини хвилі в «вікно прозорості» атмосфери створюють сприятливі передумови для застосування в оптичних системах передачі інформації лазерів з високочастотним (ВЧ) збудженням активного середовища, як одних з найбільш перспективних джерел когерентного випромінювання в середньому ІК діапазоні.

Зважаючи на велику обчислювальну складність провести розробку, а тим більше оптимізацію, параметрів АОЛЗ без використання комп'ютерного моделювання неможливо.

Використання універсальних програмних продуктів (MathCad, MatLab, Maple) в процесі проведення комп'ютерних експериментів не дає

ефективного результату, тому в роботі основна увага приділена створенню лабораторного макету із аналізом функціональних блоків АОЛЗ і лінії зв'язку в комплексі. У зв'язку з цим розробка лабораторного макету АОЛЗ на основі лазерних технологій з метою вибору оптимальних проектних рішень є актуальною науковою задачею.

1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Загальні відомості про лінії зв'язку

Невід'ємною й однією з найскладніших і витратних складових телекомунікаційних систем є лінії зв'язку (ЛЗ), якими передаються інформаційні сигнали від одного абонента (станції, передавача, регенератора) іншому (станції, приймачу, регенератору) та у зворотному напрямку. Зважаючи на середовище поширення сигналів, лінії зв'язку можна поділити на 3 групи: радіолінії, провідові й оптичні. У радіолініях сигнали передаються у вільному просторі, в провідових лініях — металевими кабелями, хвилеводами, в оптичних лініях — волоконними світловодами або у вільному просторі. Класифікацію цих ЛЗ наведено на рис. 1.1.

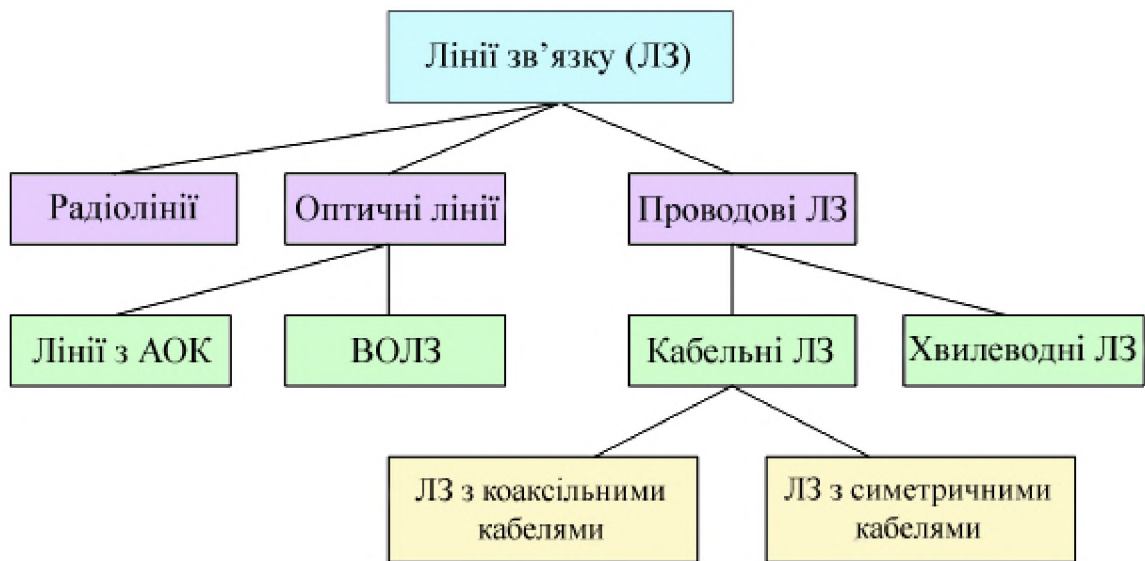


Рисунок 1.1 – Класифікація ліній зв'язку: АОК — атмосферний оптичний канал; ВОЛЗ — волоконно-оптична лінія зв'язку

До ліній зв'язку висувають такі вимоги:

- велика інформаційна ємність (пропускна здатність);

- мале загасання, завдяки чому забезпечується більша відстань одного інтервалу зв'язку;
- захищеність лінії від взаємних і зовнішніх електромагнітних впливів;
- захищеність від механічних пошкоджень і температурних коливань;
- стабільність електричних параметрів у часі;
- мінімальні витрати під час будівництва й експлуатації лінії.

1.2 Узагальнено-структурна модель АОЛЗ

Через сорок з гаком років після створення першого лазера лазерні системи увійшли в число складних комплексів, коли-небудь проєктованих людиною для цивільних і військових цілей. Складність їх багатогранна: в технічному відношенні тільки в лазерної апаратури (і ні в якій іншій) потрібні були секундні кутові точності юстирування дзеркал і доведення чутливості приймачів до здатності реєструвати окремі фотони світла; в технологічному відношенні лазери вимагали найвищої якості виготовлення оптичних елементів (з точністю до $1/100$ - $1/500$ частини довжини хвилі світла), синтезу активних середовищ з поштучним взаємним розміщенням атомів в кристалах; в теоретичному плані розрахунок лазерних систем передбачає одночасне (часто самоузгоджене) рішення задач, що відносяться до різних фундаментальним розділах хвильової оптики, електродинаміки, фізики плазми (для газових лазерів), квантової електроніки та ін. Оскільки в основі дії лазерів лежать процеси квантових переходів збуджених атомів і молекул між різними енергетичними станами, а фізичні константи цих елементарних актів відомі досить неточно або невідомі зовсім, то процедура розробки та виготовлення лазерної апаратури без попереднього оптимізаційного числового розрахунку технічних характеристик лазерів і лазерних систем, на жаль, поки неможлива. Зокрема, трудомісткість проєктування та коригування параметрів систем АОЛЗ ставить питання про необхідність перенесення основного обсягу розрахунків на ЕОМ. Давно

доведено, що комп'ютерне моделювання багатьох складних систем дозволяє значно здешевити їх проектування, а також знизити обсяги доводочних робіт. Відносно лазерних систем цей висновок більш ніж виправданий.

1.3 Загальні відомості про АОЛЗ

АОЛЗ - вид оптичного зв'язку, який використовує електромагнітні хвилі оптичного діапазону (як правило, інфрачервоні), що передаються через атмосферу. Англійський термін також включає в себе передачу даних через вакуум - FSO (Free Space Optics). В її основі лежить принцип передачі цифрового сигналу через атмосферу (або космічний простір) шляхом модуляції випромінювання в неліцензованому діапазоні довжин хвиль (інфрачервоному або видимому) і його подальшим детектуванням оптичним фотоприймним пристроєм (рис. 1.1). Імпульс світлового випромінювання при проходженні в атмосфері практично не відчуває дисперсійних спотворень фронтів, характерних для будь-яких оптичних волокон. Це принципово дозволяє передавати потік даних зі швидкостями до терабіт в секунду.

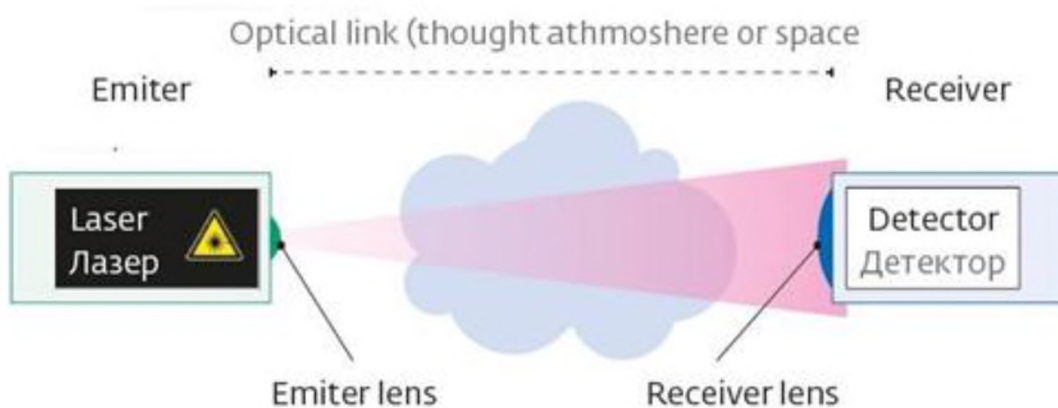


Рисунок 1.2 – Типова система атмосферної оптичної лінії зв'язку

Сучасний стан FSO технології дозволяє створювати надійні канали зв'язку на відстанях від 100 до 1500-2000 м., А в умовах атмосфери і до

100000 км у відкритому космосі, наприклад, для зв'язку між супутниками. Будучи альтернативним рішенням по відношенню до оптоволокну, атмосферні оптичні лінії передачі даних (АОЛП) дозволяють понад оперативно сформувати бездротовий оптичний канал зв'язку (мобільні системи з автоматичним наведенням забезпечують встановлення зв'язку за 10-15 хвилин) при значно менших витратах.

Лазерний зв'язок об'єктів здійснюється тільки з'єднанням точка-точка. Довжина хвилі переданого випромінювання варіюється в межах 780-880 нм - ближнє ІК або 1500-1600 нм - середній ІК діапазон. На довжині хвилі 780 нм працюють лазери, які використовуються в CD-приводах, лавинні фотодіоди та лазери з вертикальним випромінює поверхнею. Недоліком є - можливість перехоплення випромінювання за допомогою приладів нічного бачення, проте демодуляція сигналу шляхом використання цієї техніки неможлива.

Діапазон хвиль 1520-1600 нм. Ці довжини хвиль добре підходять для FSO-застосувань, і до теперішнього часу доступні високоякісні компоненти для прийому та передачі випромінювання. Поєднання малого загасання і високої якості електронних компонентів для даного діапазону дозволяє створювати FSO-системи з хвильовим мультиплексуванням. Однак зазначені компоненти коштують дорожче, приймачі мають меншою чутливістю, малими розмірами приймального майданчика в порівнянні при роботі на велику відстань, і багато компаній працює над зниженням вартості і збільшенням швидкості компонентів в області 1200-1600 нм. Крім того, на цих довжинах хвиль працюють ербієві підсилювачі, що дуже важливо для створення потужних (> 500 мВт) і високошвидкісних ($> 2,5$ Гбіт/с) систем. В діапазоні 1520-1600 нм, в порівнянні з діапазоном 780-850 нм, може бути передано в 50 - 65 разів більше потужності. Слід зазначити, що випромінювання даної довжини хвилі не можна перехопити за допомогою приладів нічного бачення, що є перевагою використання даних довжин хвиль в порівнянні з діапазоном 780-850 нм.

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

Окрім молекулярного поглинання поширенню променя заважає молекулярне розсіювання променистої енергії мікрозгустками молекул повітря, що мають різну щільність і різні показники заломлення.

Атмосфера являє собою механічну суміш з газів, пару, крапель рідини і твердих частинок. У ній завжди в змінній кількості присутні пил, дим, кришталіки льоду. Тому атмосфера є аерозолем, склад якого безупинно змінюється через перемішування.

Усі типи атмосферних аерозолей можна об'єднати в такі основні класи: хмари, тумани, димки, наморозь і опади — дощ чи сніг. У хмарах і туманах найбільш імовірне значення радіуса частинок складає 5—6 мкм, а в димках на 1—2 порядки менше. Тому ослаблення мікронного випромінювання в димках нижче. При цьому характерно, що ослаблення оптичного сигналу при дощі та снігопаді менше, ніж при тумані (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Приклад ослаблень випромінювання в діапазоні 0,85мкм залежно від погодних умов

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

Головними обмежувачами дальності АЛЗ є густий сніг і густий туман, для яких аерозольне ослаблення максимальне. На поширення лазерного променя значний вплив чинить також турбулентність атмосфери, тобто випадкові просторово-часові зміни показника заломлення, викликані пересуванням повітря, флуктуаціями його температури та щільності. Тому світлові хвилі, що поширюються в атмосфері, піддаються не тільки поглинанню, але і флуктуації переданої потужності.

На рис. 1.3 приведені криві ослаблення лазерного сигналу в різних аерозолях.

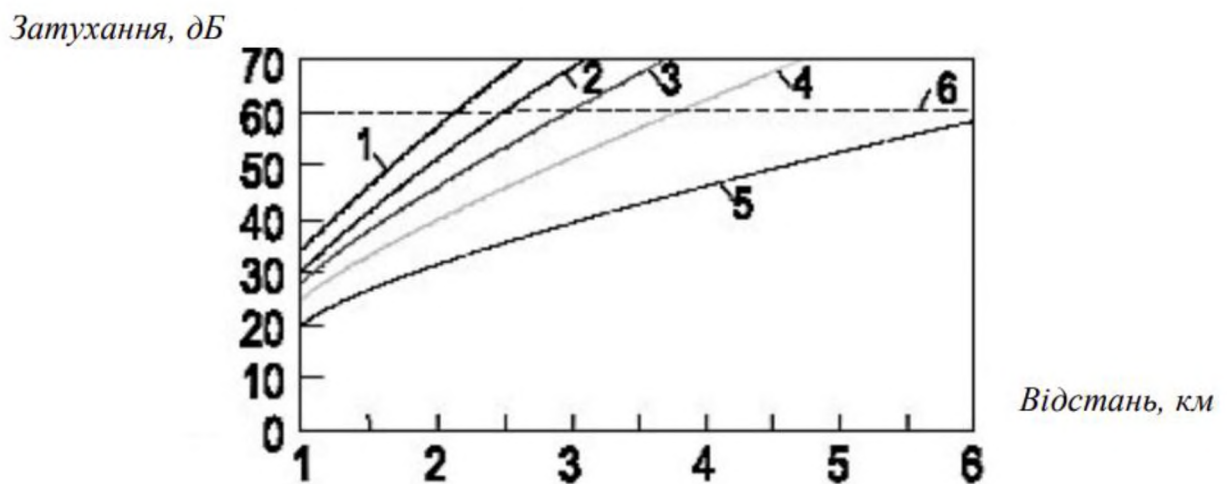


Рисунок 1.3 – Залежність ослаблення світла в аерозолях від відстані при різних метеофакторах: 1 – сніг середньої щільності; 2 – сильний дощ (40мм/годину); 3 – сніг невеликої щільності; 4 – середній дощ (20мм/годину); 5 – серпанок (МДВ = 2 км)

З табл. 1.1 і рис. 1.3 видно, що головними обмежувачами дальності АОСП є густий сніг і густий туман, для яких аерозольне ослаблення максимальне. На розповсюдження лазерного променя сильний вплив надає також турбулентність атмосфери, тобто випадкові просторово-часові зміни показника заломлення, викликані переміщенням повітря, флуктуаціями його температури і щільності. Тому на світлові хвилі, що розповсюджуються в

атмосфері, впливає не тільки поглинання, але і флуктуації потужності, що передається.

Турбулентність атмосфери приводить до спотворень хвильового фронту і, отже, до коливань і розширення лазерного пучка і перерозподілу енергії в його поперечному перетині. У площині приймальної антени це виявляється в хаотичному чергуванні темних і яскравих плям з частотою від доль герца до декількох кілогерц. При цьому іноді виникають завмирання сигналу (термін запозичений з радіозв'язку) і зв'язок стає нестійким. Завмирання найсильніше виявляється в ясну сонячну погоду, особливо в літні жаркі місяці, в години сходу і заходу сонця, при сильному вітрі. Наприклад, на рис. 1.4 показано дві крайні залежності вірогідності помилок BER для системи АОСП від дальності зв'язку при ясній погоді – одна в умовах сильної турбулентності атмосфери, інша в умовах слабкої. Звичайні значення BER лежать між цими кривими.

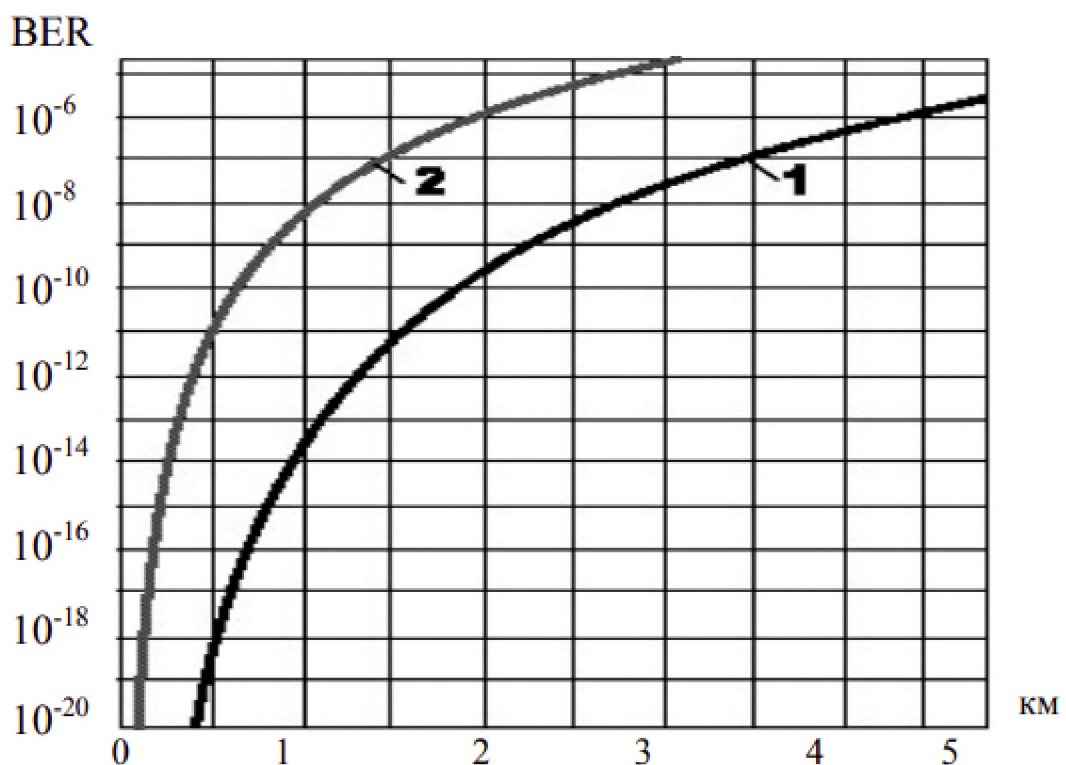


Рисунок 1.4 – Залежність вірогідності помилок BER від відстані при слабких завмираннях в атмосфері (крива 1) і сильних завмираннях (крива 2) для АОСП. Дощ, туман, сніг, серпанок відсутні.

Найпростішим способом боротьби із завмираннями є збільшення розміру приймальної оптичної антени чи використання декількох приймальних антен. При цьому відбувається усереднення флуктуацій випромінювання, прийнятого окремими елементами, і вирівнювання сигналу. Інший спосіб полягає в некогерентному додаванні в одному каналі випромінювання декількох лазерів.

При практичному використанні лазерів у системах атмосферного зв'язку необхідно враховувати сукупний вплив взаємодії випромінювання з атмосферою - одночасно поглинаючою, розсіюючою з випадково неоднорідним середовищем. Цей вплив може змінюватися в надзвичайно широкому діапазоні. Тому для забезпечення працездатності АЛЗ на заданій дистанції з визначеним рівнем надійності (чи доступності каналу) необхідно мати достатній динамічний запас енергетичного потенціалу.

Для характеристики взаємодії оптичної хвилі на основі аналізу зміни енергії випромінювання, що проходить крізь середовище, вводиться об'ємний коефіцієнт ослаблення α_λ .

Коефіцієнт ослаблення можна представити як

$$\alpha_\lambda = \sigma_\lambda + k_\lambda \quad (1.1)$$

де σ_λ і k_λ - об'ємні коефіцієнти розсіювання і поглинання відповідно. Ці коефіцієнти залежать від довжини (частоти) хвилі і розташування точки спостереження, але не залежать від напрямку випромінювання в ізотропному середовищі.

З огляду на наявність у спектрах молекулярного поглинання великої кількості окремих ліній поглинання, що виникають при переходах молекул з одного енергетичного стану в інший, сумарний коефіцієнт поглинання для конкретної молекули можна записати як

$$k_k(\nu) = \sum_i k_{ik}(\nu), \quad (1.2)$$

де $k_i(\nu)$ - коефіцієнт поглинання окремої i -ї спектральної лінії.

Слід зазначити, що співвідношення, яке здається очевидним, насправді є наближеним. В основу співвідношення покладено припущення, що окремі спектральні лінії поглинання формуються незалежно одна від одної. Іншими словами, переходи молекул між різними енергетичними станами здійснюються незалежно. Насправді, як впливає із загальної теорії молекулярного поглинання в газах, це не зовсім так. Принцип адитивності особливо явно порушується, якщо відповідні лінії поглинання істотно перетинаються. Цей ефект у молекулярній спектроскопії називається інтерференцією спектральних ліній. В більшості випадків (для простоти) слід користуватися співвідношенням (1.2), не забуваючи, однак, про його приблизність, і використовувати більш строгий вираз для поглинання сукупності близько розташованих спектральних ліній в особливих випадках.

Якщо врахувати, що в атмосфері Землі присутня велика кількість різних атмосферних газів, то коефіцієнт молекулярного поглинання повітря слід записати як

$$k_k(\nu) = \sum_i k_{ik}(\nu) = \sum_k \sum_i k_{ik}, \quad (1.3)$$

де індекс підсумовування k відповідає різним газам, що входять до складу повітря, а індекс i - окремим лініям кожного газу.

Таким чином, загальний коефіцієнт молекулярного поглинання в атмосфері являє собою, у першому наближенні, суму коефіцієнтів поглинання в окремих лініях поглинання різних атмосферних газів.

Доступність лінії АЛЗ залежить від припустимого ослаблення потужності сигналу між передавачем і приймачем на заданій відстані між

терміналами і від статистики розподілу максимальної видимості у місці установки лінії. Чим більший запас потужності системи, тим менше погодні умови впливають на працездатність лінії.

Системи АЛЗ можуть використовуватися не тільки на «останній милі» каналів зв'язку, але також як вставки у волоконно-оптичні лінії на окремих важкопрохідних ділянках; для зв'язку в гірських умовах, в аеропортах, між окремими будинками (органи керування, торгові центри, промислові підприємства, університетські містечка, лікарняні комплекси, будмайданчики тощо); при створенні рознесених у просторі локальних комп'ютерних мереж; при організації зв'язку між центрами комутації і базових станцій стільникових мереж; для оперативної прокладки лінії при обмеженому часі на монтаж. Тому останнім часом зростає інтерес виробників до цього нового і перспективного сектора ринку.

1.4 Основні схеми побудови АОЛЗ

У більшості випадків, розглядаються три основні схеми побудови АОЛЗ.

1.4.1 Активна схема побудови АОЛЗ

В активній схемі джерело та приймач випромінювання знаходяться всередині приймально-передавального оптичного блоку. Як правило, в фокусі або поблизу об'єктива. Схема активного виконання АОЛС показана на рис. 1.5. До плюсів даної схеми слід віднести велику площу фотоприймача, що в свою чергу, збільшує кут поля зору, а це сприятливо позначається на зменшенні енергетичних втрат і вимог до кутових переміщень приймально-передавальних оптичних блоків один щодо одного. До недоліків даної схеми слід віднести необхідність підведення живлення безпосередньо до оптичних блоків, що не завжди можливо.

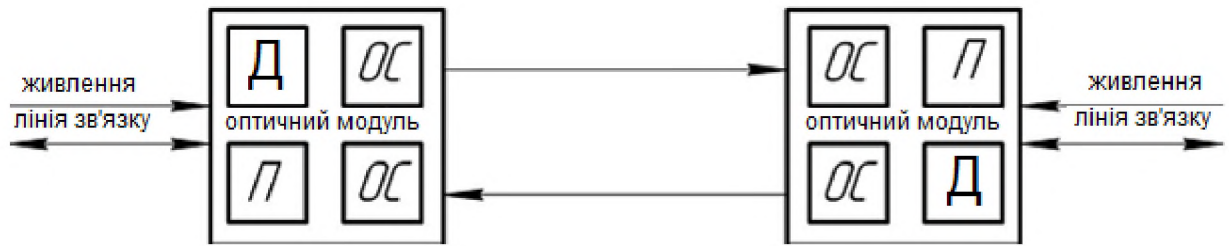


Рисунок 1.4 – Схема активного виконання АОЛЗ (Д - джерело, П-приймач, ОС - оптична система)

1.4.2 Пасивна схема побудови АОЛЗ

Пасивна схема побудови АОЛЗ здійснюється наступним чином. Джерело та приймач випромінювання розташовуються безпосередньо в корпусі медіаконвертерів, які здійснюють перетворення інтерфейсів «кручена пара - одномодовий (багатомодовий) оптичний кабель». Схема пасивного виконання АОЛЗ показана на рис. 1.5.

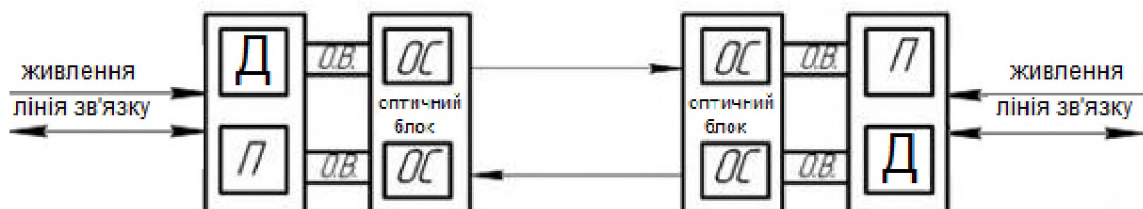


Рисунок 1.5 – Схема пасивного виконання АОЛЗ (Д - джерело, П - приймач, ОВ - оптичне волокно ОС - оптична система)

З'єднання медіаконвертера з оптичним блоком здійснюється за допомогою одномодового або багатомодового оптичного кабелю оконцованим коннектором. В даній схемі джерелом і приймачем оптичного випромінювання є торці оптичного волокна, розташованого в безпосередній близькості до фокусу приймально-передавальної оптичної системи. Недоліком пасивної схеми слід віднести досить жорсткі вимоги до юстування

оптичних блоків за кутом через малі розміри приймального майданчика, яка є торцем оптичного волокна: діаметр одномодового волокна 5 ... 9 мкм, многомодового 50 ... 62.5 мкм. Для збільшення поля зору необхідно збільшувати в кілька разів діаметр падаючого пучка на торець волокна приймача, що призводить до геометричних втрат через різницю площ оптичного волокна приймача і плями випромінювання.

До переваг можна віднести відсутність необхідності підведення живлення до оптичних блоків.

1.4.3 Змішана схема побудови АОЛЗ

У тому випадку, коли неможливо реалізувати активну або пасивну схему, використовується змішана схема, яка зображена на рис. 1.6. Існує кілька варіантів реалізації даної схеми, наприклад, коли в одному приймально-передавальному оптичному блоці джерело і приймач випромінювання знаходяться всередині оптичного блоку, а в іншому джерело і приймач випромінювання розташовуються безпосередньо в медіаконвертер, які з'єднуються з приємопередаючим оптичним блоком за допомогою оптичного волокна.

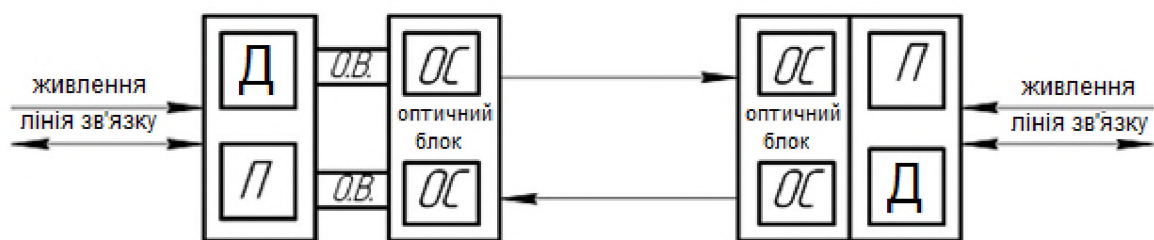


Рисунок 1.5 – Схема змішаного виконання АОЛЗ (Д - джерело, П - приймач, О.В. - оптичне волокно, ОС - оптична система)

Системи FSO характеризуються чотирма основними параметрами: сумарною потужністю випромінювачів, чутливістю фотоприймача, а також діаметром передавального променя та діаметром апаратури приймального

об'єктива. Потужність випромінювачів може бути підвищена за рахунок застосування ербієвого волоконного підсилювача або збільшення кількості некогерентних напівпровідникових лазерів. Високої чутливості приймачів домагаються за рахунок використання невеликих низькоємних фотодетекторів або лавинних детекторів APD з вбудованими механізмами посилення сигналу, в результаті чого енергетичний запас лінії у таких систем на 5-10 дБ вище, ніж в разі кремнієвих фотодіодів. Лавинні детектори APD відрізняються більш високим рівнем чутливості - приблизно в чотири рази вище в порівнянні з детекторами PIN - і більш високою вартістю. Що стосується діаметру світлового променя, то цей параметр доводиться враховувати в зв'язку з таким явищем, як коливання будівель, із-за чого орієнтація приймального та передавального пристроїв може виявитися неузгоджені. Проблема вирішується шляхом розширення в передавальному об'єктиві плями вихідного променя, проте така система менш ефективна через розсіювання потужності. Більшість виробників постачають обладнання, у якого тілесний кут променя становить 3 - 6 мілірадіан, або від 3 до 6 м на кожен кілометр дальності, - цього цілком достатньо для компенсації будь-яких коливань будівлі. Деякі виробники оснащують свої продукти системами автотрекінга (що позначається на їх ціні), щоб не доводилося періодично проводити вирівнювання приймального і передавального пристроїв, при цьому передавальний промінь може залишатися досить тонким. Розмір об'єктива приймача збільшують для зниження перешкод через «мерехтіння» сигналу внаслідок сцинтиляцій - атмосферного явища, при якому виникають через різницю температур висхідні турбулентні потоки повітря ведуть до утворення зон з неоднорідною щільністю. При проходженні лазерного променя через такі зони коефіцієнт його відображення змінюється, а внаслідок цього і інтенсивність променя, що потрапляє на приймач. Сигнал приймає форму сплесків і провалів, нібито «Мерехтить». Один із способів протистояти небажаному ефекту полягає в розширенні апертури приймача, при іншому підході рекомендується

збільшити кількість передавальних оптичних модулів, у яких траєкторії променів трохи відрізняються один від одного. Ряд виробників для боротьби з подібним явищем пропонують складні і більш дорогі системи активного оптичного наведення.

Для лазерного зв'язку необхідний дуже чистий сигнал, а в мінливому та насиченому різними частинками повітряному середовищі цього домогтися непросто. Коли інформація передається через турбулентні обурення, вона зазнає змін. Ця перешкода долається використанням адаптивної оптики, що забезпечує сигнал більш високої якості. Адаптивні системи добре знайомі астрономам. Вони з високою частотою вимірюють викликані перепадами температури в атмосфері коливання в потоці фотонів, а п'єзоелектричні елементи для компенсації відповідним чином змінюють форму дзеркала телескопа на тисячні частки міліметра кожну мілісекунду. Отримується в результаті зображення близько до теоретичної межі якості.

В даний час здійснено успішна передача оптичного (лазерного) сигналу на відстань кількох сотень тисяч кілометрів. Зокрема, рекордним досягненням в цьому сенсі є прийом лазерного сигналу з автоматичної станції MESSENGER. Сигнал бортового лазерного випромінювача (інфрачервоний діодний неодимовий лазер) був успішно прийнятий земним приймачем на відстані 24 млн. км.

1.5 Принцип роботи

Сама технологія передачі ґрунтується на передачі даних модульованим випромінюванням в інфрачервоній частині спектра через атмосферу. Оптична атмосферна система зв'язку між двома пунктами складається з двох спарених приймально-передавальних пристроїв (рис. 1.6), розташованих в межах прямої видимості на обох кінцях лінії і направлених один на одного. Передавачем служить напівпровідниковий лазерний діод (робочий діапазон довжин хвиль 810, 830 або 910 нм). У передавачі також знаходиться

модулятор оптичного випромінювання сигналом, що передається. Модульований лазерний промінь колімірується оптичною системою і прямує у бік приймача. Як приймач використовується високочутливий фотодіод (робочий діапазон довжин хвиль 750 ... 950 нм). Випромінювання впливає на фотодіод, унаслідок чого регенерується початковий модульований сигнал. Далі, сигнал демодулюється і перетворюється в сигнали вихідного інтерфейсу. З обох сторін лінії використовується система лінз, з боку передавача – для отримання вузького, когерентного та спрямованого променя, а з боку приймача – для фокусування прийнятого випромінювання на фотодіод

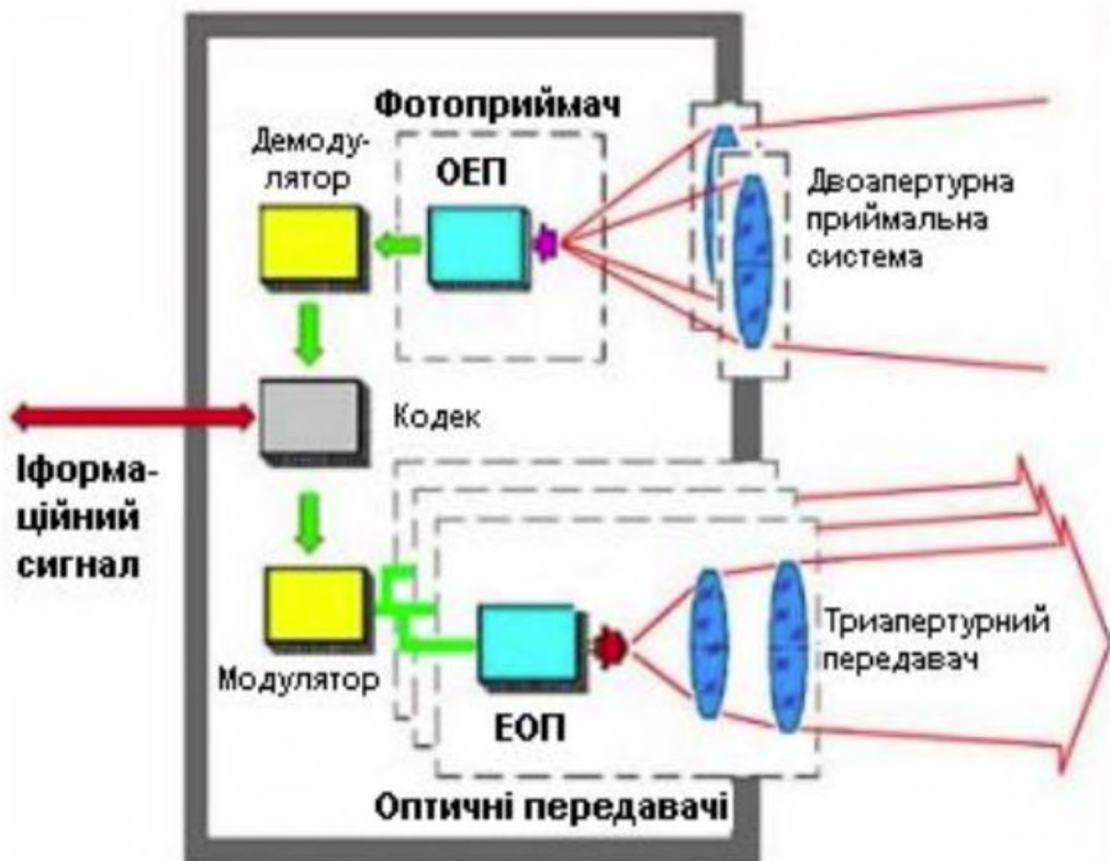


Рисунок 1.6 – Пояснення роботи АОСЗ

Для організації дуплексного каналу передачі в кожному приймально-передавальному блоці встановлені модуль приймача і від одного до трьох модулів передавачів, які разом забезпечують прийом і передачу по паралельних променях. Все устаткування забезпечує „прозору” трансляцію даних через себе і не вимагає додаткових мережевих пристроїв для конвертації або маршрутизації пакетів даних.

Найпростіша і найбільш часто зустрічається архітектура, на базі якої створюються всі інші топології, - «точка-точка», коли канал зв'язку обслуговують два трансивера: передавальний і приймаючий пристрій, спрямовані один на одного (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Варіант підключення каналу АОЛЗ

До складу системи входять модулятор випромінювача і демодулятор приймача, а також оптичні системи (об'єктиви) та інтерфейсні модулі на передавальній і приймаючій сторони (блоки сполучення, обробні сигнали від різних мережевих і телекомунікаційних пристроїв). Як випромінювачів виробники використовують або інфрачервоні світлодіоди, або напівпровідникові лазери - саме вони визначають тип і потужність системи. Фотоприймачі виготовляються на основі кремнієвих фотодіодів (PIN) або лавинних фотодіодів (APD). Модульовані імпульси від джерел інфрачервоних хвиль передаються через атмосферу приблизно так само, як сигнал по кабелю від застосовуваних в волоконно-оптичних системах

лазерів. Випромінювання напівпровідникового лазера надходить на передавальний об'єктив, а на приймаючу сторону нерозсіяна частина енергії лазерного променя через об'єктив потрапляє на фотоприймач, де оптичні імпульси перетворюються в електричний інформаційний сигнал.

З вищесказаного випливає, що ключовими елементами для здійснення лазерної зв'язки є випромінювач та високочутливий фотоприймач.

Два основних типи джерел випромінювання, що задовольняють вимогам - це світлодіоди (LED) і напівпровідникові лазери, (LD). Головна відмінна риса між світлодіодами та лазерними діодами - це ширина спектра випромінювання. Світловипромінюючі діоди мають широкий спектр випромінювання, в той час діоди мають значно вужчий спектр, рис.1.8. Обидва типи пристроїв досить компактні і добре сполучаються зі стандартними електронними ланцюгами.

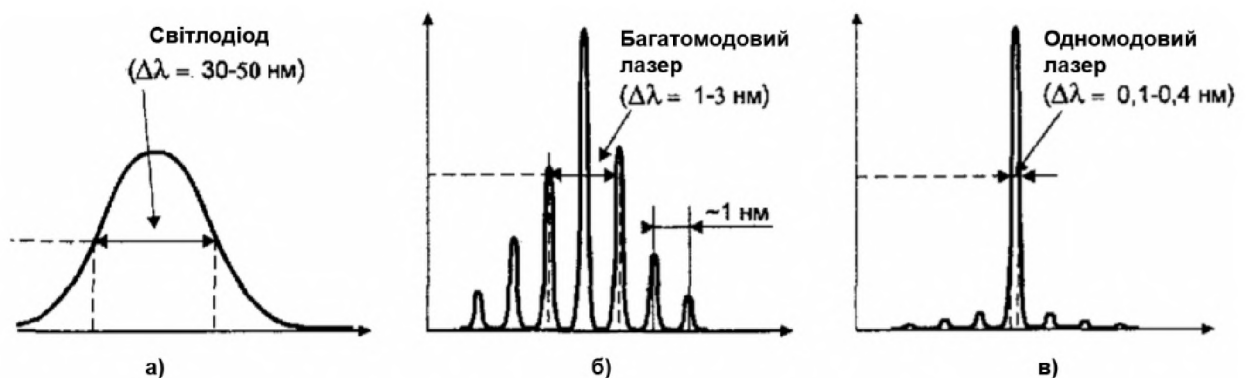


Рисунок 1.8 – Спектри випромінювання світлодіодів і лазерних діодів

1.5.1 Світловипромінюючі діоди

Завдяки своїй простоті і низькій вартості, світлодіоди поширені значно ширше, ніж лазерні діоди. Принцип роботи світлодіода заснований на випромінювальній рекомбінації носіїв заряду в активній області гетерогенної структури при пропусненні через неї струму, рис. 1.9 а. Носії заряду - електрони і дірки - проникають в активний шар (гетероперехід) з прилеглих

пасивних шарів (р- і n- шару) внаслідок подання напруги на р-n структуру і потім піддаються спонтанній рекомбінації, що супроводжується випромінюванням світла.

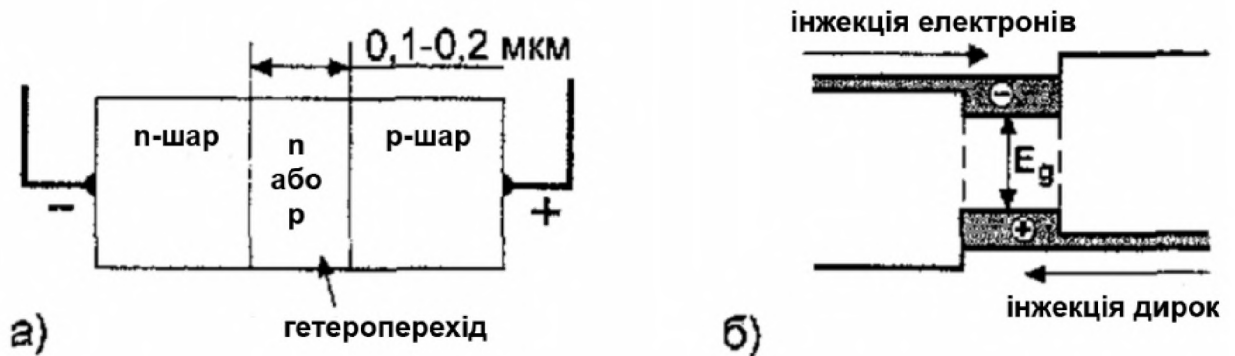


Рисунок 1.9 – Подвійна гетероструктура: а) гетероструктура, б) енергетична діаграма при прямому зміщенні

Гетерогенні структури можуть створюватися на основі різних напівпровідникових матеріалів. Зазвичай в якості підкладки використовуються GaAs і Inр. Відповідний композиційний склад активного матеріалу обирається в залежності від довжини хвилі випромінювання і створюється за допомогою наплення на підкладку. Довжину хвилі випромінювання λ_0 визначають як значення, яке відповідає максимуму спектрального розподілу потужності, а ширину спектра випромінювання $\Delta\lambda_{0,5}$ інтервал довжин хвиль, в якому спектральна щільність потужності становить половину максимальної.

1.5.2 Лазерні діоди

Дві головні конструктивні відмінності є у лазерного діода в порівнянні з світлодіодом. Перше, лазерний діод має вбудований оптичний резонатор. Друге, лазерний діод працює при значно більших значеннях струмів накачування, ніж світлодіод, що дозволяє при перевищенні деякого

порогового значення отримати режим індукованого випромінювання. Саме таке випромінювання характеризується високою когерентністю, завдяки чому лазерні діоди мають значно менше ширину спектра випромінювання (1-2 нм) проти 30-50 нм у світлодіодів, рис.1.8. Залежність потужності випромінювання від струму накачування описується ВАХ лазерного діода. При малих струмах накачування лазер, працює у режимі спонтанного випромінювання як малоефективний світлодіод. При перевищенні деякого порогового значення струму накачування I_{thres} , випромінювання стає індукованим, що призводить до різкого зростання потужності випромінювання і його когерентності, рис.1.10.

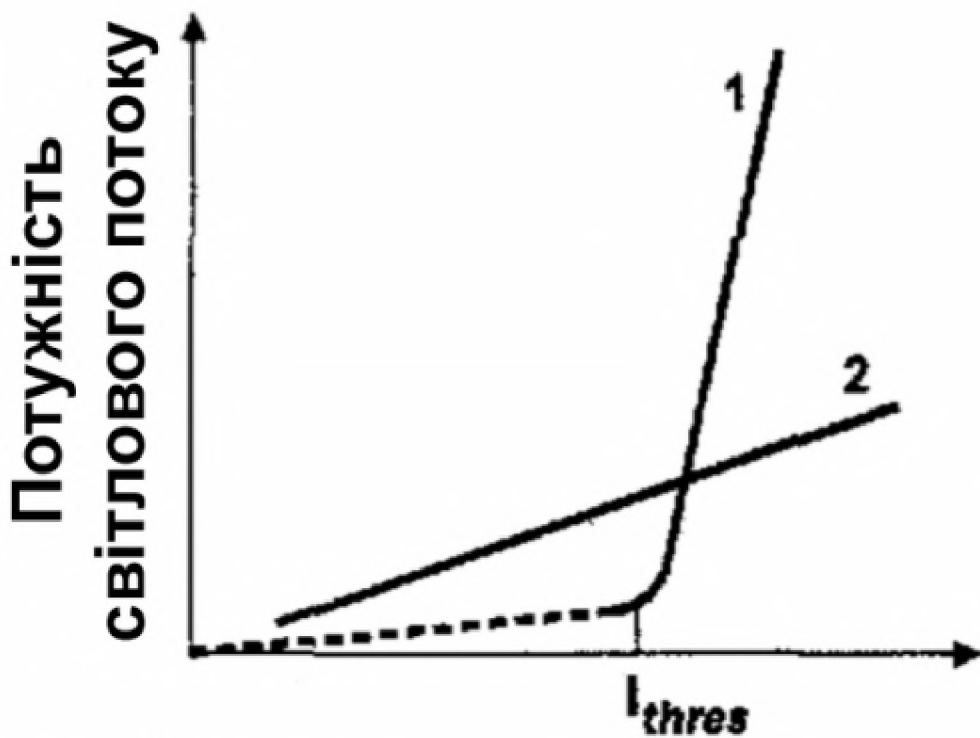


Рисунок 1.10 – ВАХ: 1 – лазерного діода; 2 – світлодіода

Потужність вихідного випромінювання P_{out} чи вихідна потужність випромінювання світлодіода (output power) відображає потужність випромінювання. Поряд з традиційною одиницею виміру Вт вона може вимірюватися в дБм. Потужності P_{out} , виміряної в мВт (10^{-3} Вт), буде

відповідати потужність $P_{out} = 10 \lg P_{out}$ (дБм). Використання одиниці виміру дБм спрощує енергетичний розрахунок бюджету ліній. Потужність випромінювання, що приводиться в характеристиках оптичного передавача, може варіюватися в деякому діапазоні. У таких випадках вказують діапазон потужності випромінювання. Наприклад, -19/-14 дБм означає, що $P_{out min} = -19$ дБм, а $P_{out max} = -14$ дБм.

1.6 Приймачі випромінювання

Фотоприймачі - пристрої для перетворення сигналів електромагнітного випромінювання. Існують різні типи фотоприймачів, в яких використовуються речовини в різних агрегатних станах. Поряд з одноелементними приймачами існують багатоелементні приймачі, з окремими приймальними елементами, дискретно або безперервно розподіленими по поверхні.

1.6.1 p-I-n-фотодіоди

p-I-n фотодіод має тришарову структуру з p- і n-напівпровідників, розділену порівняно протяжної I-областю слаболегованих напівпровідників. Поглинання квантів світла відбувається в збідненій I-області, при цьому в результаті внутрішнього фотоефекту в обсязі цього шару утворюються електрони та дірки, час життя яких набагато перевищує їх час життя в p- і n-шарах (де вони швидко рекомбінують). У зовнішньому електричному полі носії заряду дрейфують, обумовлюючи електричний струм в замкнутому електричному ланцюзі фотоприймального пристрою. Спектральна чутливість p-I-n фотодіодів визначається типом напівпровідникової структури, при цьому червона межа фотоефекту становить близько 0.9 мкм для арсеніду галію, 1.1 мкм для кремнію і 1.7 мкм для германію. Сьогодні розроблені і практично використовуються більш складні фотоприймальні

напівпровідникові структури, в тому числі квантоворозмірні, що володіють високою квантової ефективністю як у вузькій, так і в широкій смугах діапазону довжин хвиль. У кращих зразках р-І-п фотодіодів чутливість фотодіода (відношення величини фотоструму до потужності падаючого випромінювання) досягає рівня понад 0.9 А/Вт. Тимчасові характеристики р-І-п фотодіодів визначаються товщиною збідненого І-шару, швидкістю дрейфу носіїв заряду і власною ємністю фотодіода і підтягующих електродів. Високошвидкісні р-І-п фотодіоди характеризуються часом наростання спаду реєстрованого оптичного сигналу величиною 10 - 100 пікосекунд. Величина зворотного напруги зсуву в р-І-п фотодіодах зазвичай від 10 до 20 В.

1.6.2 Лавинні фотодіоди

Лавинні фотодіоди (ЛФД) відносяться до напівпровідникових фотоприймачів з внутрішнім посиленням фотоструму. Конструктивно в лавинних фотодіодах між областю поглинання світла (π - областю) і n -областю напівпровідникової р- π -п структури розташований додатковий шар р- напівпровідника, той є структура ЛФД має вигляд р- π -р-п. При високій напрузі зворотного зсуву носії, що дрейфують в π -області, набувають кінетичну енергію, достатню для ударної іонізації атомів кристалічної решітки напівпровідника. Завдяки великій, близько 10⁵ В / см, напруженості електричного поля поблизу кордону р- і n - напівпровідників, первинна, що утворилася при поглинанні одного кванта електронно-діркова пара може створити десятки-сотні вторинних пар. В результаті лавинного множення числа носіїв величина фотоструму в ЛФД, в порівнянні з фотострумом в р-І-п фотодіоді, зростає в 100 000 разів, що сприяє збільшенню чутливості такого фотоприймача більш ніж на порядок. Основним недоліком ЛФД є порівняно великі шуми, викликані температурними флуктуаціями величини коефіцієнта лавинного множення. Величина зворотного напруги зсуву в сучасних ЛФД лежить в межах 30 - 200 В і встановлюється з високою точністю, наприклад,

близько 0.1 В. Смуга робочих частот ЛФД досягає 80 ГГц довжини регенераційної ділянки лінії передачі.

1.6.3 Приймач випромінювання схеми АОЛЗ

Як приймач випромінювання схеми АОЛЗ доцільно використовувати р-і-n фотодіод марки (DFD-70), зі спектральною чутливістю 0,85 А / Вт при довжині хвилі 1330 нм, з розміром майданчика до 70 мкм. Це обумовлено наступними його властивостями.

р-І-n фотодіод забезпечує необхідний динамічний діапазон та швидкодія до 1 Гб/с. Залежність характеристик фотодіода від змін оточуючих умов (температури, вібрацій) мінімальна. Спектральна характеристика узгоджена з довжиною хвилі випромінювача. Крім того, фотодетектор має малі габарити та масу, відповідає умовам сумісності з електронними пристроями і споживає малу енергію.

Даний тип фотодіода забезпечує функціонування в необхідному спектральному діапазоні, максимальну інтегральну чутливість, мінімальну еквівалентну потужність шумів і мінімальний темноті струм.

1.8 Постановка задач дослідження

Для досягнення поставленої мети кваліфікаційної магістерської роботи сформульовані наступні завдання:

- розробити електричну схему лабораторного макету із підбором необхідних компонентів;
- провести випробування та зробити аналіз отриманих результатів.

1.9 Висновки до першого розділу

У першому розділі описані та проаналізовані основні функціональні блоки АОЛЗ і лінії зв'язку. Це дозволило зрозуміти принцип передачі

інформації на відстань по атмосферним оптичним лінії на основі лазерних технологій.

Сформульовано завдання та вибудувати подальші дії по розробці лабораторного макету.

2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Вибір режимів випромінювання лазерного передавача

2.1.1 Безперервний режим оптичного випромінювання

Безперервний режим генерації оптичного випромінювання в АОЛЗ застосовується при використанні аналогових видів модуляції.

Так як оптичні детектори реагують на інтенсивність оптичного сигналу, аналогова амплітудна модуляція знаходить обмежене застосування внаслідок суттєвої нелінійної залежності між модулюючим сигналом і сигналом на виході детектора. Тому більш ефективним є використання модуляції інтенсивності випромінювання. В оптичному діапазоні існують фазові модулятори, але, внаслідок труднощів частотної стабілізації передавального пристрою та місцевого гетеродина оптичного приймача, їх застосування також обмежена. Для модуляції випромінювання оптичного діапазону легко здійснимо метод поляризаційної модуляції (лінійної і циркулярної).

Безперервні лазери, як правило, мають багато менше посилення, ніж імпульсні, що пов'язано з меншою питомою потужністю збудження.

Крім того, час встановлення мод тут не критично.

Знання довжини резонатора L_p , розміру робочого перетину $2a$ і довжини хвилі генерації λ_0 дозволяє визначити число Френеля $N_\phi = a^2 / (\lambda_0 L_p)$. За його значенням можна умовно розділити резонатори на малоапертурні з $N_\phi < 1$, проміжні та широкоапертурні з $N_\phi \gg 1$.

У лазерах з малоапертурними дзеркалами використовуються або хвильові, або відкриті стійкі резонаторів. В інших типах малоапертурних резонаторів дифракційні втрати виявляються надмірно великими: так, у нижчій моди плоского резонатора з круглими дзеркалами при $N_\phi = 1$ вони складають до 20% на прохід.

При переході до проміжних значень N_{ϕ} , вибір типу резонатора залежить від характеру та величини статичної і динамічної аберації.

Джерелом статичних аберації можуть бути встановлені конвекційні потоки, дефекти виготовлення оптичних елементів, недосконалості оптичних властивостей активного середовища і т.д.

Для отримання високих вихідних потужностей генерації безперервних лазерних систем необхідне охолодження лазера яке можна отримати за рахунок конвективного теплопереносу, а саме за допомогою швидкої прокачування газу через область розряду. При ефективній роботі таких систем потужність на одиницю масової швидкості потоку (г/сек), що вкладається в розряд, не перевищує 600 Дж г^{-1} .

Ще один шлях до вирішення даної проблеми полягає в тому, щоб використовувати теплоємність середовища в імпульсному режимі. Оскільки теплоємність пропорційна щільності газу, максимальна енергія лазерного імпульсу також пропорційна щільності.

2.1.2 Імпульсний режим оптичного випромінювання

Імпульсний режим генерації оптичного випромінювання в системах зв'язку застосовується для отримання квантованих імпульсних та цифрових видів модуляції. Використання цифрової модуляції переважно, так як в цьому випадку можливе застосування завадостійкого кодування, а також забезпечується просте сполучення оптичного приймача і передавача з ЕОМ, наприклад, по інтерфейсу RS232C або USB. При імпульсному режимі роботи потужність вихідного випромінювання виявляється вищою, ніж при безперервній генерації. Застосовуються наступні види модуляції: КІМ-ІМ (КІМ-АМ), що характеризується тим, що передачі двійкової одиниці відповідає максимальна, а бінарного нуля - мінімальна інтенсивність випромінювання; КІМ-ЧМ, при якій шляхом дискретного зсуву частот випромінювання фіксуються сигнали, відповідні цифровим двійковим

даними; КІМ - ЧМ, в якій двійковій одиниці і нуля відповідає зсув фази по відношенню до опорної на π радіан; КІМ - ПМ, при використанні якої кожним двом видам поляризації (зазвичай ортогональним) також ставиться у відповідність виконавчі одиниця та нуль.

При імпульсному збудженні активного середовища стійкі резонатори використовуються лише в дуже рідко зустрічаються малоапертурних лазерах ($N_\phi < 1$): тому що процес виділення окремих мод стійких резонаторів з $N_\phi > 1$ триває занадто довго.

З огляду на властивого імпульсного режиму порівняно великого посилення активного середовища, нестійкі резонатори тут нерідко використовуються вже при проміжних значеннях N_ϕ .

Для зниження розбіжність вихідного лазерного пучка застосовують, як правило, резонатори з можливо великим коефіцієнтом збільшення M . Зі збільшенням M зменшується чутливість до аберації і форма вихідного пучка набирає вигляду все більш товстого кільця. Однак, надмірно великі коефіцієнти M можуть виявитися не вигідними також при наявності світлорозсіяння, особливо під кутами, близькими до 180° (зазвичай джерелами такого с світлорозсіяння служать всілякі поверхні розділу).

Отримання високих значень шпаруватості імпульсів досить складно. У найпростіших системах модуляції добротності застосовуються обертові дзеркала, призми або системи таких призм, що вимагає точної юстирування і, крім того, сильно ускладнює конструкцію і знижує її надійність і стійкість в роботі. На застосування п'єзоелектричних елементів накладає серйозні обмеження довжина зсуву ними елементів модуляції.

Для скорочення паразитної області імпульсу найбільш доцільне застосування імпульсної накачування. Накачування підтримується на рівні критичної інверсії заселеність, і протягом періоду вихідного імпульсу різко збільшується, перевищуючи поріг генерації, потім повертаючись в початковий стан. Система вимагає точного налаштування.

2.2 Процедура виявлення оптимального прийому сигналів

Оптимальним вирішенням проблеми останньої ділянки (так званої «останньої милі») є використання бездротових ліній передачі. Стандарт IEEE 802.11 передбачає для цих цілей СВЧ або оптичний (ІК) діапазони випромінювань.

Організована на основі АОЛЗ мультисервісна мережа, що має шлюз в телефонну мережу загального користування, дозволить забезпечити високоякісну ІР-телефонію і доступ до комп'ютерних мереж при значній області покриття.

Системи АОЛС можуть використовуватися не тільки на "останній милі" каналів зв'язку, але також і в якості вставок в волоконно-оптичні лінії на окремих важкопрохідних ділянках.

Розробка АОЛЗ, що задовольняє деякому набору технічних і експлуатаційних вимог, зводиться до досягнення компромісного варіанту її реалізації, що задовольняє цим вимогам в більшій чи меншій мірі. Оскільки головні технічні параметри, що описують характеристики АОЛЗ, як правило, пов'язані між собою, при розробці доводиться вирішувати завдання комплексної оптимізації АОЛС як багатопараметричної системи. Такий лабораторний макет базується на заданні параметрів АОЛЗ, що можна проілюструвати наступним розрахунком.

2.2.1 Методика розрахунку АОЛЗ

Методика розрахунку характеристик атмосферного каналу призначена для аналізу малих та середніх (до 1000 м) трас.

Введемо ряд припущень:

- розрахунок ведеться для систем передавання інформації по атмосферному каналу на світловипромінювальних діодах (СВД);

- релєївським розсіюванням та нелїнійним ефектами розповсюдження можна знехтувати;
- згасання сигналу на похилїй трасї для висот до 10 км є меншим, нїж на горизонтальнїй трасї тїєї ж протяжностї на висотї 0 км над рївнем землї;
- спектр флуктуацїй їнтенсивностї сигналу знаходиться в дїапазонї вїд 0 до 5000 Гц;
- максимальне вїдхилення променя внаслїдок турбулентностї атмосфери – 1 мрад;
- у вибраному вїкнї прозоростї вїдсутнї сильнї смуги молекулярного поглинання.

Виходячи з вїдомостей про молекулярне поглинання свїтла у атмосферї можна видїлити такї “вїкна прозоростї”, якї пїдходять для передавання оптичного сигналу:

- 400 ÷ 1330 нм (за виключенням 1200 нм);
- 1520 ÷ 1560 нм;
- 1590 ÷ 2200 нм;
- 3000 ÷ 3300 нм;
- 4100 ÷ 4700 нм.

Найбїльший практичний їнтерес пов’язують їз першим “вїкном”. Їснує велика кїлькїсть джерел випромїнювання їз робочою довжиною хвилї у вїдимому та ближньому ІЧ дїапазонах. Наприклад як випромїнювач можна використати СВД на основї AlGaAs їз спектром випромїнювання 870 ± 25 нм.

2.2.2 Дальність оптичної локації в атмосфері

У випадку однорідного оптичного середовища для направлено монохроматичного світлового пучка (наприклад, лазерного) справедливий закон Бугера

$$J_{l\lambda} = J_{0\lambda} e^{-\sigma_\lambda l}, \quad (2.1)$$

де $J_{0\lambda}$, $J_{l\lambda}$ – інтенсивності монохроматичного випромінювання на вході та виході із середовища, Вт/ср, $-\sigma_\lambda$ – коефіцієнт ослаблення потоку монохроматичного випромінювання, км^{-1} ; l – довжина траси, км.

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

$$\tau_{y\lambda} = e^{-\sigma_\lambda} \quad (2.2)$$

Залежність коефіцієнта пропускання атмосфери від довжини хвилі випромінювання має селективний характер із відповідними вікнами прозорості.

Очевидно, що у випадку активної оптичної локації має місце дворазове проходження траси, тобто загальна довжина шляху визначається як:

$$L = 2l = 2R. \quad (2.3)$$

При цьому потужність оптичного сигналу на вході приймача системи прямо пропорційна квадрату спектрального коефіцієнта одностороннього пропускання атмосфери

$$P_{\lambda} = P_{0\lambda} T_{0\lambda}^2, \quad (2.4)$$

де $P_{0\lambda}$ – потужність відбитого оптичного сигналу на вході приймача.

Отже в інтервалі малих дальностей (при роботі по протяжній цілі), максимальна дальність дії оптичної локації в атмосфері

$$R_{\max} = R_{0\max} T_{0\lambda}, \quad (2.5)$$

$$\text{де } R_{0\max} = \sqrt{P_U K k_0 S_A \rho_D(a) \xi / (\pi P_{\text{пор}})}.$$

В інтервалі великих дальностей (при роботі з точковою ціллю), дальність дії оптичної (в т.ч. лазерної) локації в атмосфері

$$R_{\max} = R_{0\max} \sqrt{T_{0\lambda}}, \quad (2.6)$$

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

Таким чином, ослаблення потужності лазерного зондувального та відбитого оптичних сигналів атмосферою призводить до зменшення відношення сигнал/шум на вході приймача системи. Це, у свою чергу, знижує дальність виявлення цілі.

На практиці для визначення коефіцієнта, при роботі у «вікнах прозорості» атмосфери використовують емпіричну формулу

$$T_{0\lambda} = \exp \left[-\frac{3,91 l_p}{R_M} \chi_{\lambda} \right], \quad (2.7)$$

де l_p – товщина розсіювального шару атмосфери; $\chi_{\lambda} = \sigma_{p\lambda} / \sigma_{p\lambda_0}$ (у видимому діапазоні хвиль $\chi_{\lambda} \approx 1$).

Метеорологічну дальність видимості (МДВ) визначають за формулою

$$R_M = \frac{1}{\sigma_{p\lambda}} \ln \frac{1}{V_{\min}}, \quad (2.8)$$

Де $V_{\min} = 0,02$ – гранична контрастна чутливість ока спостерігача ($l = 0,5\text{мкм}$).

МДВ є граничною дальністю видимості темних предметів з кутовим розміром $0,5^\circ$ стандартним спостерігачем ($V_{\min} = 0,02$) у денний час на фоні неба.

У таблиці 2.1 наведено типові значення питомого пропускання та метеорологічної дальності видимості в залежності від стану атмосфери ($l=500\text{нм}$).

Таблиця 4.2 – Питоме пропускання та дальність видимості атмосфери

Стан атмосфери (видимість)	Бал за кодом	Питоме пропускання $\tau_{y\lambda}$, км	Метеорологічна дальність видимості R_M , км
Туман:			
дуже сильний	0	$> 10^{-34}$	$> 0,05$
сильний	1	$10^{-34}+10^{-8,5}$	$0,05+0,2$
помітний	2	$10^{-8,5}+10^{-34}$	$0,2+0,5$
слабкий	3	$10^{-3,4}+2\cdot 10^{-2}$	$0,5+1$
Димка:			
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	$\geq 0,92$	≥ 50

Графіки залежності спектрального коефіцієнта загасання світлового потоку від МДВ $\sigma_\lambda = f(R_M)$ для різних довжин хвиль наведені на рис. 2.1.

2.2.3 Розрахунок впливу фонового випромінювання

Загальний шум на фотоприймачі складається з шумів, зумовлених атмосферними оптичними завадами, дробових шумів та власних шумів фотоелементів та підсилювачів.

За властивостями і фізичною природою атмосферні оптичні завади поділяють на дві групи:

- фонові перешкоди, викликані власним випромінюванням атмосфери і Землі, а також розсіюванням світла від сторонніх джерел (Сонця, Місяця та ін.);
- завади за рахунок викривлень оптичного сигналу, які зумовлені взаємодією сигналу з атмосферою.

Перша група являє собою адитивні перешкоди, які додаються до корисного сигналу і складаються з постійної в часі та випадкової (швидко змінної) складових. Обидві складові зменшують динамічний діапазон приймача й відповідно зменшують ефективність усієї системи передавання інформації.

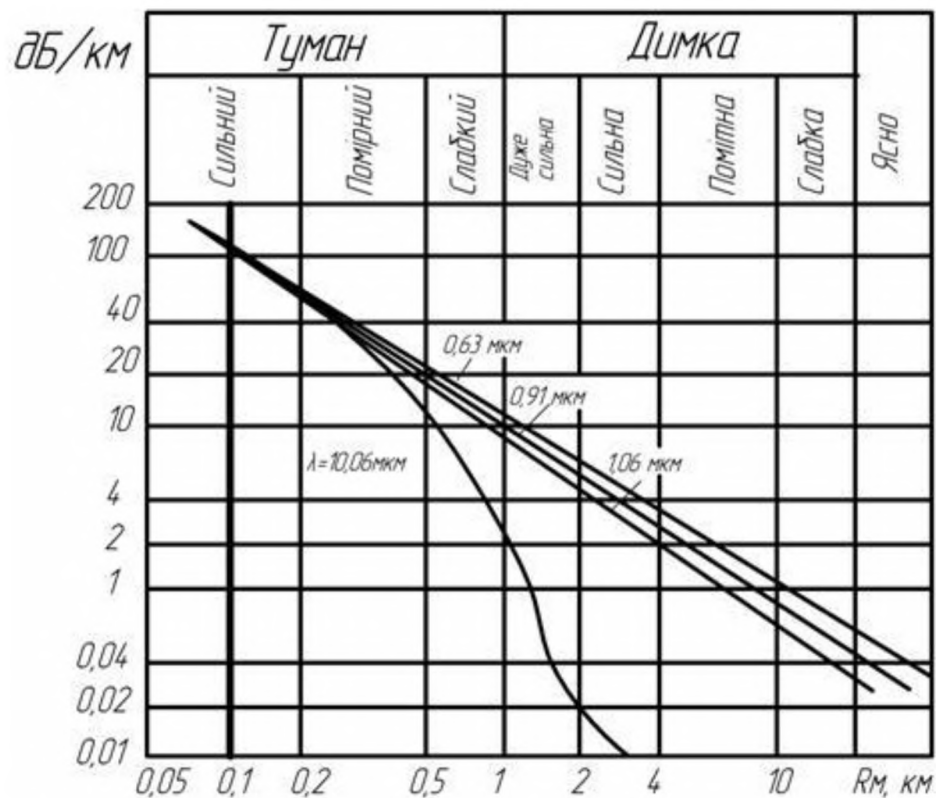


Рисунок 2.1 – Залежність коефіцієнта згасання від МДВ

Друга група являє собою як адитивні, так і мультиплікативні атмосферні завади. Цей вид завад знижує ефективність інформаційної

системи, змінюючи як величину, так і форму самого передавального сигналу. Збільшення потужності оптичного сигналу при цьому не веде до лінійного зростання відношення сигнал/шум. До мультиплікаційних завад відноситься одно або багатократне пряме розсіювання оптичного сигналу.

Дробові шуми зумовлені зміною інтенсивності за рахунок флуктуацій кількості прийнятих квантів оптичного сигналу.

Власні шуми фотоелементу характеризують шумові властивості фотоелементів і першого підсилювального каскаду вхідного підсилювача. Власні шуми залежать від типу фотоприймача, схеми його вмикання, типу підсилювального елементу вхідного підсилювача й ін.

Для розрахунку приймаємо, що у діапазоні довжин хвиль 800-950 нм фонові завади вдень не перевищують значення 10^{-2} Вт/(см²·ср·мкм), а вночі – не більше 10^{-6} Вт/(см²·ср·мкм). В такому випадку основний шум вноситься фоновим випромінюванням (іншими шумами можна знехтувати).

Таким чином, оптична потужність сигналу

$$P_n = 10^{-2} \cdot S_p \cdot \alpha \cdot \Delta\lambda, \quad (2.9)$$

де S_p – площа приймача (см²), α – кут зору приймача (рад), $\Delta\lambda$ – робочий діапазон довжин хвиль фотоприймача.

Залежно від способу модуляції оптичного сигналу змінюється й мінімально допустиме відношення сигнал/шум. Таким чином мінімальна потужність оптичного сигналу буде

$$P_s = N_{\min} \cdot P_n, \quad (2.10)$$

де N_{\min} – мінімальне відношення сигнал/шум для вибраного виду модуляції оптичного сигналу.

2.2.4 Розрахунок параметрів оптичної системи

Оптичні системи дозволяють перерозподіляти світловий потік із збільшенням його концентрації за окремими напрямками.

Діаметр апертури приймальної антени при цьому менший діаметра світлової плями джерела оптичного сигналу. Для оцінювання втрат потужності використовуємо вираз

$$P_{\lambda 0n} = 10 \lg \left(\frac{L_{\lambda} l}{D} \right), \quad (2.11)$$

де L_{λ} – кут розходження променя, рад.; l – відстань до приймача; D – діаметр приймача.

Необхідно врахувати, що оптична система також вносить втрати. Приймаємо коефіцієнт пропускання елементів оптичної системи 0,95, відповідно потужність сигналу необхідно додатково збільшити на 0,5 дБ.

2.2.5 Приклад розрахунку АОЛЗ

Вхідні дані лабораторного макету:

- довжина хвилі – 870 нм;
- робочий діапазон довжин хвиль фотоприймача – 850-900 нм;
- розходження променя – 4 мрад;
- довжина траси – 10 м;
- дальність дії – 1,5 м;
- радіус апертури приймача – 4 см;
- площа приймального елемента – 1 см²;
- кут зору приймача – 0,17 рад;
- згасання у каналі – до 60 дБ/км;

- модуляція – АМ;
- мінімальне відношення сигнал/шум – 3 дБ.

Потужність оптичних шумів

$$P_n = 10^{-2} \cdot S_p \cdot L_\lambda \cdot \Delta\lambda = 8,5 \cdot 10^{-5} \text{ Вт.}$$

Розрахована потужність оптичних шумів складає 85 мкВт.

Розрахуємо максимальні втрати каналу за рахунок погодних умов

$$P_L = \alpha_{\max} \cdot L = 9 \text{ дБ.}$$

Втрати оптичного сигналу за рахунок розходження променя

$$P_{\lambda 0n} = 10 \lg \left(\frac{L_\lambda l}{D} \right)^2 = 17,5 \text{ дБ.}$$

Знайдемо величину мінімального відношення сигнал/шум, враховуючи при цьому всі наявні типи втрат

$$P_{SNR} = P_N + P_L + P_{lost} + P_{opt} = 30 \text{ дБ.}$$

Таким чином, розрахункове відношення сигнал/шум каналу 30 дБ.

Мінімальна потужність оптичного сигналу при цьому становить

$$P_S = 10^{\frac{P_{SNR}}{10}} P_N = 0,085 \text{ Вт.}$$

Таким чином, потужність СВД становить 85 мВт.

Розрахуємо метеорологічну дальність видимості

$$R_M = \frac{1}{\sigma_{p\lambda}} \ln \frac{1}{V_{\min}} \approx 1 \text{ км.}$$

Спектральний коефіцієнт пропускання

$$T_{0\lambda} = \exp \left[-\frac{3,91 I_p}{R_M} \chi_\lambda \right] \approx 0,18.$$

Максимальна дальність дії оптичного локатора в заданих погодних умовах

$$R_{\max} = 1000 \cdot 0,18 = 180 \text{ м.}$$

2.3 Структура апаратних засобів макета АОЛЗ

Результати складання лабораторного макету представлені на рисунку 2.2 та рисунку 2.3. На рисунках можна побачити:

- 1) мікроконтролер Arduino Nano - призначений для формування та відправки пакету даних (Tx), а також отримання інформації та дані, з подальшою їх обробкою (Rx);
- 2) LCD дисплей - призначений для виведення текстової інформації;
- 3) I2C конвертер - необхідний для передачі інформації на LCD дисплей;
- 4) лазерний діод з коліматором - призначений для передачі сигналу, що поступає крізь атмосферу;
- 5) DC-DC 5V перетворювач - служить для живлення мікроконтролера;

- 6) акумуляторна батарея 18650 - потрібна для автономної роботи приймача та передавача протягом 10 годин;
- 7) модуль живлення з захистом - призначений для зарядки акумулятора та захисту його від перезарядження і переразряда;
- 8) модуль компаратора - служить для порівняння рівня напруги на входах і регулювання порога чутливості приймального пристрою;
- 9) фоторезистор і фотодіод - необхідні для прийому оптичного сигналу і перетворення його в пропорційний електричний сигнал;
- 10) тактова кнопка - служить для переривання виконання програми на приймачі і передавачі, а також для обнулення номера циклу пакету даних;
- 11) повзучий вимикач - відповідає за включення і виключення живлення приймача та передавача;
- 12) логічний аналізатор - призначений для візуалізації прийнятого цифрового сигналу.
- 13) штативи - необхідні для узгодження оптичних осів приймача і передавача.

Функція програмного забезпечення зведена до циклічної передачі пакета даних рядком з восьми символів, виду ABCDEFGH, де А - номер пакета по порядку (0-255), BCDEFG - корисне навантаження, Н - контрольна сума ($H = A + B + C + D + E + F + G$ (без урахування переповнення) (0-255)). Далі слідуючий прийом пакета і ряд перевірок на відповідність прийнятих даних. Результат прийому даних відображається на lcd дисплеї в рядку вдало або невдало прийнятих пакетів. Таким чином, даний тип АОЛЗ забезпечує тільки симплексний зв'язок. Розроблений програмний код для платформи Arduino Nano знаходиться в додатках до кваліфікаційної роботи.

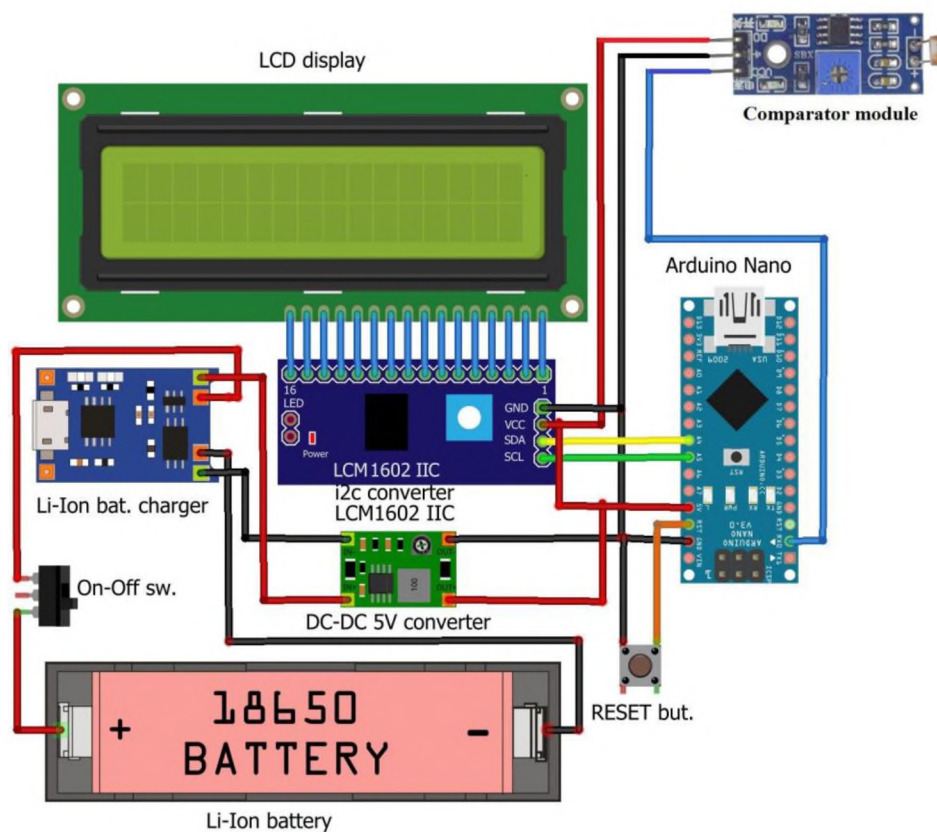


Рисунок 2.2 – Структурна схема приймача

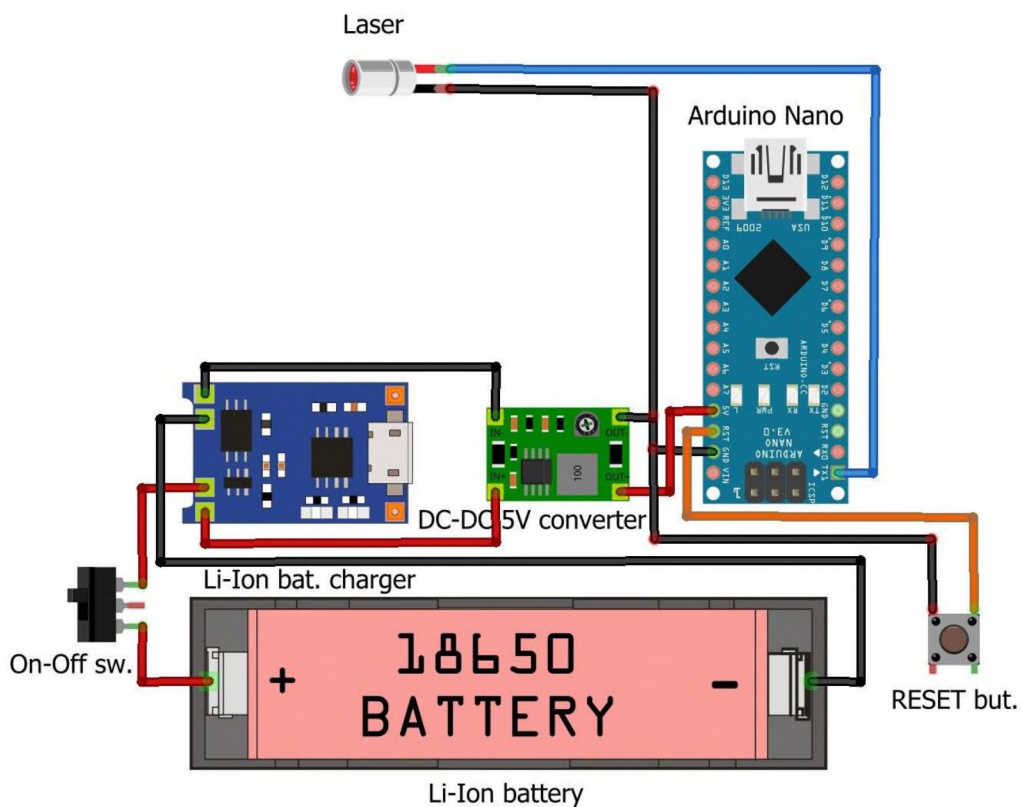


Рисунок 2.3 – Структурна схема передавача

2.4 Результати розробки

Розглянувши всі необхідні теоретичні питання та здійснивши підбір необхідних нам параметрів схеми можна перейти до практичної реалізації. Зібрана схема приймача лабораторного макету представлена на рис.2.4 та на рис. 2.5 передавач.

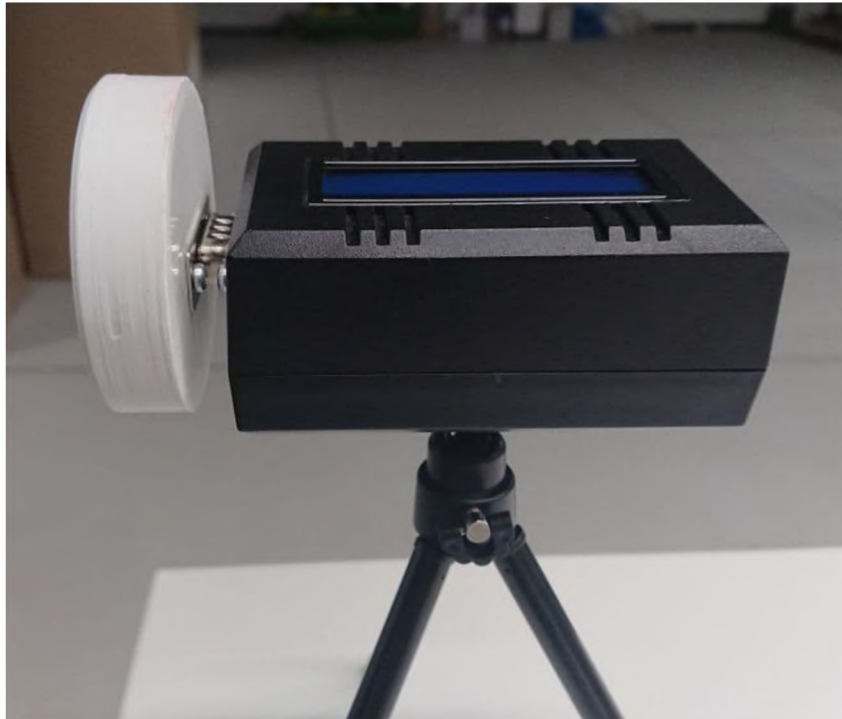


Рисунок 2.4 –Лабораторний макет – приймач



Рисунок 2.5 –Лабораторний макет – передавач

Експеримент проводиться в два етапи: в денний час доби і нічний, на дистанціях від 5м. до 100м. Також враховується стан атмосфери. В якості випромінювача використовується лазерний діод з довжиною хвилі 650 нм. і потужністю 5 мВт. Приймач - полікристалічний кремнієвий фотоелемент. Швидкість передачі даних - 300 символів в секунду. Результати можна побачити на рисунку 2.6.

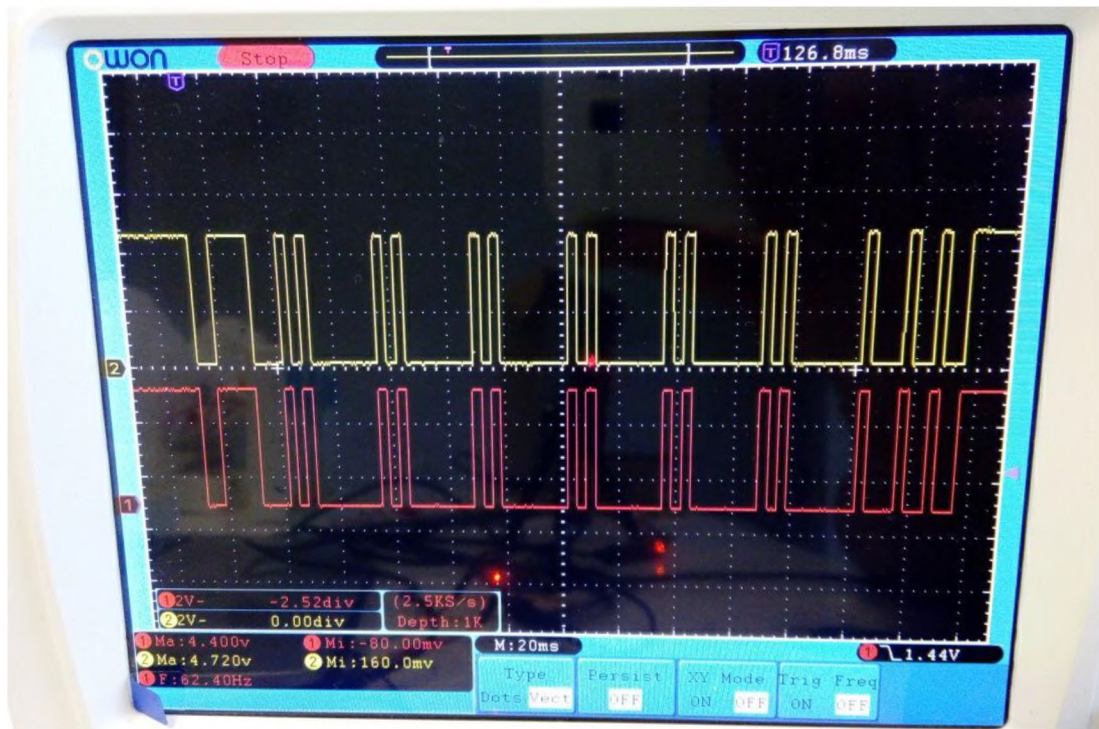


Рисунок 2.6 – Результати передачі (макетна плата)

На рис. 2.6 зображені вихідний сигнал передавача, що надходить на лазер та сигнал, прийнятий на вхід приймача.

2.5 Висновки до другого розділу

У спеціальній частині дипломної роботи спроектована електрична схема лабораторного пристрою, здійснено підбір необхідних компонентів. Також було розглянуті основні принципи роботи обраного АОЛЗ та зроблений аналіз роботи макету.

3 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Визначення трудомісткості розробки лабораторного макета лазерного каналу зв'язку

Трудомісткість – один з показників продуктивності праці, він являє собою суму затрат живої праці на виробництво одиниці продукції. Трудомісткість обернено пропорційна показнику продуктивності праці (кількості продукції, що виробляється за одиницю робочого часу). Поняття трудомісткості тісно пов'язане з поняттям капіталоємності (показник, який характеризує обсяги основного капіталу або основних фондів для випуску продукції, послуг і визначається діленням вартості основних фондів на обсяг продукції у грошовому вираженні, випущеної за рік).

Трудомісткість при дослідженні та розробці лабораторного макета лазерного каналу зв'язку для систем передачі інформації визначається тривалістю кожної робочої операції (таблиця 3.1), починаючи зі збору та аналізу необхідної інформації і закінчуючи оформленням документації (за умови роботи одного чоловіка):

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} + t_{11} \quad (3.1)$$

Оцінка витрат праці на збір і аналіз інформації залежить від конкретних умов і визначається на основі експертних оцінок. Представимо результати трудомісткості кожної операції в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Тривалість кожної робочої операції

Робоча операція	Тривалість
1.Збір і аналіз інформації	$t_1=24$ години
2. Постановка задачі	$t_2=2$ години
3. Складання технічного завдання	$t_3=5$ годин
4. Аналіз технічного завдання.	$t_4=6$ годин
5. Дослідження загальних відомостей про лінії зв'язку	$t_5=10$ годин
6. Узагальнено-структурна модель АОЛЗ	$t_6=7$ годин
7. Загальні відомості про АОЛЗ	$t_7=8$ години
8. Дослідження принципів роботи	$t_8=10$ години
9. Приймачі випромінювання	$t_9=8$ годин
10. Проектування і побудова лабораторного макету системи лазерного зв'язку	$t_{10}=24$ годин
11. Підготовку документації по завданню	$t_{12}=15$ годин

Отже, трудомісткість при дослідженні і розробці лабораторного макета лазерного каналу зв'язку для систем передачі інформації, що розраховується за формулою 3.1, складатиме:

$$t = 24+2+5+6+10+7+8+10+8+24+15=119 \text{ людино-годин.}$$

3.2 Визначення середньої заробітної плати спеціаліста в галузі телекомунікацій

Інженер з телекомунікацій забезпечує доступ користувачам в інтернет, "прокладає" оптико-волоконні мережі, надає послуги IP-телефонії, відповідає за налагодження, експлуатацію, моніторинг мережі, її розвиток, забезпечує якісну і надійну роботу систем. Встановлює на підприємствах системи

відеоспостереження, охоронно-пожежної сигналізації, звукового оповіщення тощо.

Підрахунок середньої заробітної плати:

- Представимо суму заробітної плати в Україні за кожен місяць протягом одного року, з серпень 2019 року по вересень 2020 року: $6350+6400+6800+7000+6760+6950+7000+6740+6500+6800+6990+7200=78790$ грн/рік

- Розрахуємо середню заробітну плату за один місяць за формулою:

$$ЗП_{\text{сер}} = ЗП_{\text{рік}} / 12 \quad (3.2)$$

$$ЗП_{\text{сер}} = 78790/12 = 6566 \text{ грн/місяць}$$

- Розрахуємо середню заробітну плату за одну годину роботи, з урахуванням 8-ми годинного робочого графіку на добу і 5-ти денній робочій тиждень:

- Кількість робочих годин в місяць (підрахунок за місяць квітень (30 днів в місяці)): 168 год/місяць;

- Середня заробітну плату за одну годину роботи становить: 39 грн/годину.

3.3 Розрахунок витрат на заробітну плату

Заробітна плата (оплата праці працівника) - винагорода за працю залежно від кваліфікації, складності, обсягу, якості та умов виконуваної роботи, а також компенсаційні та стимулюючі виплати. Заробітна плата - грошова компенсація, яку працівник отримує в обмін на свою працю.

Заробітна плата виконавця враховує основну і додаткову заробітну плату, а також відрахування на соціальні потреби (пенсійне страхування, страхування на випадок безробіття, соціальне страхування тощо) і визначається за формулою:

$$Z_{\text{п}} = t \cdot Z_{\text{г}}, \quad (3.3)$$

де t – загальна тривалість при дослідженні і розробці лабораторного макета лазерного каналу зв'язку для систем передачі інформації, годин; $Z_{\text{г}}$ – середньогодинна заробітна плата інженера в галузі телекомунікацій, грн/годину.

$$Z_{\text{п}} = 119 \cdot 39 = 4641 \text{ грн.}$$

3.4 Розрахунок витрат на необхідне програмне та апаратне забезпечення

Розрахунок витрат на необхідне програмне та апаратне забезпечення при дослідженні і розробці лабораторного макета лазерного каналу зв'язку для систем передачі інформації наведено в таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Вартість необхідного програмного та апаратного забезпечення

Найменування	Вартість, грн
Нетбук Lenovo IdeaPad S110 59321418	6357,00
Миша A4Tech G7-360N	426,00
Операційна система Microsoft Windows 7 Максимальная, 32-bit	2350,00
Matlab 6.5 (Simulink, Neural Network Toolbox)	4 000,00
Разом:	13133,00

Отже, витрати на необхідне програмне та апаратне забезпечення становлять 13133 гривень.

3.5 Розрахунок капітальних витрат

Під капітальними витратами розуміють усі витрати, які забезпечують підготовку й реалізацію проекту, включаючи формування або збільшення основних та оборотних коштів. Вони не мають на меті дати прибуток принаймні протягом року і є довгостроковими вкладеннями. Залежно від виду і форм капітальних витрат значення їх показників матиме різний економічний сенс.

Це витрати на придбання довгострокових активів, які функціонують протягом тривалого періоду, з поступовою амортизацією ціни. До капітальних витрат звичайно відносять початкову вартість будівель та споруд (або крокові витрати на їх встановлення); вартість нових видів машин та механізмів; придбання обладнання та приладів (крім малокоштовних та швидкозношувальних); вартість придбаних нематеріальних активів (патентів, ліцензій), що належать до поступового списання тощо.

Таким чином, капітальні витрати на дослідження та розробку лабораторного макета лазерного каналу зв'язку для систем передачі інформації є сумою витрат на заробітну плату і витрат на необхідне програмне та апаратне забезпечення.

$$4641 + 13133 = 17774 \text{ грн.}$$

3.6 Висновок

В економічному розділі було розраховано кількість часу, що необхідно для розробки лабораторного макета лазерного каналу зв'язку для систем передачі інформації, заробітну плату інженера, витрати на необхідне програмне та апаратне забезпечення, на основі чого було зроблено висновок, що сума капітальних витрат складає 17774 грн.

ВИСНОВОК

В результаті розробки було отримано лабораторний макетний пристрій, який задовольняє поставленому технічному завданню та є повністю працездатним.

На першому етапі роботи було вироблено вивчення основних видів оптичних передачі сигналів. Це дозволило зрозуміти принцип передачі інформаційних сигналів і вибудувати подальші дії по розробці схеми.

На другому етапі розробки була спроектована електрична схема пристрою, здійснено підбір необхідних компонентів. Також були розглянуті основні принципи роботи обраного АОЛЗ.

На третьому етапі було здійснено розводка друкованої плати і напайку необхідних компонентів. Основною перевагою схеми є її компактність. Отриманий лабораторний макет здатний передавати та приймати модулюючих інформаційних сигналів. Результати випробувань, які проводилися за допомогою лазерного діода виявилися успішними і прийнятий сигнал в точності відповідає оригіналу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Особенности применения атмосферных оптических линий связи//Лазер-информ, №12 (243), 2002, С.13-17.
2. Применение ЭВМ при разработке лазеров/ Ю.А. Балошин, К.И. Крылов, С.Ф. Шарлай. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1989.— 236с.
3. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. - М.: Наука, 1990.-264с.
4. Руденко В.С., Ромашко В.Я., Морозов В.Г. Перетворювальна техніка. Частина I. – К.: ІСДО, 1996.
5. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.
6. Иванов-Цыганов, А.И. Электропреобразовательные устройства РЭС / А.И. Иванов-Цыганов. - Москва: Высшая школа, 1991. - 272 с.
7. Глушков В.М. Энциклопедия кибернетики. Том 2. / В. М. Глушков, Н.М. Амосов, И.А. Артеменко - Киев: Главная редакция УКЭ, 1974 г. - 619 с.
8. Coleman, C. P. A comparison of robustness: fuzzy logic, PID and sliding mode control / C. P. Coleman, D. Godbole. - <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~charles/robust.ps>.
9. Tan, Siew-Chong.Sliding Mode Control of Switching Power Converters.Techniques and Implementation / Siew-Chong Tan, Yuk-Ming Lai, Chi Kong Tse. - Boca Raton: CRC Press, 2012. - 285 p.
10. Сю, Д. Современная теория автоматического управления и ее применение / Д. Сю, А. Мейер. - Москва: Машиностроение, 1972. - 544 с.
11. Хоровиц П. Искусство схемотехники: В 2-х томах. Пер. с англ. – М.:Мир, 1983.-Т.1. 598 с./ П. Хоровицын, У. Хилл.
12. Смит К., Томсон Р. Численное моделирование газовых лазеров. — М.:Мир. - 1981.

13. Кугушев А.М., Голубева Н.С.. Основы радиоэлектроники. - М.: Энергия, 1969. - 880 с.
14. Юров ЮЛ. Электронные приборы СВЧ: Учеб. пос. - Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1972. - 145с.
15. Пратт В.К. Лазерные системы связи. М.: Связь, 1972. 323с.
16. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. -М.: Наука, 1979.
17. Наумов, В.Н. Петровский, Е.Д. Проценко, Р.А. Шананин Системы передачи информации на основе двухмодовых лазеров с управляемыми частотами излучения// Квантовая электроника, 22, №10, 1995, С. 1055-1056.
18. Серопегин В.И. Беспроводные системы передачи данных локального, городского и регионального масштабов. //Технология и средства связи, 1999, № 4, С. 72-77.
19. Оптика и связь: Оптическая передача и обработка информации. Пер. с фр./ А. Козанне, Ж. Флере. М.: Мир, 1984. - 504 с.
20. Краснов Р.П., Юдин В.И. Реализация алгоритма оптимального проектирования атмосферной оптической линии связи// Сб. науч. тр. Проектирование радиоэлектронных устройств и систем. Воронеж, 2004, С.50-56.
21. Гауэр Дж. Оптические системы связи.-М.: Радио и связь, 1989.- 504с.

ДОДАТОК А. Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи

№	Формат	Найменування	Кількість листів	Примітки
<i>Документація</i>				
1	A4	Реферат	3	
2	A4	Список умовних скорочень	1	
3	A4	Зміст	2	
4	A4	Вступ	2	
5	A4	Стан питання. Постановка задачі	23	
6	A4	Спеціальна частина	17	
7	A4	Економічний розділ	5	
8	A4	Висновки	1	
9	A4	Перелік посилань	2	
10	A4	Додаток А	1	
11	A4	Додаток Б	2	
12	A4	Додаток В	3	
12	A4	Додаток Г	1	
12	A4	Додаток Д	1	
12	A4	Додаток Е	1	

ДОДАТОК Б. Лістинг програми передавача

```
#define debug false
String strData = ""
int ledPin = 13
int pause = 5000
char package[] = {0x00, 0x01, 0x01, 0x01, 0x01, 0x01, 0x01, 0x06};
void setup()
Serial.begin(300);
pinMode(ledPin, OUTPUT);
digitalWrite(ledPin, LOW);
delay(100);
digitalWrite(ledPin, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(ledPin, LOW);
delay(100);
digitalWrite(ledPin, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(ledPin, LOW);
delay(100);
digitalWrite(ledPin, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(ledPin, LOW);
    }
void loop() {
digitalWrite(ledPin, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(ledPin, LOW);
for(byte i = 0; i < 8;i++){
strData += (char)package[i];
```

```
    }  
    Serial.print(strData);  
    strData = "";  
    package[0]++;  
    package[7]=  
(char)package[0]+(char)package[1]+(char)package[2]+(char)package[3]+(char)pac  
kage[4]+(char)package[5]+(char)package[6];  
    delay(pause - 100);  
}
```

ДОДАТОК В. Лістинг програми приймача

```
#define debug false //true
int ledPin = 13;
String strData = "";
boolean recievedFlag;
byte old_package_number = 0;
byte good_number = 0;
byte err_counter = 0;
boolean number_flag = false;
boolean crc_flag = false;
boolean packge_flag = false;
byte testPackage[] = {0x00, 0x01, 0x01, 0x01, 0x01, 0x01, 0x01, 0x01};
void setup() {
  Serial.begin(300);
  Serial.println();
  Serial.println("Start");
  Serial.println();
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  digitalWrite(ledPin, LOW);
}
void loop() {
  while (Serial.available() > 0) {
    strData += (char)Serial.read();
    recievedFlag = true;
    delay(70);
  }
  if(recievedFlag){
    if(debug){Serial.println();
```

```

        Serial.print(strData[0], HEX);Serial.print(" ");Serial.print(strData[1],
HEX);Serial.print(" ");Serial.print(strData[2], HEX);Serial.print("
");Serial.print(strData[3], HEX);Serial.print(" ");
        Serial.print(strData[4], HEX);Serial.print(" ");Serial.print(strData[5],
HEX);Serial.print(" ");Serial.print(strData[6], HEX);Serial.print("
");Serial.println(strData[7], HEX);
    }
    char current_crc = (char)strData[0]+(char)strData[1]+(char)strData[2]+(char
)strData[3]+(char)strData[4]+(char)strData[5]+(char)strData[6];
    if(debug){Serial.print("Input package number: ");
Serial.println(strData[0], HEX);
        Serial.print("Input package CRC: "); Serial.println(strData[7], HEX);
        Serial.print("Current CRC: "); Serial.println(current_crc, HEX);
        Serial.print(" #53 err_pack :");Serial.println(err_counter);
    }
    if(current_crc == strData[7]){
        crc_flag = true;
    }
    else{
        crc_flag = false;
    }
    if((strData[0] - old_package_number) == 1){
        old_package_number = strData[0];
        number_flag = true;
    }
    else{
        old_package_number = strData[0];
        number_flag = false;
    }
    for (int i = 1 ; i<7 ; i++){

```

```
if(strData[i] == testPackage[i]){
    packge_flag = true;
}
else {
    packge_flag = false;
    break;
}
}
if(debug){Serial.println("-----");
Serial.print("packge_flag = ");Serial.println(packge_flag);
Serial.print("number_flag = ");Serial.println(number_flag);
Serial.print("crc_flag = ");Serial.println(crc_flag);
}
if(packge_flag && number_flag && crc_flag){
    good_number++;
    if(debug){Serial.println("--> EPIC WIN!! <--");
        Serial.println("-----");
        Serial.print("good_counter = ");Serial.println(good_number);
        Serial.print("error_counter = ");Serial.println(err_counter);
    }
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(ledPin, LOW);
    delay(100);
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(ledPin, LOW);
    delay(100);
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    delay(100);
```



```
    digitalWrite(ledPin, LOW);
}
else{
    err_counter++;
    if(debug){Serial.println("--> EPIC FAIL!! <--");
        Serial.println("-----");
        Serial.print("good_counter = ");Serial.println(good_number);
        Serial.print("error_counter = ");Serial.println(err_counter);
        Serial.println();
    }
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite(ledPin, LOW);
}
strData = "";
recievedFlag = false;
}
}
```

ДОДАТОК Г. Перелік документів на оптичному носії

1. Пояснювальна записка
2. Презентація

ДОДАТОК Е. Відгук керівника дипломної роботи

В І Д Г У К

на кваліфікаційну роботу студента групи 172м-19-1

Васильєва Данііла Геннадійовича

на тему: «Розробка лабораторного макета лазерного каналу зв'язку для систем передачі інформації»

Пояснювальна записка складається зі вступу, трьох розділів і висновків, розташованих на 68 сторінках.

Мета кваліфікаційної роботи є актуальною, оскільки вона направлена на розробку лабораторного макета лазерного каналу зв'язку для систем передачі інформації. Автор зумів відобразити вищезгадану специфіку, аргументовано обгрунтував актуальність теми свого дослідження.

Характеризуючи роботу необхідно відзначити, що вибрана автором логіка дослідження, послідовність і зміст розділів дають змогу якісно розкрити тему.

В економічному розділі розраховано кількість часу, що необхідно для розробки лабораторного макета лазерного каналу зв'язку для систем передачі інформації, заробітну плату інженера, витрати на необхідне програмне та апаратне забезпечення.

Рівень запозичень у кваліфікаційній роботі відповідає вимогам "Положення про систему виявлення та запобігання плагіату".

Як зауваження необхідно відзначити деякі стилістичні неточності та недостатню проробку окремих питань.

В цілому кваліфікаційна робота магістра заслуговує оцінки «_____», а її автор присвоєння кваліфікації «Магістр з телекомунікації та радіотехніки».

Керівник спеціальної частини,

асистент кафедри БІТ

Ю.П. Рибальченко

Керівник роботи,

к.ф.-м.н., проф. кафедри БІТ

О.Ю. Гусєв