

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»
Завідувачка кафедри

_____Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

01 травня 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «бакалавр»

за спеціальністю 171 «Електроніка» освітньо-професійної програми
«Електронні інформаційні системи»
на тему « **Атмосферні оптоелектронні системи передачі інформації_»**

здобувача групи _ЕП-01 Ціко Миколи Васильовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання
на відповідне джерело.

_____ Микола ЦІКО

Керівник доцент кафедри електроніки,
загальної та прикладної фізики,
к.ф.-м.н., доцент

_____ Наталія ШУМАКОВА

Суми 2024

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 «Електроніка», освітньо-професійна програма
«Електронні інформаційні системи»

«До захисту допущено»
Завідувачка кафедри

_____Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ
_____202__р.

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Ціко Миколи Васильовича

1. Тема роботи «Атмосферні оптоелектронні системи передачі інформації»

Затверджена наказом СумДУ від «24» квітня 2024 р., № 0417-VI

2. Термін здавання здобувачем закінченої роботи:

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета):

Мета кваліфікаційної роботи бакалавра полягає в дослідженні та аналізі особливостей атмосферних оптоелектронних систем передачі інформації з метою розкриття їхнього потенціалу та можливостей.

4. Зміст текстової частини роботи (перелік питань, які необхідно розробити):

1. Основні поняття, характеристика оптичних систем, принцип дії.

2. Практичне застосування оптичних систем, переваги та недоліки.

3. Розробка та моделювання модулятора-передавача оптичного сигналу.

5. Перелік графічного матеріалу для презентації:

Слайд № - 1-2 Титульний аркуш, анотація.

Слайд № - 3-6 Принципи роботи оптичних систем, лазерні системи зв'язку.

Слайд № - 7-8 Розповсюдження лазерного випромінювання в атмосфері.

Слайд № - 9-10 Моделювання схеми передавача оптичного сигналу.

Слайд № -11 Список використаних джерел.

6. Дата видачі індивідуального завдання: 09.04.2024 р.

Дата видачі завдання 01.05.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка про стан вик. роботи
1.	Аналіз літературних даних	до 07.05.2024 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення вимірювань, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 22.05.2023 р.	<i>вик.</i>
3.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи	до 26.05.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	31.05.2024 р., 10-00, онлайн	<i>вик.</i>
5.	Захист кваліфікаційної роботи	05.06.2024 р., 10-00, онлайн	

Здобувач вищої освіти

Микола ЦІКО

Керівник

Наталія ШУМАКОВА

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ	5
1.1 Еволюція та класифікація оптоелектронних інформаційних систем, їх переваги та недоліки.....	5
1.2 Атмосферні лазерні системи зв'язку.....	9
РОЗДІЛ 2 РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В АТМОСФЕРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	16
2.1 Закон Бугера-Ламберта.....	17
2.2 Закон Бугера-Ламберта для розсіювання в атмосфері	18
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ СХЕМИ ПЕРЕДАВАЧА ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ.....	222
3.1 Оптичний бездротовий зв'язок.....	282
3.2 Модуляція лазерного випромінювання для передачі звуку.....	Помилка! Закладку не визначено.
3.3 Схеми модулятора-передавача та приймача оптичного сигналу на основі фоторезисторів.....	28
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	333
ДОДАТОК А.....	34

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 39 сторінках, зокрема, містить 15 рисунків, 1 таблицю, список використаних джерел із 18 найменувань та додаток.

Актуальність роботи обумовлена наступними чинниками: завдяки швидкому розвитку цифрових технологій, вимоги до швидкості та масштабів передачі інформації постійно зростають. Атмосферні оптоелектронні системи можуть забезпечити високу пропускну здатність і ефективно передавати великі обсяги даних на великі відстані. У сучасному світі, де технології використовуються в різноманітних середовищах, важливо мати системи зв'язку, які можуть працювати ефективно навіть під час поганих погодних умов або в умовах обмеженої видимості.

Мета кваліфікаційної роботи бакалавра полягає в дослідженні та аналізі особливостей атмосферних оптоелектронних систем передачі інформації з метою розкриття їхнього потенціалу та можливостей.

Під час виконання роботи була використана методика моделювання роботи оптоелектронної схеми передавача звуку (інформації) на основі LED здійснюємо в аплет-симуляторі схем за посиланням <https://falstad.com/Circuit/>. У результаті кваліфікаційної роботи було розглянуто фізичні принципи роботи оптичних систем передачі інформації через атмосферу. Їх основні переваги та недоліки. Виокремлено атмосферні лазерні системи зв'язку як важливий елемент оптичних систем передачі інформації, що забезпечують ефективний та швидкий обмін даними. За допомогою аплет-симулятора Circuit Simulator Applet проведено моделювання роботи оптоелектронної схеми передавача оптичного сигналу на основі LED або лазерного діода.

Рекомендації щодо використання: розроблені схеми модулятора-передавача, приймача оптичного сигналу, і приймача демодулятора можуть бути використані у лабораторних і навчальних цілях.

Ключові слова: СХЕМА МОДУЛЯТОРА-ПЕРЕДАВАЧА ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ, ПРИЙМАЧ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ, ПРИЙМАЧ-ДЕМОДУЛЯТОР.

РОЗДІЛ 1 ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ

1.1 Еволюція та класифікація оптоелектронних інформаційних систем, їх переваги та недоліки

Оптичний зв'язок починає свою історію з винаходу оптичного телеграфу Клодом Шаппом у 1790 році у Франції, її принципи такі. Сигнальні вежі розміщувалися на спеціальних вежах і використовували рухомі рейки для передачі кодованого повідомлення залежно від їхнього різного загального розташування (рис. 1.1). Сигналізатор на сусідній вежі прочитав повідомлення за допомогою підзорної труби.

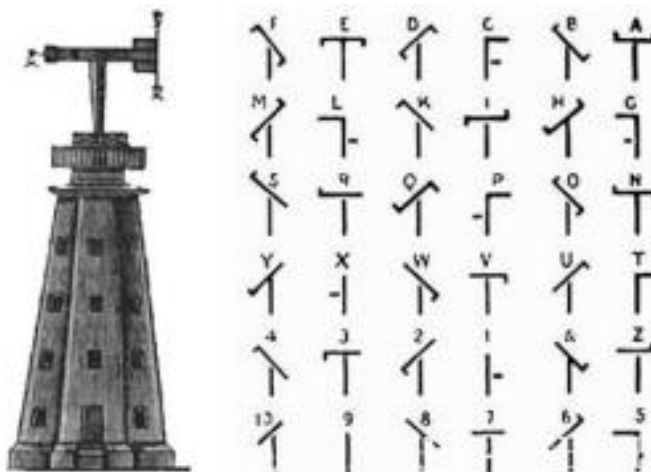


Рисунок 1 – Перший оптичний телеграф Клауда Шаппа та його азбука (Франція, 1790 р.) [1]

Перший оптичний телеграф представляв собою ланцюг таких веж, розташованих між Парижем і Ліллем на відстані 230 км. Надсилання повідомлень між цими містами займає 15 хвилин. Вважається, що багатьма своїми блискучими перемогами Наполеон Бонапарт завдячував оптичному

телеграфу, завдяки якому міг швидко передавати свої накази на великі відстані.

Наступними важливими відкриттями в цьому напрямку були оптичні сигнали.

Олександр Белл (США) продемонстрував, як модулювати оптичні сигнали за допомогою дзеркал у 1860 році та передавати голос за допомогою світлових променів у 1881 році. У цьому пристрої за допомогою системи лінз і дзеркал світло проектується в плоске дзеркало, встановлене на рупорі (рис. 1.2). Під впливом звуку дзеркало вібує, в результаті чого відбите світло модулюється. У приймачі використовується датчик на основі селену, опір якого змінюється залежно від інтенсивності падаючого світла. Цей пристрій називається фотофоном і може передавати голосові сигнали на відстань понад 200 м. Таким чином, фотофон був першим у світі VLC-пристроєм (Visible Light Communication – зв'язок за допомогою видимого світла).

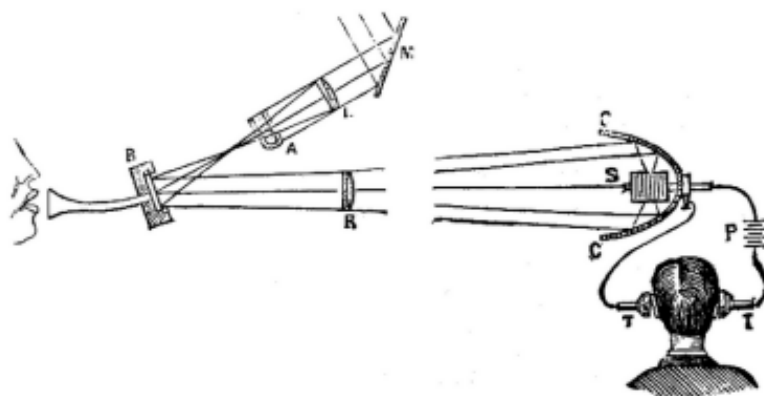


Рисунок 1.2 – Фотофон, розроблений Олександром Беллом [2]

У цьому пристрої в якості приймача використовується елемент з кристалічним селеном. Стійкість цього матеріалу змінюється залежно від світла (опір більший у темряві, менший на світлі). Ідея фотофона полягає в тому, щоб модулювати світловий промінь: зміни інтенсивності світла на фоторецепторі спричиняють відповідну зміну його опору, який можна використовувати для відтворення звуку. Модуляція світлового променя здійснюється за допомогою чутливого дзеркала, яке здатне згинатися під впливом звукових хвиль (таким

чином фокусуючи або розсіюючи промінь). В експерименті у Вашингтоні Белл і його колега Чарльз Самнер Тейнтер впевнено вели розмову на відстані близько 210 метрів за допомогою звичайного сонячного датчика.

Приймач являє собою параболічне дзеркало з селеновим фотоелементом у фокусі. Елемент має змінний опір в діапазоні від 300 до 100 Ом. Фотокамера була надзвичайно важливим винаходом, але минуло багато років, перш ніж люди зрозуміли та визнали важливість роботи Белла. Фотофон Bell не застрахований від зовнішніх впливів, таких як хмарність або туман, які перешкоджають процесу передачі. Лише з появою волоконно-оптичних кабелів передача світлового сигналу почала мати практичне застосування. У середині 20 століття були встановлені основні принципи лазера як потужного джерела світла (Гордон Голд, 1957, США), а через деякий час були розроблені перші прототипи лазерів: в 1960 році. Теодор Мейман (США) створив перший у світі прототип лазера. Перший рубіновий лазер і співробітники Bell Laboratories Алі Джаван, Вільям Беннет і Дональд Герріот (США) - гелій-неоновий лазер, 1970, напівпровідниковий лазер кімнатної температури, розроблений Жоресом Алфьоровим (Радянський Союз) і Гербером Кремером (Німеччина). Потужне випромінювання лазерів як засобу зв'язку не залишилося поза увагою фахівців у зв'язку. Інформаційна здатність лазерного випромінювання в 10 000 разів перевищує потужність радіочастотного випромінювання.

Однак лазерне випромінювання не підходить для передачі сигналів на відкритому просторі, так як на його роботу сильно впливають погодні умови (дощ, туман, вітер і т.д.), а також наявність багатьох типів перешкод (рельєф місцевості, будівлі і т.д.).

Перевагами оптичної передачі інформації є наступні.

1. Висока інформаційна ємність. Для передачі інформації необхідні майже монохроматичні умови. Це означає, що спектральна ширина переданого сигналу повинна бути набагато меншою за його середню частоту, принаймні на один-два порядки нижче. Оскільки оптична область характеризується несучою частотою в діапазоні 10¹⁴ Гц, смуга пропускання сигналу може досягати 10¹²-10¹³ Гц, що недоступно для мікрохвильової техніки.

2. Висока швидкодія. Теоретично оптичні системи характеризуються високою швидкістю, так як швидкість обробки визначається швидкістю поширення світла у середовищі. Однак на практиці швидкість таких систем обмежується швидкістю введення-виведення інформації.

3. Висока щільність запису інформації. Когерентні пучки світла можуть бути сфокусовані в пляму з розмірами, з довжиною хвилі, що дозволяє різко збільшити щільність запису інформації (до 10^8 біт/см²).

4. Багатоканальна обробка інформації (паралельні алгоритми обробки інформації, оперування образами). Можливість багатоканальної обробки інформації досягається за рахунок подвійної модуляції світлового променя (просторової та часової модуляції). Зазвичай оптичне зображення функції є щонайменше 2-3 незалежних координат (X, Y, Z, час), тоді як електричний сигнал має лише одну незалежну змінну часу. Оскільки оптичні зображення залежать від декількох координат, одну з них можна використовувати як незалежну змінну, а іншу – як параметр, що визначає номер каналу. Це дає можливість обробляти інформацію паралельно по багатьох каналах і передавати зображення (образи) за один машинний цикл без сканування рядків зображення піксель за пікселем, як це реалізовано в електронних інформаційних системах.

5. Квантова природа сигналів. Наступною характеристикою оптичного поля є необхідність урахування квантових властивостей випромінювання. Це виражається як у генерації випромінювання, так і в реєстрації його фоторецепторами. У мікрохвильовій області енергія окремого кванта менша від теплової енергії і навпаки, в оптичній області в першому випадку є тепловий шум, а в оптичній області квантовий шум. При проектуванні ОІС необхідно враховувати квантовий шум приймача (частковий шум) оптичного потоку.

6. Висока антиінтерференційна здатність. Інформація передається електрично нейтральними фотонами, які не взаємодіють ні між собою, ні з зовнішніми електричними чи магнітними полями. Це визначає високу завадостійкість каналу зв'язку.

7. Багатофункціональний. Комбіновані світлові промені, що несуть

інформацію, можуть оброблятися аналогічними оптичними обчислювальними пристроями, включаючи лінзи, дзеркала, дифракційні решітки тощо.

Зокрема, такі математичні операції, як диференціювання, інтегрування, згортка та множення, виконуються дуже швидко й точно (до 10¹² біт/с).

Тому заміна електричних схем в інформаційних системах на оптичні схеми дозволяє істотно (на 3-4 порядки) підвищити швидкість і ємність цих систем, і в той же час перехід на інтегральні схеми Оптоелектроніка дає значні додаткові переваги як з точки зору потужності, споживання, а також загальний розмір і надійність системи.

1.2 Атмосферні лазерні системи зв'язку

Проблема налаштування звичайних лазерних систем на досить високі частоти, що дозволяють максимально використовувати високу щільність каналів, досі повністю не вирішена. Цією проблемою займаються вчені з усіх країн. Незважаючи на це, оптичні передавачі використовувалися як засіб зв'язку в наземних умовах. Відзначимо основні етапи розвитку лазерних систем, які зумовили їх широке використання в різних сферах.

Так, у 1960 році У США для зв'язку використовуються рубінові лазери, що працюють в імпульсному режимі з тривалістю імпульсу 0,5 мс. Яскравість променя на випромінюваній частоті в мільйон разів перевищує яскравість Сонця. Генератор мав промінь шириною всього 0,10, який на відстані 40 км освітлював коло діаметром 60 м на стіні .

У США проводилися експерименти по встановленню зв'язку між підводними човнами, оснащеними лазерами. В їхній підводний човен перископ. Зв'язок між кораблями підтримувався далеко за горизонтом на відстані до 320 км і більше (в даному випадку використовувалися інфрачервоні промені).

Лазер рятує життя на морі Розроблено спеціальний мініатюрний лазер на основі вольфрамату кальцію з додаванням неодиму. Вага пристрою не перевищує 400 г. Прилад випромінює когерентне світло, яке можна виявити на відстані до 50 км.

Рівень сигналу можна збільшити за допомогою оптичного квантового підсилювача. В одному досліді використовувалася кругла і пряма легка труба діаметром 50 мм і довжиною 400 м.

На приймальному кінці оптичного волокна світлові імпульси дуже інтенсивні. При використанні оптичних волокон з добре відшліфованими стінками можна пропускати світловий промінь по криволінійній траєкторії. Лазери також можна використовувати для організації оптичного телефонного зв'язку. З'єднавши лазер з оптичним волокном, можна створювати багатопольові пристрої, які передають все зображення об'єкта одночасно. Така система буде використовуватися для передачі телевізійних і радіолокаційних зображень, погодних і топографічних карт або контурних карт. Звичайні радіохвилі ледве проникають через плазму, що оточує космічний корабель, коли він входить в атмосферу Землі. Лазерний промінь добре проникає в іонізований шар повітря, забезпечуючи передачу інформації. Таким чином лазер усуне будь-які перебої в радіозв'язку з астронавтами в критичні моменти приземлення космічного корабля. У 1963 році на астронавтичній конференції в США було повідомлено про розробку комбінованої радіооптичної системи зв'язку в далекому космосі. Передбачається, що система зв'язку складатиметься з трьох окремих частин: апаратури зв'язку космічного корабля, ретрансляційної станції, встановленої на штучному супутнику Землі, і наземної станції. Зв'язок між Землею і ретрансляційною станцією здійснюється за допомогою радіочастот, а між ретрансляційною станцією і космічним кораблем - за допомогою лазерів. Попередні випробування показали, що за допомогою такої радіооптичної системи можна передавати інформацію на відстані до 600 мільйонів кілометрів.

Американці в 1965 році використовували лазери в системі зв'язку космічного корабля «Джемінай» із Землею. Планується провести експеримент, у якому астронавт, щоб встановити телефонний зв'язок із Землею, повинен направити портативний квантовий передавач світла на приймач на землі та протягом 30 секунд дати команду передати повідомлення.

Використовуючи імпульсний оптичний локатор, можна вимірювати не

тільки координати цілі, але й швидкість цілі. Найбільш точні дані про швидкість отримують за допомогою лазера в доплерівській системі позиціонування.

Лазери також призначені для використання в локальних установках для виявлення підводних цілей. Висока роздільна здатність оптичного локатора дає можливість подолати недоліки, які властиві акустичним системам. Експерименти, проведені у США, показали, що дальність дії лазера на рубіні під водою становить 45 м. Вибором довжини, випромінюваної лазером хвилі, можна досягти значного збільшення дальності локатора.

Однією з задач систем передачі інформації через атмосферу є застосування алгоритмів прогнозування поведінки сигналу, оскільки оптичні лінії зв'язку в атмосфері сильно залежать від наявності пилу, диму та інших завад, а турбулентні явища в атмосфері призводять до флуктуацій показника заломлення середовища і, отже, до спотворень променя і флуктуацій кута приходу випромінювання на фотоприймач. Схему одного з варіантів приймально-передавального пристрою атмосферної системи зв'язку з напівпровідниковим лазером подано на рис. 1.3. [3].

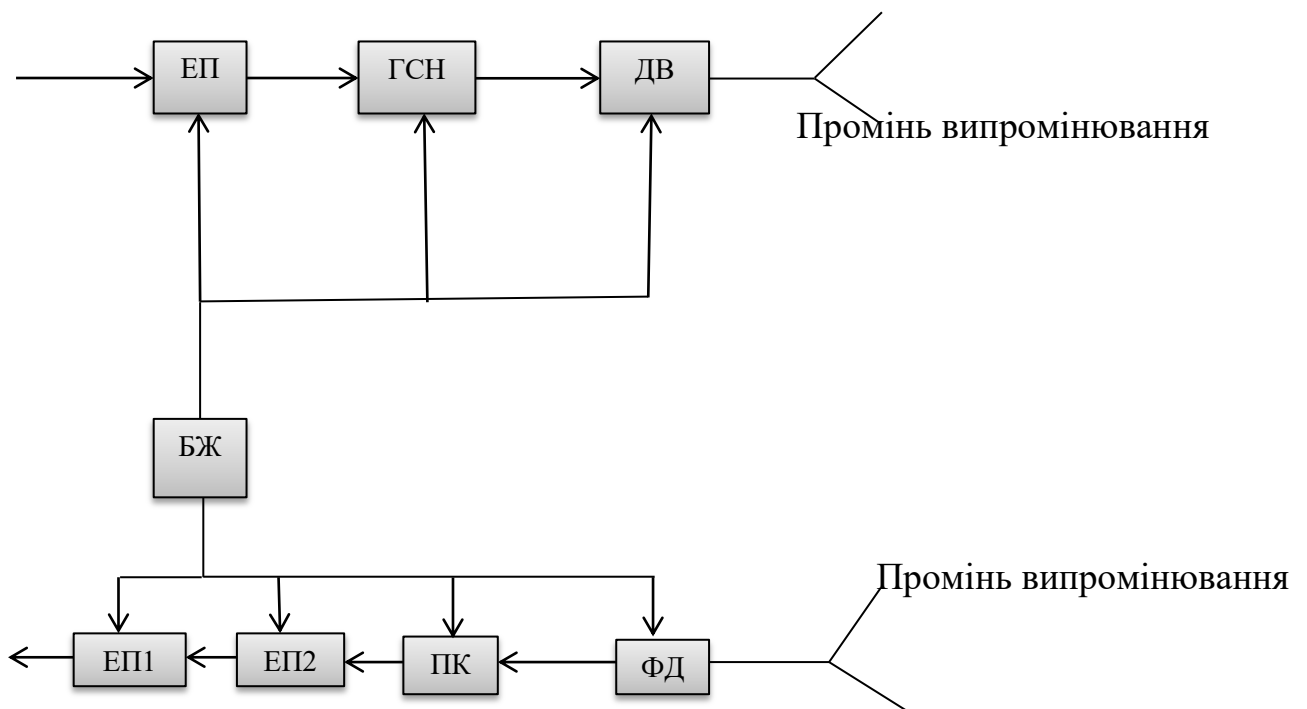


Рисунок 1.3 – Схема приймально-передавального пристрою атмосферної системи зв'язку: ЕП, ЕП1, ЕП2 –електричні підсилювачі; ГСН – генератор

струму накачування; ДВ – джерело випромінювання; БЖ – блок живлення; ПК – погоджувальний каскад; ФД – фотодіод [3]

Передавальна частина системи містить підсилювач електричних сигналів ЕП, генератор струму накачування ГСН, що виконує роль перетворювача напруги в струм і каскаду джерела випромінювання на приймальну площадку фотодіода. Каскад з фотодіодом ФД через погоджувальний каскад ПК підключений до підсилювачів ЕП1, ЕП2. Живлення передавального і приймального пристрою здійснюється від блоку живлення БЖ. Оптичне випромінювання фокусується за допомогою антени [4]. Приймальна частина містить антену, яка фокусує випромінювання на приймальну площадку фотодіода. Проте антена не здатна вказати на напрямок зміщення від центру приймальної лінзи фотоприймальної матриці і в інтелектуальних системах передачі інформації в яких сприймаються такі характеристики, як форма лазерного пучка, його площа, центр та ін. часто не достатньо фокусувати лише за рівнем сигналу. В цьому випадку використовуються різноманітні методи прогнозування поведінки плям лазерних пучків в т.ч.. Такі методи дозволяють заздалегідь попередити систему про можливі проблеми фокусування та адекватно на них відреагувати. Живлення передавального і приймального пристрою здійснюється від блоку живлення БЖ. Як джерела випромінювання можуть використовуватися лазери газові, на основі твердого тіла і напівпровідникові. Детектування оптичного сигналу може здійснюватися за допомогою звичайних і лавинних фотодіодів, а також фотоелектронних помножувачів. В оптичних системах може застосовуватися стабілізація потужності оптичного випромінювання. Цифрові системи зв'язку містять також, як правило, порогові пристрої для регенерації прямокутних імпульсів з метою відновлення форми імпульсів [5]. Окрім зазначених основних вузлів, станція атмосферного лазерного зв'язку (АЛЗ) може бути забезпечена системами термостабілізації, самодіагностики, індикації робочих параметрів тощо. Високий ступінь когерентності лазерного випромінювання дозволяє використовувати перешкодостійкі методи модуляції:

частотну, фазову і поляризаційну модуляцію. Відомі системи ОЗ із застосуванням поляризаційної модуляції випромінювання безперервних газових лазерів (лазер He-Ne з $\lambda = 0,03$ мкм і CO₂ - лазер з $\lambda = 10,6$ мкм) для передачі як аналогової, так і цифрової інформації. Для передачі останньої, наприклад, зручна імпульсна модуляція інтенсивності напівпровідникових лазерів струмом накачування.

Серед відкритих ліній зв'язку перспективні лінії зв'язку Земля - космос і космос - космос, де на великих відстанях (напр., $1,6 \times 10^8$ км до планети Марс) необхідно передавати великий обсяг інформації з великою швидкістю (10^6 біт/с). Параметром для оцінки можливостей високошвидкісної передачі інформації є добуток швидкості передачі інформації на відстань. Для ОЗ на довжині хвилі випромінювання $\lambda = 1,55$ мкм цей параметр може перевищувати 200 (Гбіт / с) км.

Специфічною особливістю систем ОЗ в порівнянні з радіотехнічними системами є обмежена величина енергетичного потенціалу - відношення потужності джерела випромінювання до потужності оптичного сигналу, який надходить з виходу волоконної лінії в фотоприймач та необхідної для реєстрації сигналу з необхідною імовірністю помилки (не більше 10^{-9}). Для виділення інформаційного сигналу на приймач має надходити певне число фотонів. При збільшенні швидкості передачі інформації та збереження при цьому однією і тією ж ймовірністю помилки повинна зростати оптична потужність, яка детектується фотоприймачем.

Лазери, пристрої для генерування або підсилення когерентного, монохроматичного і вузько спрямованого електромагнітного випромінювання оптичного діапазону, здатного поширюватися на великі відстані без розсіювання і створювати винятково велику густину потужності випромінювання при фокусуванні (10^8 Вт/см² для високоенергетичних лазерів), застосовуються для передачі даних у волоконно-оптичних системах передачі даних.

Для утворення головного елемента лазера, активного середовища, використовують: вплив світла, електричний розряд у газах, хімічні реакції,

бомбардування електронним пучком та інші методи «накачування». Поширення лазерного променя в атмосфері значною мірою залежить від метеоумов, від наявності диму, пилу й інших забруднень повітря. Крім того, в атмосфері спостерігаються турбулентні явища, що приводять до флуктуації показника переломлення середовища, коливань променя і перекручень прийнятого сигналу. Однак, незважаючи на зазначені проблеми, атмосферний лазерний зв'язок виявився цілком надійним на відстанях декількох кілометрів і особливо перспективним для розв'язання проблеми «останньої милі». 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). [5]

Таблиця 1 - Ослаблення випромінювання в діапазоні 0,85 мкм 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

У перших АЛЗ використовувався гелій-неоновий лазер з довжиною хвилі випромінювання 0,63 мкм і потужністю декілька десятків міліват. Амплітудна модуляція здійснювалася модулятором на базі ефекту Погкельса, а фотоприймачем служив фотоперемножувач.

Поширення лазерного випромінювання в атмосфері супроводжується цілою низкою явищ лінійної і нелінійної взаємодії світла із середовищем. При цьому жодне з цих явищ не спостерігається окремо. За суто якісними ознаками зазначені явища можна поділити 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, у край нерівномірним за частотою. Воно максимальне на резонансних частотах молекул повітря, води, вуглекислого газу, озону й інших компонентів атмосфери [6].

Таким чином, передача даних за допомогою лазерного променя через атмосферу на сьогодні вже забезпечує передачу великих обсягів інформації з високою надійністю на відстанях в одиниць кілометрів у земних умовах, а у космічному просторі на десятки тисяч кілометрів, проте методи та програмно-апаратні засоби передачі потребують суттєвого вдосконалення.

РОЗДІЛ 2 РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В АТМОСФЕРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Розповсюдження лазерного випромінювання в атмосфері може бути складним процесом, оскільки воно взаємодіє з різними складовими атмосферного середовища. Основні фактори, що впливають на розповсюдження лазерного променя, наступні.

Розсіювання: Атмосферне розсіювання та інші типи розсіювання, які залежать від довжини хвилі світла та фізичних властивостей часток в атмосфері (наприклад, аерозолі, туман, дим і т.д.). Це може впливати на те, як далеко та як швидко розповсюджується лазерне випромінювання.

Поглинання: Деякі складові атмосфери, такі як водяна пара, кисень та інші гази, можуть поглинати світло на певних довжинах хвиль. Це може відбуватися в різних шарах атмосфери та може призводити до зменшення інтенсивності лазерного променя.

Атмосферна турбулентність: Турбулентність в атмосфері може призводити до розповсюдження лазерного променя, змінюючи його напрямок та інтенсивність через зміну індексу заломлення в повітрі.

Атмосферні явища: Явища, такі як дим, туман, хмари та інші, можуть впливати на розповсюдження лазерного випромінювання, змінюючи його напрямок та інтенсивність.

Ефективна дальність: Ефективна дальність лазерного випромінювання в атмосфері залежить від потужності лазера, довжини хвилі, стану атмосфери (наприклад, температура, вологість, тиск), а також від відстані між джерелом і приймачем.

Розповсюдження в різних шарах атмосфери: Лазерне випромінювання може взаємодіяти з різними шарами атмосфери, такими як тропосфера, стратосфера, мезосфера та термосфера. В кожному з цих шарів відбуваються унікальні процеси, що впливають на розповсюдження променя.

Атмосферна абсорбція та дисперсія: Деякі ділянки спектру лазерного випромінювання можуть бути абсорбовані атмосферою, що призводить до

втрати інтенсивності променя на цій ділянці. Деякі інші ділянки можуть розсіюватися або розсіюватися атмосферою, змінюючи напрямок руху променя.

Різноманітність джерел та приймачів: Розповсюдження лазерного випромінювання може відбуватися між різними джерелами та приймачами, що розташовані на різних висотах, а також на різних відстанях один від одного.

Вивчення цих факторів допомагає вдосконалити системи лазерного зв'язку, лідарів, систем навігації та інших застосувань, які використовують лазерне випромінювання в атмосферному середовищі. Важливою є інженерна оптимізація цих систем для забезпечення найкращої продуктивності в різних умовах. [7]

2.1 Закон Бугера-Ламберта

Закон Бугера-Ламберта, або закон поглинання світла в розчинниках, був вперше сформульований і досліджений у XIX столітті. Імена Бугера та Ламберта пов'язані з першими дослідженнями в цій області. Французький фізик П'єр Бугер (Pierre Bouguer) вніс важливий внесок у вивчення оптики та астрономії. Його праця "Трактат з фотометрії" ("Traité d'optique sur la gradation de la lumière") вийшла в 1729 році, в якій він вперше розглянув відношення між товщиною розчинника і поглинанням світла.

Закон Бугера-Ламберта для поглинання світла в атмосфері визначає, як змінюється інтенсивність світла під час проходження через атмосферу в залежності від відстані, яку воно пройшло. Суть цього закону полягає в тому, що інтенсивність світла зменшується експоненційно зі збільшенням відстані.

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z} \quad (2.1)$$

де:

$I(z)$ - інтенсивність світла на відстані z від джерела,

I_0 - початкова інтенсивність світла (на початку променя),

α - коефіцієнт поглинання,

z - відстань від джерела.

Ця формула говорить нам, що інтенсивність світла на деякій відстані z від початкового джерела буде меншою за початкову інтенсивність. Чим більше відстань z , тим менша буде інтенсивність, оскільки вона експоненційно зменшується. Коефіцієнт α визначає, наскільки швидко відбувається це зменшення. Чим більше α тим швидше відбувається поглинання світла і тим швидше зменшується інтенсивність на великих відстанях [8].

2.2 Закон Бугера-Ламберта для розсіювання в атмосфері

Закон Бугера-Ламберта для розсіювання в атмосфері:

$$I(\theta) = I_0 \cdot e^{-\beta \cdot \theta^2} \quad (2.2)$$

де:

$I(\theta)$ - інтенсивність світла після розсіювання під кутом θ ,

β - коефіцієнт розсіювання,

θ - кут відхилення.

Потужність випромінювання P (Дж/с = Вт) визначається енергією кванта і кількістю випромінюваних фотонів N в секунду. Тому, потужність лазерного випромінювання – це загальна кількість енергії, що випромінюється в одиницю часу, і визначається з умови рівності випромінювальної потужності $P_{\text{випр}}$ і потужності втрат $P_{\text{втр}}$:

$$P_{\text{випр}} = P_{\text{втр}} \quad (2.3)$$

Щільність потужності лазерного випромінювання – це потужність, віднесена до площі S (Вт/м²), на якій сконцентровано випромінювання.

Обчислення щільності потужності дає усереднене значення, оскільки не враховується розподіл випромінювання в поперечному перерізі лазерного пучка. В даному випадку об'єднуються такі групи параметрів як енергетичні і параметри пучків. [8]

З наведених на експериментальних тривимірних графіках розподілів потужності різних мод лазерного випромінювання зрозуміло, що для конкретного застосування потрібна певна мода і щільність потужності (рис. 2.1).

Така характеристика, як енергія, використовується при вивченні та вимірі імпульсного випромінювання, для чого необхідно вимірювати тривалість імпульсу лазерного випромінювання.

Всі приймачі випромінювання поділяються на квантові (фотоелектронні помножувачі, фотодіоди) і теплові. Теплові приймачі засновані на перетворенні частини енергії падаючого випромінювання в теплову енергію, яка потім перетворюється в електричний сигнал. Перетворення відбувається за рахунок термоелектричного ефекту, зміни опору при нагріванні робочого тіла детектора (болометри), оптико-акустичного ефекту, піроелектричного ефекту і ряду іншого [9]. Термопари (термоелементи) були першими приймачами для виявлення і вимірювання інфрачервоного випромінювання. Основним елементом термопари є перехід на контакті між двома різними напівпровідниками з великим коефіцієнтом Зеєбека Θ .

Кращими елементами для приймача на основі термопари є матеріали з максимальним значенням термо-ЕРС, яка виникає через різницю температур між двома металами. Термоелектричні приймачі засновані на виникненні термо-ЕРС при нагріванні спаю двох різнорідних металів: при поглинанні випромінювання, верхній шар (спай) набуває більш високу температуру щодо нижнього шару, електрони з нагрітого спаю будуть переходити в холодний і з'явиться дифузія електронів зверху вниз. Ще одним поширеним типом теплових приймачів є піроелектричні приймачі, в основі яких лежать кристали сегнетоелектриків, в яких заряди виникають унаслідок змін температури під впливом променевої енергії. Їх дія заснована на зміні поляризації піроелектричного кристалу при зміні його температури [10]. При попаданні випромінювання 1 на поглинаюче покриття 2 (рис.4) відбувається нагрів піроелектричного матеріалу, дипольний момент змінюється, і на поверхні кристала з'являються електричні заряди 3.

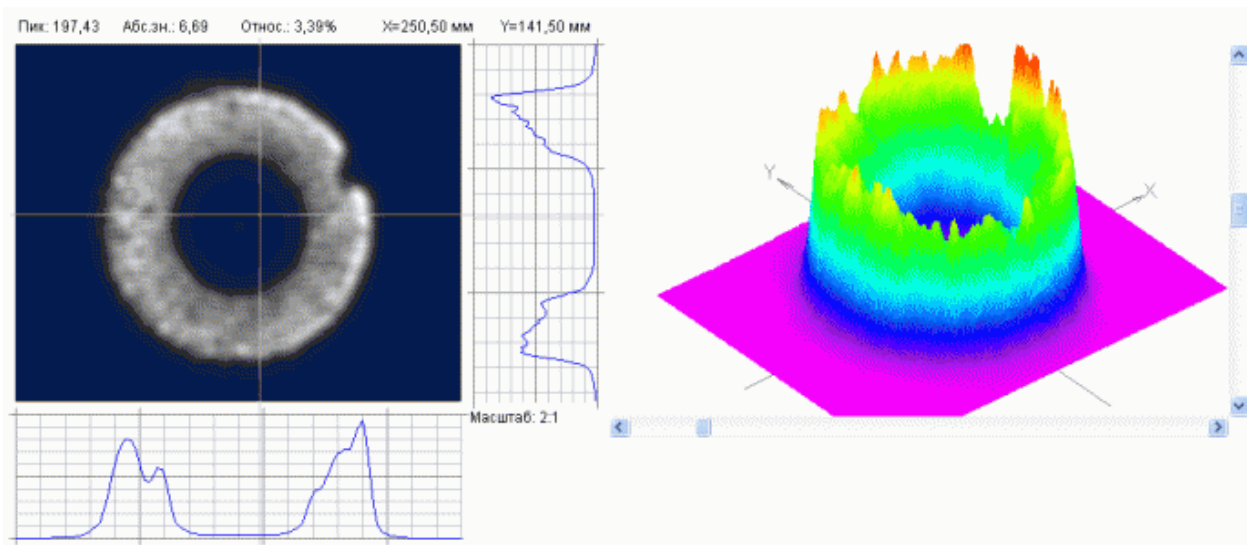
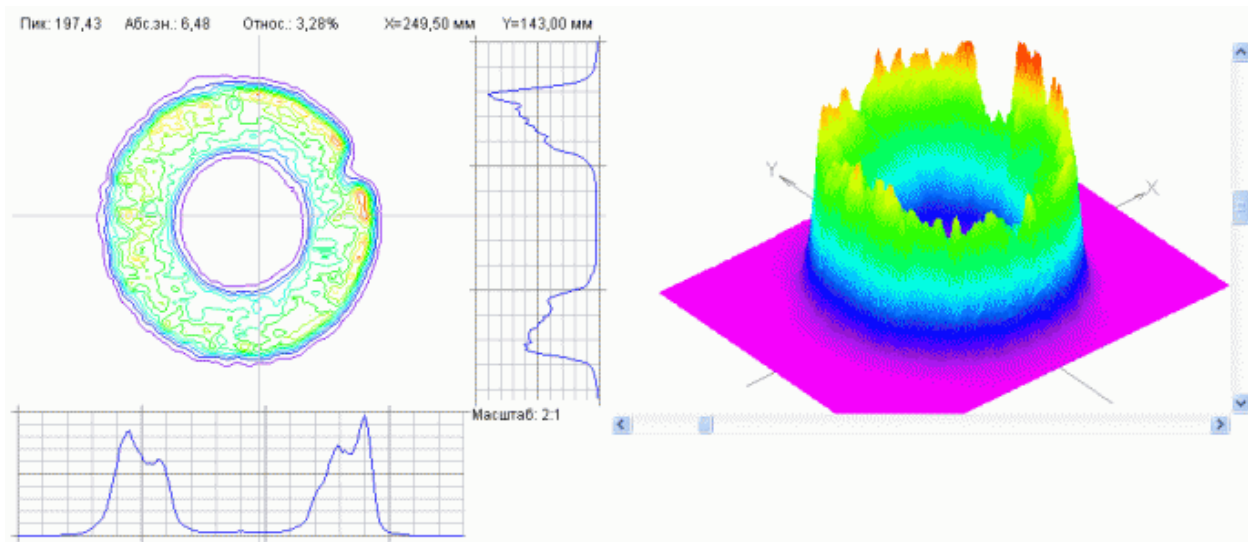
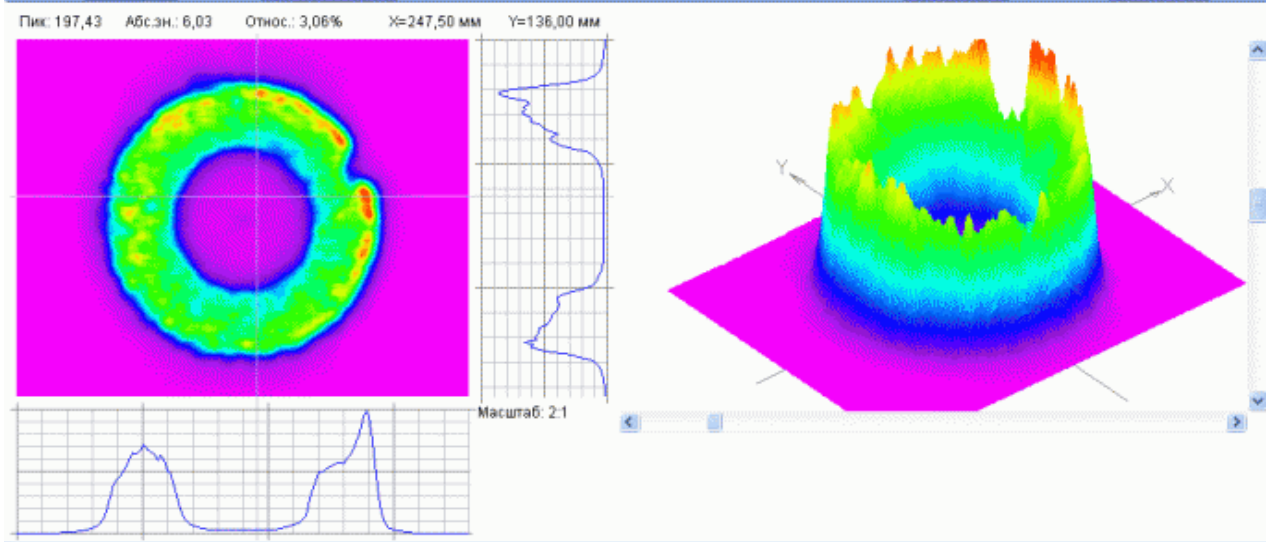


Рисунок 2.1 - Экспериментальные тривимірні графіки розподілів потужності різних мод лазерного випромінювання [4]

Ці заряди викликають в ланцюзі навантаження R_n електричний струм, напруга сигналу якого виявляється прямо пропорційною опору навантаження. Тому в піроелектричних приймачах опір навантаження вибирається не меншим, ніж 1 ГОм і використовуються диференціальні підсилювачі 4 з великим вхідним опором на польових транзисторах.

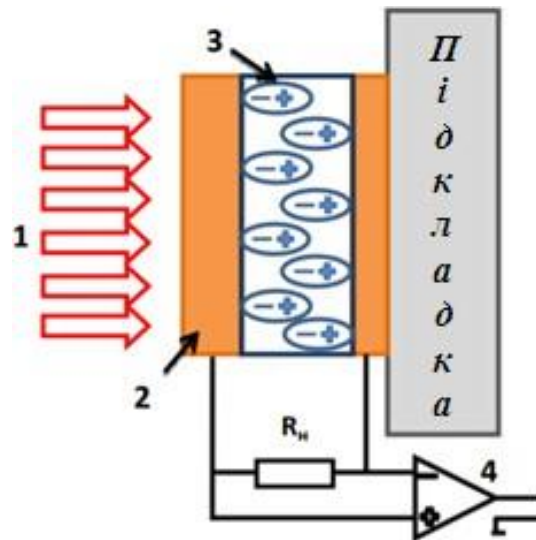


Рисунок 2.2 – Схема піроелектричного приймача [5]

Постійна часу піроелектричного приймача може досягати значення приблизно 10^{-7} с, а порогова чутливість приблизно 10^{-9} Вт/Гц^{1/2}. Для зменшення постійної часу всіх типів теплових приймачів необхідно домагатися мінімальної теплоємності робочого тіла приймача і його мінімальної теплопровідності. При роботі з тепловими приймачами доцільно застосовувати модуляцію світлового потоку. Сучасний піроелектричний вимірювач потужності, Coherent LabMax зображено на рис. 4. [11]

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ СХЕМИ ПЕРЕДАВАЧА ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ

3.1 Оптичний бездротовий зв'язок

Оптичний бездротовий зв'язок (Optical wireless communications, OWC) – форма оптичного зв'язку, в якому видиме, інфрачервоне (IR) або ультрафіолетове (UV) світло використовується для передачі сигналу без використання дротових засобів зв'язку (наприклад, коаксіальний чи оптоволоконний кабель).

Системи бездротового оптичного зв'язку, що працюють у видимому спектрі світла (390 – 750 нм) зазвичай називають комунікацією видимим світлом (Visible Light Communication, VLC), наприклад, однією із форм є Li-Fi. VLC системи використовують переваги світлодіодів (LEDs), які можуть генерувати імпульси з дуже високою швидкістю без помітного впливу на вихідне світло і людське око. VLC мають широкі можливості застосування, що включають, поміж іншими, локальні безпроводні мережі, персональні безпроводні мережі та транспортні мережі. Окрім того, наземні бездротові системи зв'язку, відомі також як FSO (Free space optical communication), працюють на довжинах хвиль близького інфрачервоного спектра (750 – 1600 нм). Такі системи зазвичай забезпечують ефективний протокол-канал зв'язку із високою швидкістю передачі даних і потенційне розв'язання проблеми останньої милі. На додачу зростає інтерес до бездротового зв'язку побудованого на ультрафіолетовому світлі (UVC) як реакція на успіхи у створенні твердотільних оптичних джерел/детекторів, що працюють в діапазоні, нечутливому до сонячного випромінювання solar-blind) ультрафіолетового спектра (200 – 280 нм). В цьому так званому глибокому ультрафіолеті (DUV), сонячне випромінювання нехтувано мале на рівні земної поверхні, що дає змогу використовувати детектори фотовідліків із приймачами широкого спектра, які дають змогу збільшити отриману на детекторі енергію з малими додатковими фоновими шумами. Використання детекторів такого типу, зокрема, може бути корисним

для зовнішніх систем зв'язку непрямої видимості для підтримки роботи UVC малих потужностей і коротких відстаней поширення (бездротові сенсори, бездротові мережі).

Першим VLC приладом вважають фотофон Белла. З того часу схема фотофону значно змінилась завдяки використанню сучасних елементів електроніки та оптоелектроніки. Наведемо приклади деяких схем різної складності та елементної бази. Наприклад, наступну схему оптичної лінії зв'язку можна з успіхом використовувати у важкодоступній місцевості, на спортивних змаганнях, у туристичних походах та ін.. Лінія зв'язку працює за принципом оптичного телефону, дальність зв'язку до 500 метрів.

Носієм інформації у ній є не радіохвилі, а промінь світла. Щоб промінь наповнити необхідними повідомленнями, його потрібно промодулювати. Робиться це так. Електричний сигнал з мікрофона подається на підсилювач низької частоти, де замість гучномовця вмикається лампа від кишенькового ліхтарика. Струм, що протікає через лампу, змінюється в залежності від сигналу, що передається, значить, змінюється яскравість лампочки. Світловий потік виявляється промодульованим напругою звукової частоти. Промінь, що спрямований у бік приймального пристрою, повинен бути добре сфокусованим, щоб він менше розсіювався. У приймачі сигнал демодулюється, тобто розшифровується. Промінь через лінзу потрапляє на світлочутливий елемент, де перетворюється на електричні коливання звукової частоти, які потім посилюються і відтворюються через навушники

Для односторонньої розмови в межах прямої видимості достатньо мати один світлопередавач та один світлоприймач. Для двостороннього зв'язку знадобиться два однакових комплекти приймачів.

Передавач оптичного телефону (рис. 3.1) працює від вугільного мікрофона $Mk1$. Напруга звукової частоти мікрофона через розділовий конденсатор $C1$ потрапляє на вхід трикаскадного підсилювача.

Транзистори підсилювача включені за схемою складеного транзистори. Такий підсилювач низької частоти дає значне посилення сигналу струму, що вкрай важливо для живлення лампи розжарювання $L1$, що є випромінюючим

елементом передавального пристрою. Напруга, що подається на лампу, за відсутності вхідного сигналу має бути 4 - 4,5 В, його величина встановлюється резисторами R2 і R6.

Деталі передавача, крім мікрофона та лампи, змонтовані на платі з фольгованого гетинаксу або текстоліту. Можна використовувати також готову монтажну плату з жорстко укріпленими на ній пелюстками або опорами з латуні. Мікрофон Мк1 підключається до підсилювача екранованим дротом.

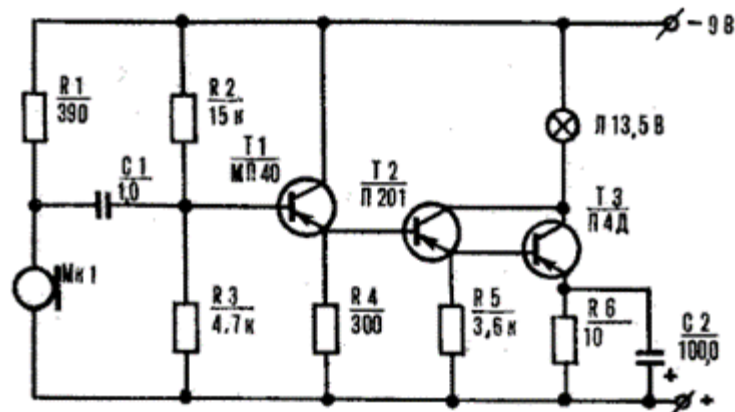


Рисунок 3.1 – Схема передавача оптичного телефону [6]

Транзистор Т1 типу МП40 чи МП41-МП42. Його статичний коефіцієнт підсилення струму може бути не більше 50 - 60. Транзистор Т2 типу П201-П203 з будь-яким літерним індексом та коефіцієнтом підсилення не менше 50. Нарешті, як транзистор Т3 можна використовувати будь-який потужний напівпровідниковий прилад, наприклад із серії П215-П217. Важливо, щоб його коефіцієнт підсилення був щонайменше 20. У передавачі працює вугільний мікрофон типу МК-10 чи МК-59. Схема приймача (рис. 3.2) дуже проста. Вона є п'ятикаскадним підсилювачем низької частоти на малопотужних транзисторах Т1-Т5, на вхід якого включений фотодіод Д1, а на вихід – телефон Тф1. Регулювання гучності сигналу, що приймається, не передбачено тільки тому, що рівень сигналу не перевищує допустимого для цього підсилювача значення. Однак якщо виникне потреба в установці такого регулятора, замінити постійний резистор R12 в колі колектора транзистора Т4 можна на змінний, до середнього виводу якого потрібно попередньо підключити конденсатор С6.

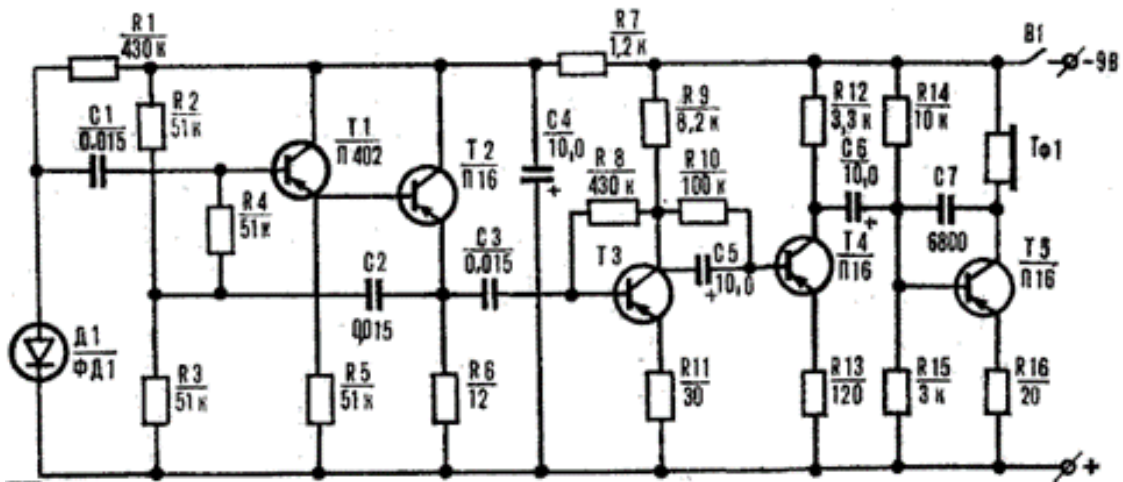


Рисунок 3.2 – Схема приймача оптичного телефону [7]

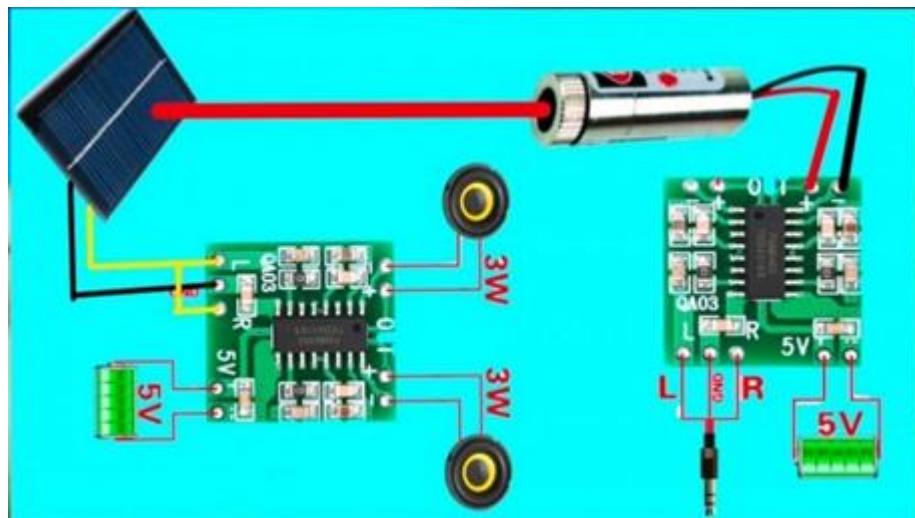


Рисунок 3.3 – Схема передачі звуку лазерним променем [8]

Лазерний промінь дуже добре модулюється звуковими коливаннями. Достатньо підключити модуль від лазерної указки до виходу низькочастотного підсилювача і у вас вийде готовий передавач звукового сигналу по світловому діапазону. Прийняти і перетворити світло на звук здатна будь-яка сонячна батарея. Навіть без підсилювача достатньо підключити до її виходу навушник і ви почуєте переданий світлом звук. Дану схему (рис. 3.3) можна розділити на дві частини: зліва приймач, праворуч передавач. Звук від смартфона надходить на підсилювач низької чистоти. Далі надходить на лазерний діод. Коливання модулюють лазерний промінь, спрямований на сонячну батарею. З неї сигнал йде на інший підсилювач. Посилюється та надходить на динамічні головки [13].

Проста схема передавача на основі транзистора:

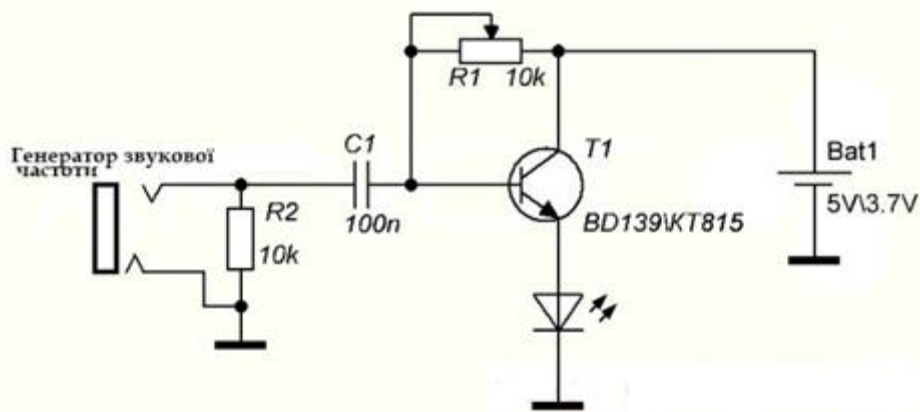


Рисунок 3.4 – Схема оптичного модулятора-передавача звуку [9]

3.2 Модуляція лазерного випромінювання для передачі звуку

Для передачі звуку слід промодулювати лазер. Найкраще для цієї мети підходить включення транзистора за схемою із загальним колектором (або емітерний повторювач). У такому включенні на діоді буде напруга із зміною амплітудою, залежно від поданої напруги на базу Т1. Також використання схеми із загальним колектором дозволить розширити діапазон напруги, який можна подавати на вхід пристрою в цілому, без спотворень форми сигналу. У ході роботи пристрою лазер буде створювати потік світла різної яскравості,

майже не помітної оком. Буде видно просто промінь. Резистор R2 ставиться для того, щоб джерело звуку було трохи навантажено. Конденсатор C1 ставиться номіналом від 100 нФ і більше. Інакше буде дуже помітний зріз низьких частот. Живлення краще здійснювати стабілізованим джерелом або батареєю [14].

Моделювання роботи оптоелектронної схеми передавача звуку (інформації) на основі LED здійснюємо в аплет-симуляторі схем за посиланням <https://falstad.com/Circuit/>.

Підключимо аудіофайл до входу модулятора замість тон-генератора. Щоб візуалізувати модуляцію, додамо до симуляції масштаби (області) для аудіовходу, напруги між колектором і емітером транзистора та вольт-амперні характеристики світлодіода.

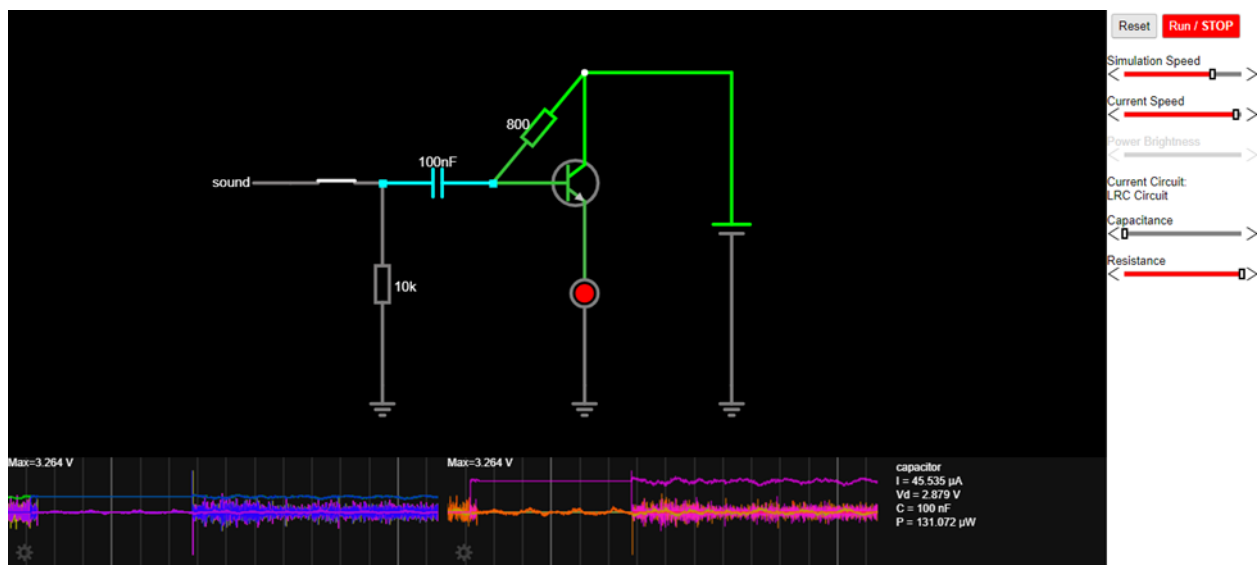


Рисунок 3.5 – Симуляція роботи схеми оптичного передавача звуку [10]

Схема передавача оптичного сигналу, простого підсилювача на 1 каскад зі спільним емітером: два резистори формують робочу точку транзистора; конденсатор глушить похибки; sound – підсилювач звуку. Користуючись осцилограмами сигналу в різних точках схеми, підбираємо значення опору змінного резистора для досягнення оптимальної модуляції (для цієї схеми – 800 Ом).

3.3 Схеми модулятора-передавача та приймача оптичного сигналу на основі фоторезисторів

Модулятор-передавач оптичного сигналу є ключовим компонентом в системах оптичного зв'язку, який перетворює електричний сигнал в оптичний і модулює його для передачі через оптичне волокно або вільний простір.

Опис роботи схеми

1. **Вхідний електричний сигнал** подається на драйвер модулятора, який підсилює і формує сигнал для подачі на модулятор.
2. **Джерело світла (лазерний діод або світлодіод)** генерує неперервний оптичний сигнал. Вибір джерела світла залежить від вимог до дальності і швидкості передачі.
3. **Модулятор** змінює параметри світлового сигналу відповідно до вхідного електричного сигналу. Прямі модулятори здійснюють модуляцію безпосередньо на лазерному діоді, а зовнішні модулятори (наприклад, ЕОМ або АОМ) змінюють оптичний сигнал після його генерації.
4. **Система стабілізації лазера** забезпечує підтримання постійних робочих умов для лазера, запобігаючи змінам у частоті або інтенсивності світлового сигналу.
5. **Оптичний передавальний блок** фокусує та спрямовує модульований світловий сигнал в оптичне волокно або інше середовище передачі, забезпечуючи мінімальні втрати та максимальну ефективність передачі сигналу [15].

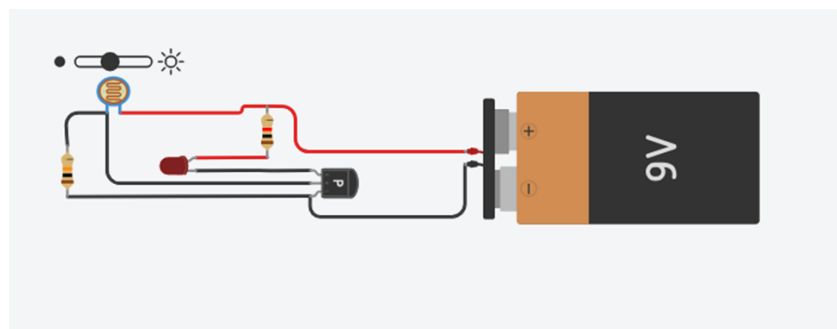


Рисунок 3.6 – Приймач оптичного сигналу [11]

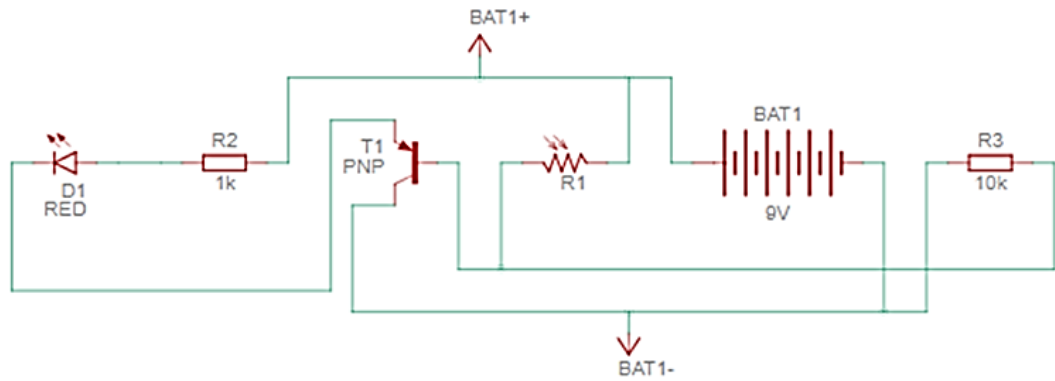


Рисунок 3.7 – Проектна схема приймача оптичного сигналу [12]

Фоторезистор (або фоточутливий резистор) – це резистор, який змінює свій опір в залежності від інтенсивності світла, яке падає на нього. Принцип роботи фоторезистора на основі фотопровідності – явища зменшення опору напівпровідника під дією світла. Коли світло падає на фоторезистор, воно збуджує електрони в напівпровіднику, які переходять із валентної зони до зони провідності. Це збільшує кількість носіїв заряду в напівпровіднику, що призводить до зменшення його опору [16].

Застосування фоторезисторів включають:

- Автоматичне регулювання освітлення: фоторезистори використовуються в системах автоматичного регулювання освітлення для забезпечення оптимального рівня світла в приміщеннях, на вулицях і в інших місцях.
- Фотосенсори для камер і фотокамер: фоторезистори використовуються для визначення рівня світла в фотоапаратах і камерах для налаштування параметрів зйомки.
- Детектори присутності: вони використовуються в системах безпеки та системах виявлення присутності для виявлення руху людей або об'єктів в приміщеннях.

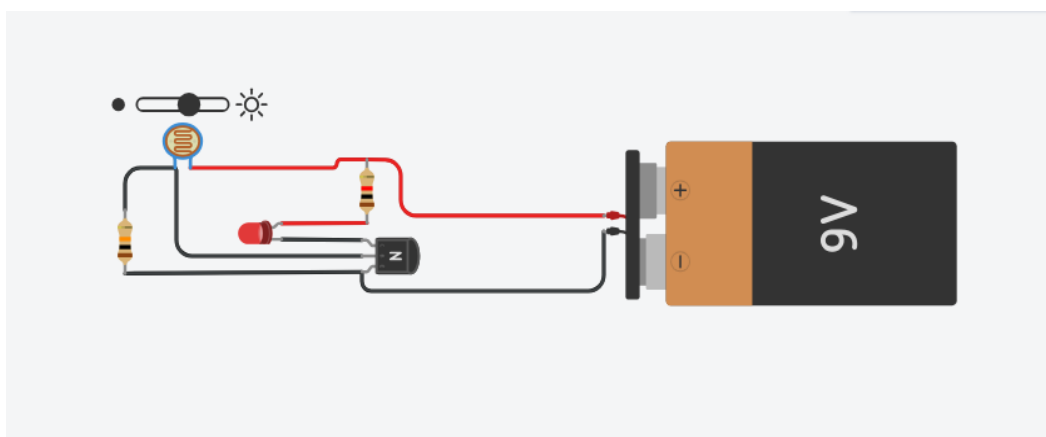


Рисунок 3.8 – Приймач оптичного сигналу на основі фоторезистора для при транзистора [13]

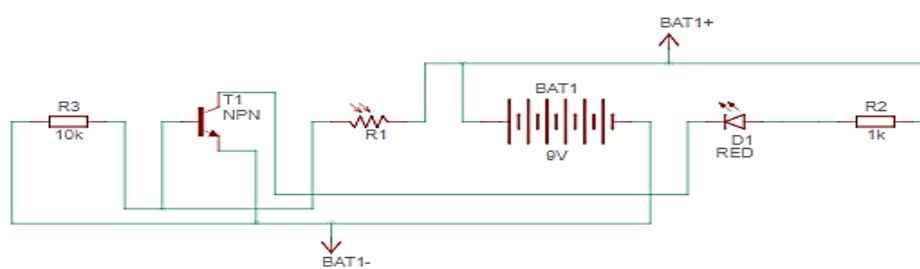


Рисунок 3.9 – Проектна електрична схема фоторезистора [14]

- Вимірювальні прилади: фоторезистори використовуються у вимірювальних приладах для вимірювання освітленості в наукових та індустріальних дослідженнях.

По суті, фоторезистор вже є приймачем оптичного сигналу. Приймаючи протягом певного інтервалу часу промодульоване за інтенсивністю світло, він перетворює сигнал у електричний, модулюючи його зміною своєї провідності в часі. Для ілюстрації, складаємо простий прилад, що реагує на зміну рівня освітлення фоторезистора вмиканням чи вимиканням світлодіода. Таку схему можна застосовувати, наприклад, для регулювання освітлення для забезпечення оптимального рівня світла в приміщеннях, на вулицях і в інших місцях.

Коли на фоторезистор потрапляє світло, його опір знижується. Це знижує напругу на базі транзистора, що, в свою чергу, збільшує базовий струм транзистора. Збільшений базовий струм відкриває транзистор, дозволяючи струму протікати від колектора до емітера. Навантаження, підключене до колектора, активується (наприклад, світлодіод загоряється).

ВИСНОВКИ

1. У кваліфікаційній роботі бакалавра розглянуто фізичні принципи роботи оптичних систем передачі інформації через атмосферу. Їх основні переваги: велика пропускну здатність, висока приватність і безпека, менша вразливість до електромагнітних перешкод. Недоліками цих систем є: залежність від погодних умов, потреба в прямій лінії видимості, сприйнятливості до механічних пошкоджень.

2. Виокремлено атмосферні лазерні системи зв'язку як важливий елемент оптичних систем передачі інформації, що забезпечують ефективний та швидкий обмін даними. Основними чинниками, що впливають на процес розповсюдження лазерного випромінювання в атмосферному середовищі є Поглинання, Розсіювання, Атмосферна турбулентність, Атмосферні ефекти.

3. За допомогою аплет-симулятора Circuit Simulator Applet проведено моделювання роботи оптоелектронної схеми передавача оптичного сигналу на основі LED або лазерного діода. Підібрано оптимальні параметри елементів схеми: 2 – резисторів 1 – транзистора 1 – конденсатора та підсилювача звуку. В онлайн симуляторі Tinkercad проведено моделювання схем модулятора-передавача оптичного сигналу, приймача оптичного сигналу на основі фоторезистора, приймач-демодулятор оптичного сигналу на основі фотодіода.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабушка А.В. Особливості відбиття лазерного променя від водних об'єктів / А. Бабушка // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Геодезія, картографія і аерофотознімання”. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”. 2012. – Вип. 76. – С. 66–70.
2. Оптоелектронні інформаційні системи – Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020 – 9 с.
3. Телекомунікаційні системи та мережі [Електронний ресурс]: Педагог.навч.засіб для вищих навч.закладів // Под ред. ХНУР., [2011 р. –] Том 1. URL: <http://www.znanius.com/3640.html>.
4. Телекомунікаційні системи та мережі [Електронний ресурс]: Педагог.навч.засіб для вищих навч.закладів // Под ред. ХНУР., [2011 р. –] Том 2. URL: <http://www.znanius.com/3640.html>.
5. П.П. Воробієнко, Л.А. Нікітюк, П.І. Резніченко Телекомунікаційні та інформаційні мережі/Під ред. САММІТ-Книга, м. Київ, 2010 – 592 с.
6. Й. Опейда, О. Швайка ; Ін-т фізико-органічної хімії та вуглехімії імені Л. М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет. — Дон. : Вебер, 2008. — 738 с.
8. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи Ч. 1. / Ю. П. Мачехін, О. С. Гнатенко – 2019. – С. 49 – 51
9. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 2. Параметри лазерного випромінювання. Харків «Факт», 2021. 145 с
10. Корнійчук В.І. Аналіз чутливості приймальних пристроїв ВОСП-СРК [Текст] / Корнійчук В.І., Барба І.Б., Дойжа Г.І. – Збірник наукових праць ОНАЗ ім. О.С. Попова. – № 2 / 2010.
11. “Передавальні та приймальні пристрої” [Текст]: метод. вказівки до проведення практичних занять для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» спеціалізацій «Інформаційно-комунікаційні

технології», / Г.Л.Авдєєнко, О.Ф. Цуканов. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 116 с.

12. Шуайбов О.К., Опачко І.І., Качер І.Е., Чучман М.П. Лазерні джерела випромінювання та їх застосування в мікроелектроніці. Навчальний посібник. – Ужгород: УжНУ, 2010. – 238 с.

13. Бобицький Я.В., Матвіїшин Г.Л. Лазерні технології: навчальний посібник. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2015. – 320 с.

14. Колесник Ю.І., Кіпенський Ю.І. Елементи та пристрої квантової електроніки: навч. посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – 318 с.

15. Olesen H., Osmudsen J.H., Tromberg B. Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser // IEEE J. – 1986.- V. QE-22, No 6. – P.762-771.

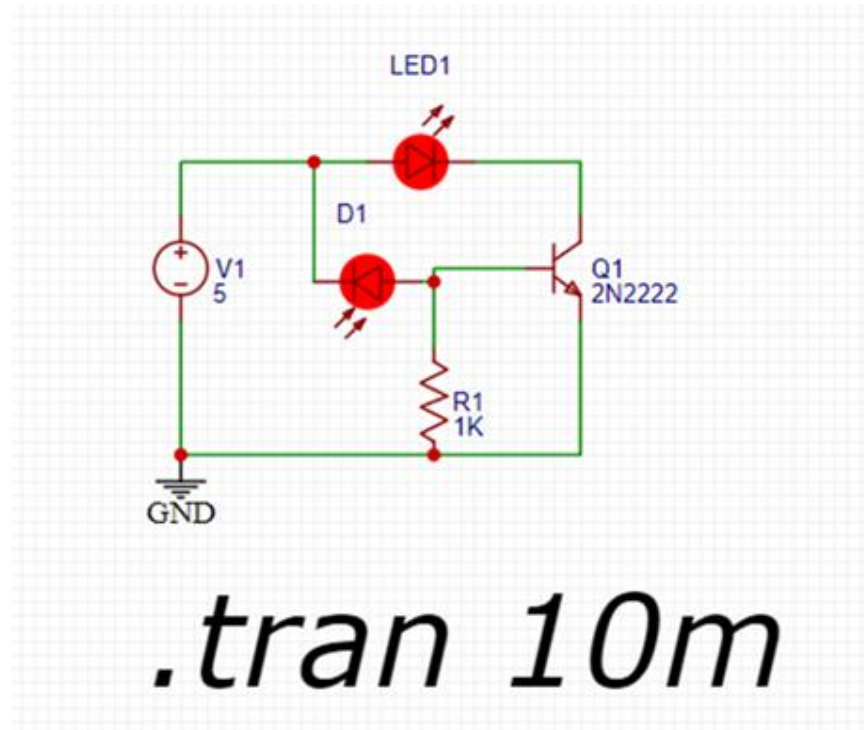
16. Sato H., Ohya J. Theory of spectral linewidth of external cavity semiconductor lasers // IEEE J. – 1986. – V. QE-22, № 7. – P.1060-1075.

17. Hjelme D.R., Mickelson A.R. On the theory of external cavity operated single-mode semiconductor lasers // IEEE J. –1987. –V. QE-23, № 6. – P.1000-1009.

18. Babich V.M., Machekhin Yu.P. Frequency stabilized lasers for the coherent optical communications// Proc. 2 International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. – Kharkiv. – 2000. – P.17-19.

19. Liang Dong, Bryce Samson. Fiber lasers: basics, technology and applications / USA: CRC Press. – 2017. – 340 p.

ДОДАТОК А
СХЕМА РОБОТИ ПРИЛАДУ



Проектна електрична схема приймача демодулятора оптичного сигналу
на основі фотодіода