

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ВІДКРИТІ СИСТЕМИ ОПТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

(тема)

Виконав:

здобувач 2 курсу, групи ЛОЕТм-23-1
Богданов В.С.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології

(код і повна назва спеціальності)

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

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

Керівник проф. каф. ФОЕТ Курський Ю.С.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Гнатенко О.С.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Богданову Віталію Сергійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Відкриті системи оптичного керування _____

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

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

3. Вихідні дані до роботи _____

Відкритий канал оптичного зв'язку; системи оптичного зв'язку; довжини хвиль:

$\lambda \sim 850$ нм, $\lambda \sim 1550$ нм, $\lambda \sim 650$ нм.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Проаналізувати фізико-математичні основи розповсюдження оптичного сигналу у середовищі.

2 Дослідити принципи створення оптичних систем зв'язку та керування.

3 Дослідити перспективні технології оптичних систем зв'язку та керування.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 9 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про відкриті канали зв'язку, квантову криптографію та їх характеристики	02.09.24–30.09.24	Виконано
2	Дослідження відкритих каналів зв'язку та квантової криптографії	04.10.24–25.10.24	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик відкритих каналів зв'язку та квантової криптографії	01.11.24–21.11.24	Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів відкритих каналів зв'язку та квантової криптографії	02.12.24–20.12.24	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	23.12.24–03.01.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	05.01.25–12.01.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	13.01.25–19.01.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	20.01.25–23.01.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	24.01.25–28.01.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2024 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. каф. ФОЕТ Курський Ю.С.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 58 с., 21 рис., 1 додаток, 15 джерел.

ОПТИЧНИЙ ЗВ'ЯЗОК У ВІЛЬНОМУ ПРОСТОРІ, ОПТИЧНІ БЕЗДРОТОВІ МЕРЕЖІ, ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ ТА КЕРУВАННЯ, РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ, СИСТЕМИ КВАНТОВОЇ КРИПТОГРАФІЇ.

Об'єкт дослідження – процеси розповсюдження оптичного сигналу, принципи створення та технології розвитку оптичних систем зв'язку та керування.

Мета роботи – дослідження фізико-математичних основ та перспектив розвитку оптичних систем зв'язку та керування.

Метод дослідження – аналітичний, заснований на теоретичному аналізі літературних джерел та прикладів.

Для досягнення цієї мети у роботі мають бути вирішені такі завдання:

1. Проаналізувати фізико-математичні основи розповсюдження оптичного сигналу у середовищі.
2. Дослідити принципи створення оптичних систем зв'язку та керування.
3. Дослідити перспективні технології оптичних систем зв'язку та керування.

У роботі розглядаються загальні аспекти створення та функціонування оптичних систем зв'язку та керування, зокрема, їх фізико-математичні основи. Досліджено процеси розповсюдження оптичного сигналу у середовищі, що дозволяє визначити основні принципи побудови таких систем. Особливу увагу приділено перспективним технологіям, які забезпечують підвищення ефективності та керованості оптичних систем.

ABSTRACT

Explanatory note of the attestation work: 58 pages, 21 figures, 1 applications, 15 sources.

IN FREE SPACE, OPTICAL COMMUNICATION AND CONTROL SYSTEMS, OPTICAL SIGNAL PROPAGATION, OPTICAL WIRELESS NETWORKS, OPTICAL COMMUNICATION QUANTUM CRYPTOGRAPHY SYSTEMS.

The object of research is the processes of optical signal propagation, the principles of creation and technologies for the development of optical communication and control systems.

The purpose of the work is to study the physical and mathematical foundations and prospects for the development of optical communication and control systems.

The research method is analytical, based on theoretical analysis of literary sources and examples.

To achieve this goal, the following tasks must be solved in the work:

1. Analyze the physical and mathematical foundations of optical signal propagation in the environment.
2. Investigate the principles of creating optical communication and control systems.
3. Investigate promising technologies of optical communication and control systems.

The work considers general aspects of the creation and functioning of optical communication and control systems, in particular, their physical and mathematical foundations. The processes of optical signal propagation in the environment are studied, which allows us to determine the basic principles of building such systems. Special attention is paid to promising technologies that ensure increased efficiency and controllability of optical systems.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Теоретичні основи відкритих систем оптичного зв'язку та керування	10
1.1 Оптичний зв'язок у вільному просторі	10
1.2 Приклади оптичних бездротових мереж	16
1.2.1 Оптичні бездротові супутникові мережі	16
1.2.2 Оптичні бездротові наземні мережі	17
1.2.3 Оптичні бездротові домашні мережі.....	17
1.3 Фізичні основи відкритих оптичних систем зв'язку	18
1.3.1 Розсіювання	18
1.3.2 Поглинання	20
1.3.3 Залежність від погодних умов	22
2 Технічні основи проектування відкритих систем оптичного зв'язку.....	24
2.1 Інформаційний потенціал оптичних сигналів.....	24
2.2 Теорема Шеннона	28
2.3 Технічні можливості відкритих оптичних систем зв'язку та керування	31
3 Перспективні технології відкритих систем оптичного зв'язку та керування.....	35
3.1 Оптичний зв'язок для глибокого космосу.....	35
3.2 Вільний космічний оптичний зв'язок.....	36
3.3 Важливість оптичного зв'язку у вільному просторі.....	38
3.4 Лазерний зв'язок в військових технологіях	39
4 Квантовий відкритий оптичний зв'язок	41
4.1 Квантова криптографія	41
4.2 Двопольова квантова система оптичного керування.....	41
4.3 Особливості проектування передавача	45
4.3.1 Вибір довжини хвилі та джерела для передавача.....	45
4.3.2 Оптична конфігурація передавача.....	47
4.3.3 Часова синхронізація	49

	7
4.4 Проектування приймача	50
4.4.1 Оптична схема приймача.....	50
4.4.2 Детектування одиничних фотонів.....	53
4.5 Експериментальні результати.....	54
4.5.1 Експеримент із каналом довжиною 300 метрів	54
Висновки	56
Перелік джерел посилення	57
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	59

ВСТУП

Оптоелектронні системи знаходять все більш широке застосування в самих різноманітних областях науки, техніки, промисловості, медицини, побуті тощо. Сучасний етап їх розвитку характеризується швидким вдосконаленням елементної бази, зокрема розвитком оптоелектронних мікро- та нанотехнологій [1].

Передача інформації за допомогою світлового променя не супроводжується накопиченням і розсіюванням електромагнітної енергії в лінії. Звідси впливає відсутність істотного запізнення сигналу в каналі зв'язку, висока швидкодія і мінімальний рівень спотворення інформації, що переноситься сигналом.

У відкритих системах оптичного зв'язку світловий сигнал поширюється у вільному середовищі – в атмосфері або в космічному просторі, в той час як в закритих системах – в оптичних діелектричних хвилеводах [2]. Системи оптичного зв'язку через вільний простір забезпечують низьку та середню швидкість передачі даних і працюють в межах прямої видимості, оскільки всі оточуючі об'єкти створюють перешкоди для поширення сигналу. В основному такі системи використовують для дистанційного керування побутовими приладами – телевізорами, мишками, для відкривання-закривання дверей автомобілів, а також в межах виробничого приміщення для зв'язку між терміналами, мікропроцесорами, промисловими роботами тощо. Натомість хвильоводні системи оптичного зв'язку забезпечують високу швидкість передачі даних на значні відстані.

Оптоволокно стало основою сучасних комунікаційних систем, адже воно дозволяє передавати величезні обсяги даних майже миттєво. Але швидкість і надійність передачі даних стають ще важливішими, коли йдеться про мобільні системи, такі як безпілотні дрони. Адже вони часто залежать від миттєвої комунікації для коректної роботи. Сьогодні існують навіть технології, де дрони використовують оптоволоконний зв'язок. Це дозволяє отримувати надточні

дані в режимі реального часу, наприклад, у геологічних дослідженнях або на заводах.

Дрон на оптоволокні – це frv-дрон, у якого сигнали керування, телеметрія і відео сигнал передаються за допомогою кабелю оптоволокна.

Принцип роботи дрона з оптоволоконном наступний:

1) електричний сигнал перетворюється на світловий за допомогою спеціального конвертера, проходить через оптоволоконний кабель і знову конвертується в електросигнал на приймальному кінці;

2) джерелом світла виступає мікролазер або світлодіод, а кодування здійснюється через зміну інтенсивності світла;

3) дрон виглядає «прив'язаним» до пульта оператором тонкою оптоволоконною ниткою, яка поступово розкручується з котушки, прикріпленої до пристрою.

Ці frv-дрони не вразливі до системи радіоелектронної боротьби та радіоелектронної розвідки, які здатні перехоплювати або порушувати зв'язок між оператором і безпілотником.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВІДКРИТИХ СИСТЕМ ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТА КЕРУВАННЯ

1.1 Оптичний зв'язок у вільному просторі

Серед оптичних технологій, оптичний зв'язок у вільному просторі (ОЗВП) є ключовим елементом для забезпечення передачі даних у вільному просторі відповідно до вимог майбутніх технологій. Це зумовлено його економічністю, простотою розгортання, можливістю забезпечення високої пропускної здатності та високим рівнем безпеки [1].

Система ОЗВП є однією з провідних бездротових комунікаційних систем, яка викликала значний інтерес і зазнала масштабного розвитку протягом останнього десятиліття. З точки зору широкосмугових комунікаційних послуг, ОЗВП вважається відповідним кандидатом для забезпечення цих послуг кінцевим користувачам із конкретною потребою в точково-точковому з'єднанні за умови прозорого атмосферного середовища між передавачем і приймачем [3].

Порівняно з передачею по оптичному волокну, технології ОЗВП принципово схожі.

Різниця полягає в тому, що вихід ОЗВП є колімованим і передається через атмосферу, тоді як передача через оптичне волокно здійснюється за допомогою оптоволоконного кабелю. ОЗВП надає унікальну альтернативу сучасним технологіям, яка здатна задовольнити експоненційно зростаючий попит на пропускну здатність.

Найважливіше, що оптичний кабель можна замінити системами оптичного зв'язку у вільному просторі у ситуаціях, коли прокладання кабелів є неможливим або потребує високих капітальних витрат. Серед ключових переваг технології ОЗВП – великий обсяг пропускної здатності, стійкість до електромагнітних завад, відсутність необхідності у ліцензуванні спектра та вища швидкість передачі даних.

Однак передача сигналу через ОЗВП є вразливою до несприятливих погодних умов. Іншими словами, односпрямована система ОЗВП піддається впливу погодних факторів, таких як турбулентність, дощ, туман, серпанок і пил, які спричиняють загасання світлового сигналу або навіть блокують його поширення. Тому системи ОЗВП слід ретельно досліджувати з урахуванням погодних умов, щоб забезпечити достатню потужність сигналу, що надходить до приймача для подальшої обробки.

Альтернативним рішенням для мінімізації цих впливів є використання багатопробенемих систем ОЗВП у поєднанні з технологією мультиплексування за довжиною хвилі, що забезпечує ефективну та масштабовану мережу. Було проведено чимало досліджень за різних екологічних умов та їхнього відносного впливу на продуктивність систем ОЗВП.

Передача даних від передавача ОЗВП до приймача ОЗВП здійснюється за допомогою модульованого вузького оптичного лазерного променя, який переносить цифрові дані через атмосферу вільного простору від передавача до приймача, де вони зрештою обробляються. Прямая видимість означає, що передавач і приймач у двох мережевих точках можуть бачити один одного.

Оскільки інфрачервоні промені поширюються і розширюються лінійно, вимоги до прямої видимості є менш жорсткими в порівнянні з мікрохвильовими системами, які вимагають додаткового очищення шляху для врахування розширення зон Френеля. При моделюванні будь-якого каналу у вільному просторі враховується зона Френеля.

На рисунку 1.1 наведено приклади правильного та неправильного встановлення бездротових антен на вежах з урахуванням зони Френеля. Зона Френеля – це область навколо прямої лінії видимості, в яку розширюються радіохвилі після виходу з антени. Зони Френеля описуються як кругові перетини між двома бездротовими пристроями, які повинні бути вільними від будь-яких об'єктів чи перешкод, щоб уникнути погіршення якості сигналу.

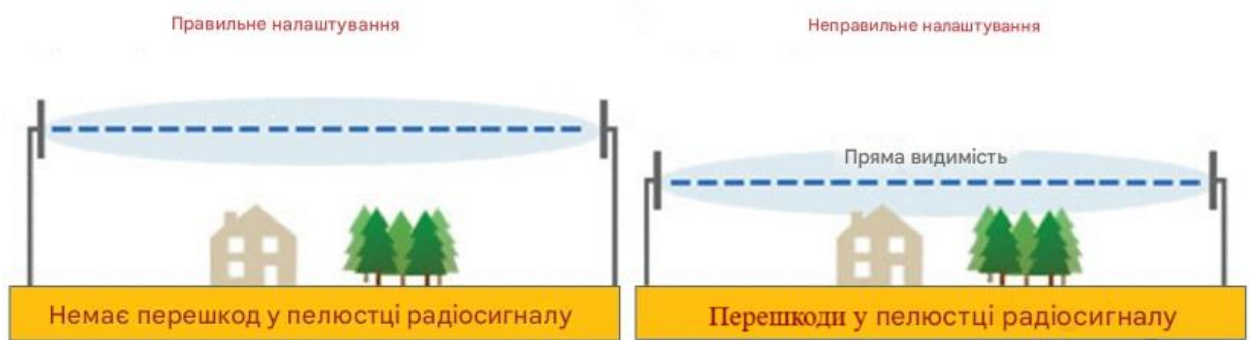


Рисунок 1.1 – Приклади правильного та неправильного встановлення бездротових антен на вежах

Як добре відомо, розмір зони Френеля пропорційний довжині хвилі сигналу. Встановлено, що чим більша довжина хвилі, тим більша зона Френеля (область, яка має бути вільною). Щоб уникнути складних розрахунків, розмір зони Френеля для сигналу з частотою 5 ГГц приймається приблизно вдвічі меншим, ніж для сигналу з частотою 2,4 ГГц, що означає, що для передачі між двома точками потрібно менше вільного простору.

Система оптичного зв'язку у вільному просторі у статичному розташуванні складається з трьох основних частин: передавача, каналу вільного простору та приймача, причому кожна з цих частин поділяється на численні компоненти, як показано на рисунку 1.2.

У передавачі електричний сигнал перетворюється в оптичний шляхом модуляції лазерного променя. Передавач включає чотири основні елементи, як показано на рисунку 1.2: модулятор лазера, драйвер, джерело оптичного лазера та передавальний телескоп.

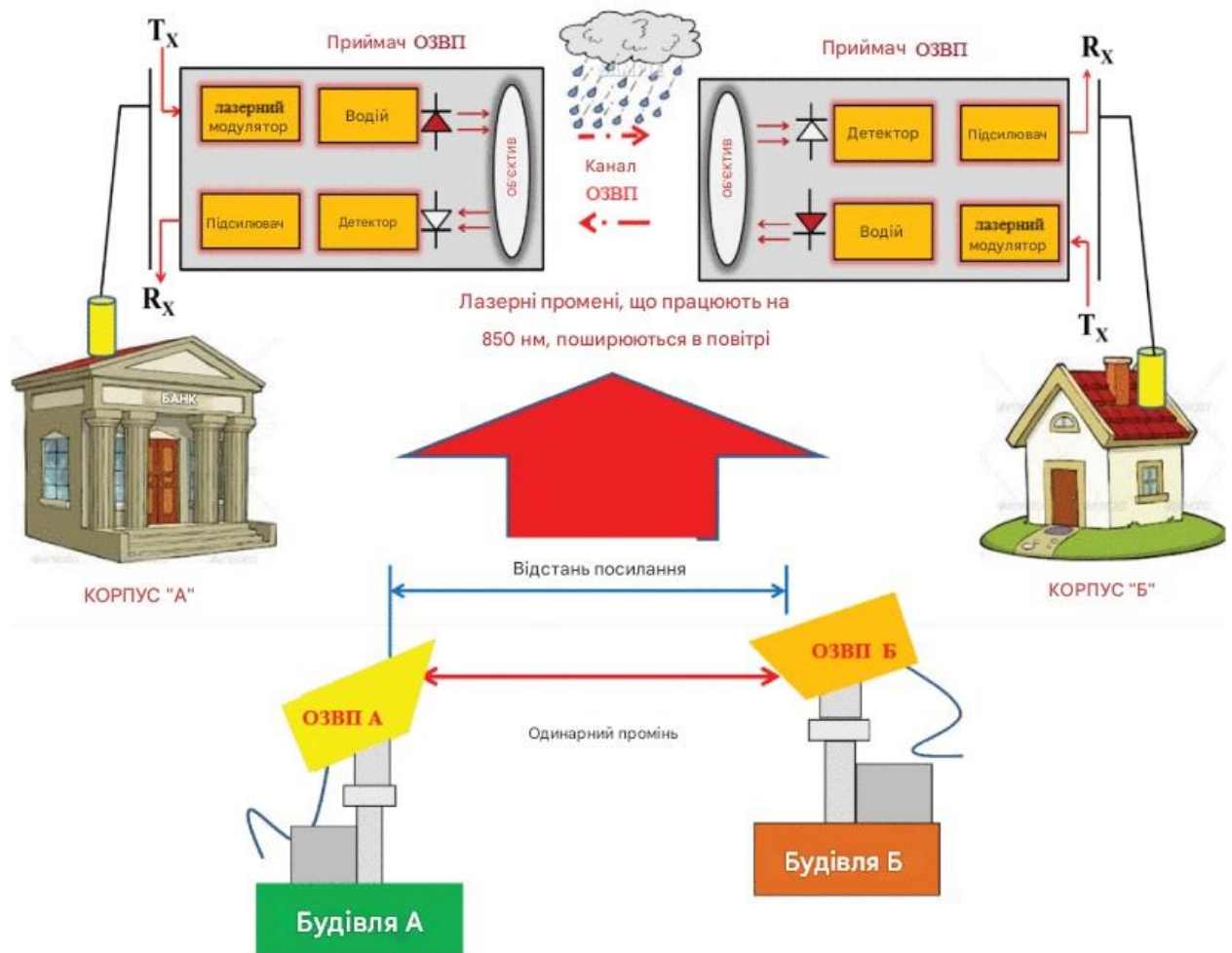


Рисунок 1.2 – Огляд односпрямованої системи оптичного зв'язку у вільному просторі в статичному розташуванні

Для модуляції використовується лазер із прямою модуляцією, який перетворює цифровий потік даних в аналоговий оптичний сигнал. Поширеними техніками модуляції є пряма модуляція та зовнішня модуляція.

Пряма модуляція відбувається в межах лазерного резонатора, і модуляція залежить від змін, внесених додатковими вхідними компонентами, що впливають на інтенсивність лазерного променя.

У випадку зовнішньої модуляції процес модуляції відбувається за межами лазерного резонатора і базується на явищах поляризації та рефрактивного дуалізму. Разом із модуляторами використовується драйверна схема, яка змінює потік струму через джерело світла.

Джерелом світла може бути лазерний діод або світлодіод, однак лазерні діоди мають перевагу завдяки таким властивостям, як когерентність, високий ступінь монохроматичності та направленість. Іншими словами, світлодіод генерує світлові хвилі із фіксованими фазовими співвідношеннями між точками електромагнітної хвилі.

Телескопічна лінза використовується для збору потоку фотонів, які надсилаються лазерним діодом, і передачі цифрових даних у канал вільного простору.

Наступна частина системи після передавача – це канал, де середовищем поширення сигналу для системи ОЗВП є атмосфера вільного простору. Це середовище складається з серії концентричних шарів газів, що оточують Землю. Існує три основні шари атмосфери у півкулі: тропосфера, стратосфера та мезосфера. Ці шари розрізняються за температурними градієнтами відповідно до висоти.

Серед цих шарів канал ОЗВП передає сигнал у межах тропосфери. Тропосфера – це регіон, де відбувається більшість атмосферних явищ, таких як фізичні перешкоди, сцинтиляція, геометричні втрати, поглинання та атмосферна турбулентність.

Після поширення сигналу через канал ОЗВП використовується оптичний приймач для отримання та обробки сигналу. Оптичний приймач складається з п'яти основних компонентів: приймального телескопа, фільтра, підсилювача, детектора та демодулятора (див. рис. 3.2) Телескоп використовується для збору та фокусування вхідного оптичного світла з каналу на фотодетектор. Великий апертурний телескоп необхідний для прийому кількох некорельованих випромінювань, подальшого усереднення та фокусування випромінювання на фотодетекторі. Усереднений сигнал потім направляється до оптичних фільтрів для видалення небажаних довжин хвиль і значного зменшення впливу сонячного випромінювання.

Детектування сигналу в фотодетекторі здійснюється за допомогою фотодіода, який є напівпровідниковим пристроєм, що перетворює фотонну

енергію світла в електричний сигнал шляхом вивільнення та прискорення носіїв струму в межах напівпровідників. Два найбільш часто використовуваних фотодіоди – це PIN-фотодіод та аваланчевий фотодіод. Вибір обмежується лише двома типами через їх високу квантову ефективність, напівпровідниковий дизайн і широке постачання з комерційних товарів.

Загалом, приймачі ОЗВП можуть бути спроектовані з підсилювачами для досягнення таких переваг:

- 1) оптичний преампліфікатор може використовуватися для підсилення сили оптичного сигналу, який ослаблений через різні атмосферні умови;
- 2) переміщення обмежень на потужність лазера, що передається, згідно з обмеженнями для очей;
- 3) придушення обмежувального ефекту теплового шуму приймача, що виникає в електронному підсилювачі, що ефективно покращує чутливість приймача.

Демодулятор спроектований відповідно до символічного набору, що використовується модулятором. Його функція полягає в тому, щоб визначити фазу отриманого сигналу та відновити символ, який вона представляє, і в процесі цього відновити оригінальні дані. Однак цей процес вимагає від приймача можливості порівняти фазу отриманого сигналу з еталонним сигналом.

Зрештою, на стороні демодулятора отриманий імпульс інтегрується протягом періоду одного біта, після чого відбувається процес дискретизації та порівняння з пороговим значенням для визначення біта «один» або «нуль». Це відоме як детектор максимальної ймовірності, який зменшує частоту помилок бітів до мінімуму.

Система ОЗВП широко використовується в сучасних комунікаційних системах, тому мережі ОЗВП стали гарячою темою для досліджень і впровадження в мережах, які можуть покривати відстань зв'язку від кількох метрів до тисяч кілометрів. Залежно від розташування оптичних передавачів і

приймачів та діапазону мережі будь-якої системи ОЗВП, мережі ОЗВП можна умовно поділити на три основні типи:

- 1) оптичні бездротові супутникові мережі (ОБСМ);
- 2) оптичні бездротові наземні мережі (ОБНМ);
- 3) оптичні бездротові домашні мережі (ОБДМ).

Не завжди легко точно описати ці мережі, оскільки різні підмережі ОЗВП інтегруються в ці основні мережі та функціонують як єдине ціле, що продемонстровано на рисунку 1.3.

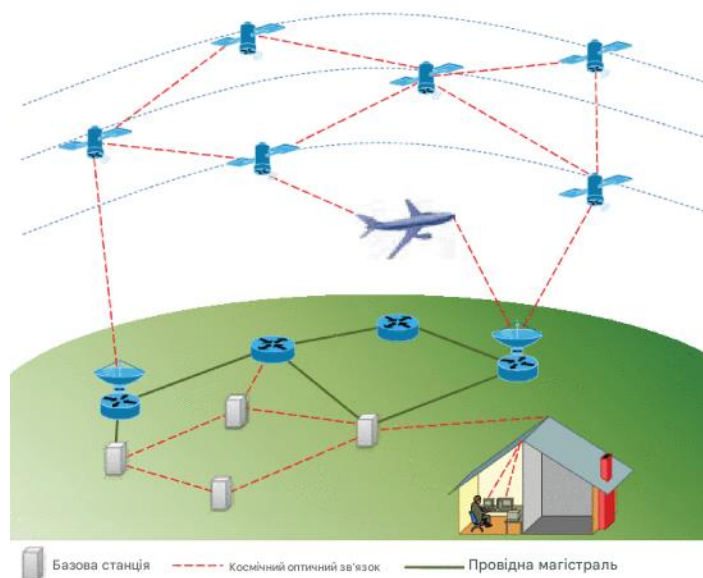


Рисунок 1.3 – Концептуальна топологія інтегрованих оптичних бездротових супутникових, наземних та домашніх мереж

1.2 Приклади оптичних бездротових мереж

1.2.1 Оптичні бездротові супутникові мережі

Оптичні бездротові супутникові мережі (ОБСМ) спроектовані таким чином, щоб надавати користувачам кінцевого доступу до високошвидкісної оптичної бездротової мережі за допомогою космічних супутників, які покривають великі території Землі. Ці мережі забезпечують глобальну космічну основну мережу з оптичними з'єднаннями, (див. рис. 3.3), оскільки

супутники можуть підтримувати будь-яких земних користувачів, незалежно від топографічних обмежень, якщо є лінія прямої видимості. Як результат, ОБСМ надають високоякісні дані навіть в ізольованих районах, таких як острови, віддалені ферми, кораблі в океані, літаки тощо.

ОБСМ складаються з різних типів оптичних з'єднань вільного простору, включаючи міжсупутникові з'єднання, супутник-до-повітря та супутник-до-землі. Міжсупутникові з'єднання призначені для маршрутизації даних через супутники з пересиланням даних крок за кроком до супутника кінцевого призначення, який має вхідні та вихідні з'єднання між літаком або наземною станцією на поверхні Землі.

1.2.2 Оптичні бездротові наземні мережі

Оптичні бездротові наземні мережі (ОБНМ), відомі як зовнішні мережі ОЗВП, встановлюють точку-точку і лінію прямої видимості для оптичного бездротового з'єднання між двома системами ОЗВП через канали атмосферної турбулентності на відкритому повітрі. Через вимогу лінії прямої видимості для системи ОЗВП, відстань, яку покриває лазерне світло, що поширюється через атмосферу, може досягати сотень метрів до десятків кілометрів. Ця модель ОЗВП для телекомунікацій має величезний потенціал для бездротових комунікацій і стає важливим засобом для доступу до широкосмугового Інтернету.

1.2.3 Оптичні бездротові домашні мережі

Оптичні бездротові домашні мережі (ОБДМ), також відомі як внутрішні мережі ОЗВП, є бажаними в будинках та офісах для бездротових широкосмугових комунікацій. ОБДМ використовуються для створення локальної мережі, що складається з осередків, де кожен осередок є однією з розподілених частин будівлі. Зазвичай кожен осередок має базову станцію,

підключену до кількох терміналів через короткострокові оптичні бездротові з'єднання, такі як інфрачервоні промені та світлодіоди. Інфрачервоні промені та світлодіоди не проникають через стіни, на відміну від радіохвиль. Кожен оптичний бездротовий осередок повинен бути обмежений кімнатою та підключений до широкосмугової інфраструктури, інтегрованої з нею. Осередок зазвичай не зазнає перешкод від сусідніх осередків. Внаслідок цього використовуються однакові параметри променя.

1.3 Фізичні основи відкритих оптичних систем зв'язку

1.3.1 Розсіювання

Коли світло проходить через будь-яке середовище, його хвильова форма спотворюється частинками цього середовища, що викликає втрату сигналу [4]. Це процес, відмінний від поглинання, оскільки енергія перерасподіляється, а не поглинається. Інтенсивність розсіювання залежить від розміру частинок, з якими світло вступає в контакт. Якщо $r < \lambda/2\pi$, розсіювання відбувається в режимі Релея; для $r \approx \lambda/2\pi$ розсіювання відбувається в режимі Мі; і якщо $r > \lambda/2\pi$, для вивчення процесу розсіювання можна використовувати геометричну оптику.

Розсіювання Релея. Коли світло потрапляє на зв'язані електрони атома або молекули, створюється диполь, який вібрує з тією ж частотою, що й падаюче світло. Потім диполь повторно випромінює падаюче світло у вигляді розсіяної хвилі. Розсіювання Релея описується рівнянням (1.1):

$$\sigma_S = \frac{f e^4 \lambda_0^4}{6\pi \epsilon_0^2 m^2 c^4 \lambda^4}, \quad (1.1)$$

де f – це сила осцилятора;

e – заряд електрона;

λ – довжина хвилі, що відповідає частоті атомного переходу $\nu = c/\lambda$;

c – швидкість світла.

Рисунок 1.4 показує, як залежність $1/\lambda^4$ означає, що тільки коротші довжини хвиль будуть зазнавати впливу розсіювання Релея, тоді як для довших ($\lambda \sim 1500$ нм) довжин хвиль цей ефект буде незначним.

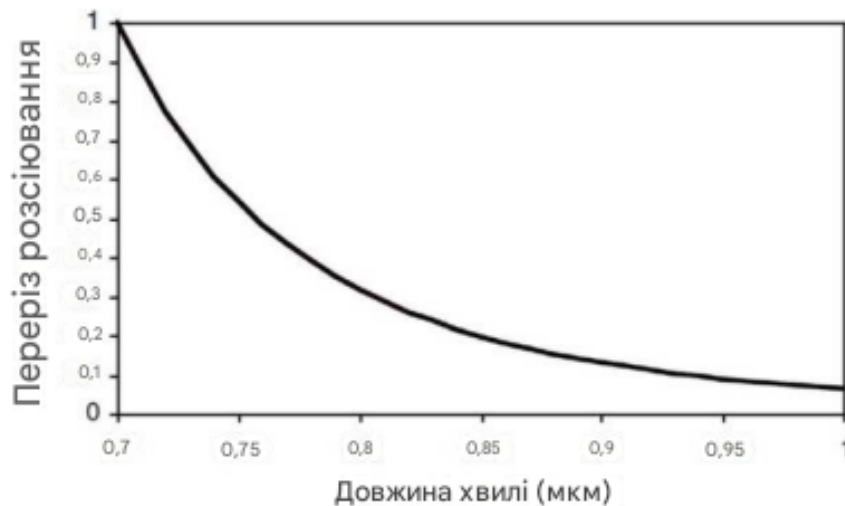


Рисунок 1.4 – Залежність перерізу розсіювання від довжини хвилі

У цьому випадку розмір молекул, які розсіюють світло, знаходиться в межах того ж масштабу, що й довжина хвилі. Тому туман, димка та аерозольні частинки є основними джерелами розсіювання в цьому режимі. Особливо важливим є туман, оскільки він може спричинити надзвичайно високу втрату сигналу. Спрощена емпірична формула наведена в такому рівнянні

$$\gamma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-\delta}, \quad (1.2)$$

де $\delta = 0,585(V)^{\frac{1}{3}}$ для $V < 6$ км;

$\delta = 1,6$ для $V > 50$ км і $\delta = 1,3$ для $V < 50$ км;

V – видимість шляху поширення.

Однак ця формула була поставлена під сумнів науковою спільнотою, оскільки вона не точно відтворює емпіричні спостереження. Більш точні чисельні симуляції точної формули розсіювання показують, що залежність від

довжини хвилі в ближньому інфрачервоному діапазоні є спочатку розрахованою, і що туман є причиною найбільших втрат передачі. Також слід зазначити, що збір емпіричних даних є складним, оскільки місце розташування, час, швидкість вітру та відносна вологість можуть впливати на розподіл аерозолів.

1.3.2 Поглинання

Коефіцієнт поглинання α абсорбуючої частинки залежить від її розміру та розподілу цих частинок уздовж шляху променя, згідно з рівнянням:

$$\alpha = \sigma N, \quad (1.3)$$

де σ – поперечний переріз;

N – концентрація абсорбуючих частинок.

Існують два основні типи абсорберів в атмосфері: молекулярні та аерозольні абсорбери, залежно від типу частинки, яка впливає на передачу променя.

Молекулярне поглинання відбувається, коли частинки променя взаємодіють з молекулами, присутніми в атмосфері, такими як N_2 , O_2 , H_2 , CO_2 , O_3 тощо. Якщо падаюча хвиля відповідає одній з резонансних частот присутніх газів, відбувається молекулярне поглинання, що призводить до утворення так званих блокуючих вікон у типовому спектрі атмосферного поглинання (рис. 1.5). У інфрачервоному діапазоні основними молекулярними абсорберами є водяна пара, вуглекислий газ і озон, при цьому найбільше впливає водяна пара на спектр ближнього інфрачервоного діапазону (до 3 мкм).

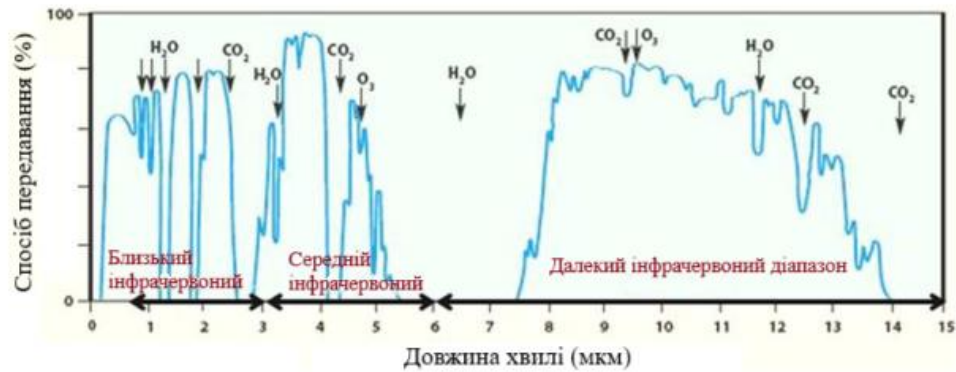


Рисунок 1.5 – Залежність атмосферного пропускання від довжини хвилі для ультрафіолетового, видимого та інфрачервоного діапазонів

Поглинання аерозолів. Аерозолі – це дрібні рідкі або тверді частинки, що знаходяться в підвішеному стані в атмосфері, розміри яких коливаються від 10^{-2} мкм до 10^2 мкм.

Їхнє походження є різноманітним і залежить від географічного розташування, наприклад, краплі води (дощ, туман, піна) разом з кристалами солі в морських районах; або антропогенні аерозолі в урбанізованих зонах, такі як сульфати від вугільних електростанцій або чорний та органічний вуглець від викидів транспортних засобів.

Концентрація аерозолів також залежить від часу доби та метеорологічних умов і по-різному впливає на атмосферну передачу в залежності від їхньої концентрації, розміру та хімії. Це дає підстави для використання терміна «видимість», який визначає лінію видимості оптичного зв'язку. Рисунок 1.6 показує атмосферну передачу в залежності від місця розташування та видимості зв'язку.

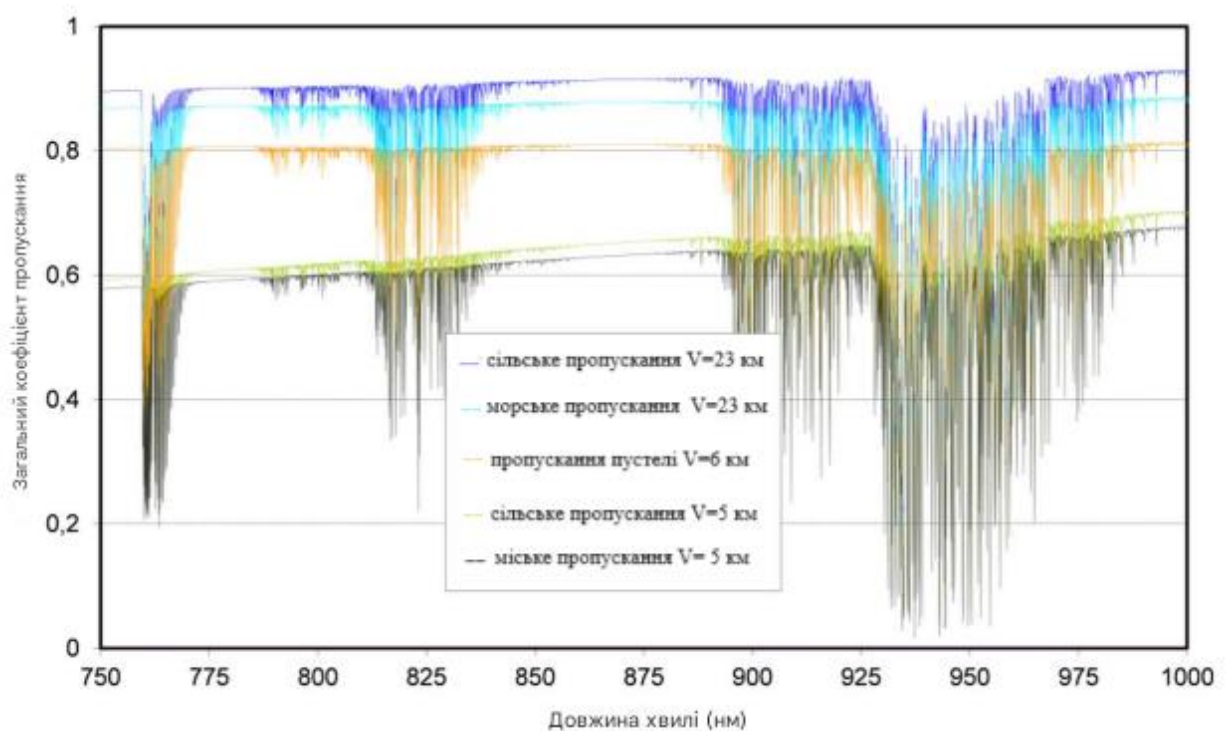


Рисунок 1.6 – Атмосферна передача на шляху 1 км, на висоті 1 м для кількох місць і діапазонів видимості

1.3.3 Залежність від погодних умов

Погодні умови та видимість сильно впливають на атмосферну передачу. У разі слабкого або помірного дощу діаметр крапель дощу коливається в діапазоні від 200 мкм до 2000 мкм, що значно більше за довжини хвиль, які використовуються в оптичному зв'язку вільного простору (ОЗВП), тому атмосферна передача не зазнає значних змін, як це відбувається при сильному дощі (рис. 1.7). Снігові умови не є настільки значущими, оскільки частинки льоду зазвичай більші за краплі дощу і, відповідно, їхній вплив менший. Однак туман є погодним явищем, яке найбільше загрожує передачі ОЗВП, оскільки розміри частинок вологи схожі за розміром на довжини хвиль ближнього інфрачервоного діапазону. Термін "туман" використовується, коли видимість менша за 2000 м. Для більших відстаней видимості погодні умови зазвичай називаються «похмурими». Залежно від діапазону видимості, туман може бути

тонким (для видимості між 1,9 км і 2 км), легким (від 770 м до 1 км), помірним (500 м), густим (200 м) та дуже густим (50 м).

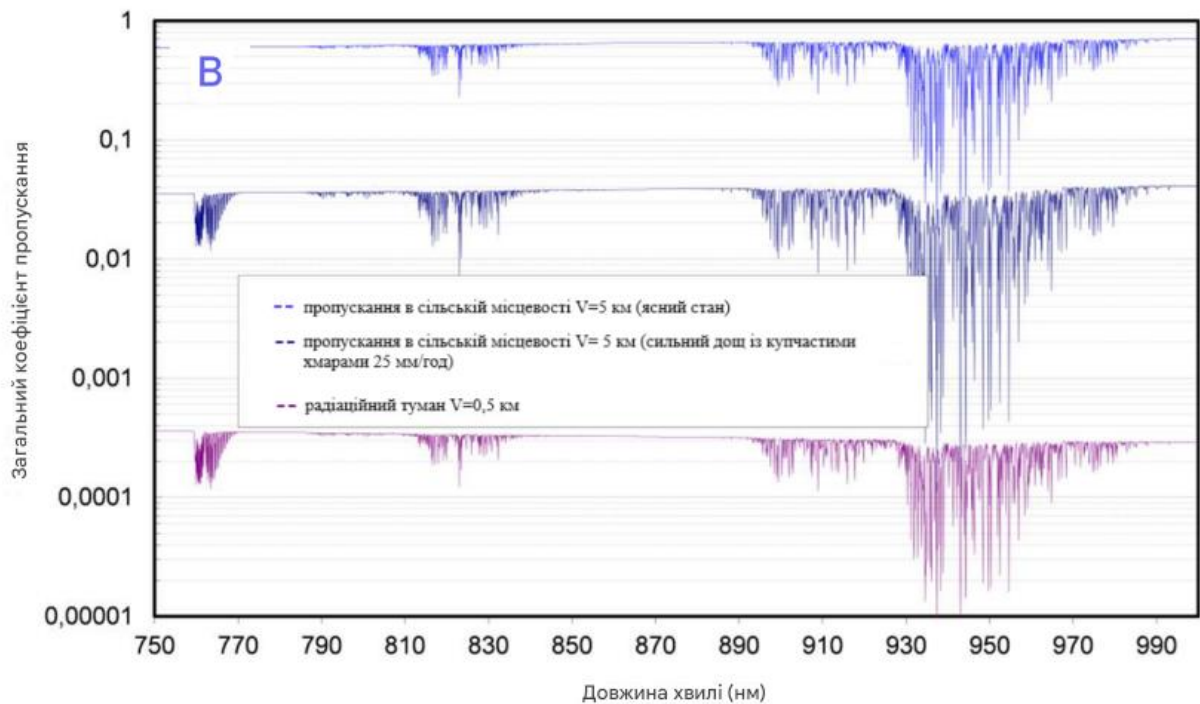


Рисунок 1.7 – Атмосферна передача на 1 км шляху, на висоті 1 м для різних погодних умов

Однак більшість цих даних отримано з вимірювань, проведених в аеропортах, які зазвичай розташовані на певній відстані від міст і часто є середніми значеннями за багато років. Тому локальні ефекти туману або вплив висоти на умови туману можуть не враховуватися, що ускладнює передбачення точного впливу туману, і є однією з найбільших проблем в оптичному зв'язку вільного простору (ОЗВП).

2 ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ ВІДКРИТИХ СИСТЕМ ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Інформаційний потенціал оптичних сигналів.

Світло має корисну властивість – різні довжини світлових хвиль не взаємодіють одна з одною – характеристика, яка використовується волоконною оптикою для передачі паралельних потоків даних. Подібним чином різні поляризації світла також не взаємодіють одна з одною. Кожну поляризацію можна використовувати як незалежний інформаційний канал, що дозволяє зберігати більше інформації в кількох каналах, значно підвищуючи щільність інформації [5].

В загальному випадку волоконно-оптична система передачі інформації – це система, що складається із пасивних та активних елементів, яка призначена для передачі інформації у оптичному діапазоні, як правило ближньому інфрачервоному.

Першим, хто запропонував використовувати скляне волокно у скляній оболонці та ввів термін “волоконна оптика” був доктор Нерайндер Капані з Королівського коледжа Лондона у 1956 році.

В 1966 році Чарльз Као та Джордж Хокхем (Великобританія) опублікували статтю про те, що оптичні волокна можуть використовуватися як середовище для передачі лазерного випромінювання при досягненні ними прозорості, що забезпечує затухання сигналу менше 20дБ/км. Вони дійшли висновку, що високий рівень затухання, властивий першим волокнам на рівні 1000 дБ/км, обумовлений вмістом домішок у склі. Саме цю дату вважають початком ери оптичного зв'язку.

В 1970 році Роберт Маурер з компанії Corning Glass (США) вперше отримав оптоволокно з затуханням меншим, аніж 20 дБ/км, а в 1972 році було налагоджено виробництва оптичного волокна з затуханням 4 дБ/км. Починаючи з цього часу, подальша розробка як активних (лазерних діодів,

фотодіодів), так і пасивних елементів системи оптичного зв'язку набуває бурхливого розвитку.

Виділяють 5 поколінь волоконно-оптичних ліній зв'язку:

1) перше покоління (1977 – 1980 р.р.) – використовувався діапазон довжин хвиль від 0,8 мкм до 0,9 мкм, цифрові потоки оброблялись зі швидкістю 45 Мбіт/с;

2) друге покоління (1980 – 1983 р.р.) – використовувалась довжина хвилі 1,31 мкм, цифрові потоки оброблялись зі швидкістю 500 Мбіт/с;

3) третє покоління (1983 – 1990 р.р.) – використовувались довжини хвиль 1,31 та 1,55 мкм, цифрові потоки оброблялись зі швидкістю 2 Гбіт/с;

4) четверте покоління (1989 – 1994 р.р.) – використовувалась довжина хвилі 1,55 мкм, цифрові потоки оброблялись зі швидкістю 10 Гбіт/с;

5) п'яте покоління (з 1994 р.) – використовують діапазон довжин хвиль від 1,55 мкм до 1,63 мкм, цифрові потоки обробляються в багатоканальних волоконно-оптичних лініях зв'язку зі швидкістю до 1 – 10 Тбіт/с. Однак роботи по підвищенню швидкості продовжуються.

Військові були першими, хто почав впроваджувати волоконно-оптичні лінії зв'язку. Так, в 1976 році на військовому літаку А-7 Corsair II (США) кабельне оснащення було замінено на оптоволоконне. В результаті кабельна система з 302 мідних кабелів сумарною протяжністю 1260 м та масою 40 кг була замінена на оптоволоконну систему з 12 волокон сумарною протяжністю 76 м та масою 1,7 кг.

Оптичні системи – це інфраструктура та обладнання, які використовують світлові хвилі (зазвичай у вигляді лазерних або світловодних технологій) для передачі інформації, керування і точного вимірювання [6]. Їх основна функція полягає у використанні світла як носія для надзвичайно швидкої і високоточності передачі даних. Оптичні системи забезпечують основи для оптичного зв'язку, дистанційного керування і контролю різноманітних пристроїв та систем.

Основні складові оптичних систем:

а) оптичні волокна: тонкі скляні або пластикові нитки, які можуть передавати світло на великі відстані з мінімальними втратами, що робить їх ключовими для зв'язку;

б) лазери: джерела світла з дуже вузьким діапазоном частот, що дозволяє високоточну передачу даних;

в) фотодетектори: пристрої, які перетворюють світлові сигнали на електричні, дозволяючи системі приймати та інтерпретувати інформацію;

г) комутатори і мультиплексори: використовуються для маршрутизації світлових сигналів і розподілу їх між каналами, забезпечуючи швидкий обмін даними.

Важливість оптичних систем керування:

– висока пропускна здатність: оптичні системи дозволяють передавати значні обсяги даних на високих швидкостях, що особливо важливо для великих дата-центрів, міжміських та міжнародних мереж зв'язку, де інші технології не можуть забезпечити потрібної пропускної здатності;

– енергоефективність: оптичні мережі, завдяки властивостям світлових сигналів, потребують значно менше енергії для передавання даних порівняно з традиційними електричними мережами. Це є важливим аспектом для екологічно сталого розвитку технологій;

– зменшення затримок: оптичні мережі знижують затримки під час передавання інформації, що критично для додатків, які вимагають реального часу або мінімальних затримок, наприклад, в хмарних обчисленнях та інтернеті речей (IoT);

– гнучкість і адаптивність: завдяки системам керування та автоматизації оптичні мережі можуть швидко реагувати на зміни в трафіку, розподіляючи ресурси та налаштовуючи маршрути для забезпечення стабільної роботи.

Досить поширеними областями використання оптоелектронних систем є безпека та охорона, контрольно-пропускні пункти та боротьба з тероризмом. Зокрема всім відомою є система біометричного сканування – відбитки пальців,

сканування райдужної оболонки ока чи сітківки, геометрії обличчя тощо. Так, в основі тривимірного сканування обличчя лежить принцип унікальності кожного обличчя, обумовленого особливостями черепа. Тривимірний сканер складається з джерела інфрачервоної підсвітки та високороздільної камери, що працює в тому ж діапазоні. За допомогою підсвітки на обличчя людини проектується невидима для людського ока світлова сітка. Камера здійснює захоплення зображення інфрачервоної маски, накладеної на обличчя, що відбиває індивідуальні геометричні характеристики. Далі зчитувач виконує розрахунок 3D-геометрії обличчя по більш ніж 40 000 точкам отриманої маски та формує математичний образ – шаблон, що містить дані про унікальні особливості обличчя. Шаблони різних людей зберігаються в базі даних. Точність шаблону настільки висока, що дає змогу розрізняти навіть близнюків.

Оптичні системи керування відіграють ключову роль у сучасних технологіях завдяки своїй здатності забезпечувати надзвичайно швидкий і надійний обмін даними, високоточну навігацію та контроль. Оптика пропонує широкий діапазон переваг, серед яких швидкість передачі, висока пропускну здатність та стійкість до зовнішніх електромагнітних впливів. Завдяки цьому такі системи набули широкого застосування в різних сферах.

1. Військові технології: у військовій галузі оптичні системи використовуються для високошвидкісного обміну даними між підрозділами, дистанційного керування дронами та іншими безпілотними апаратами, а також для забезпечення стійкого зв'язку в умовах радіоперешкод. Оптичні мережі тут також застосовуються для створення систем раннього попередження та для точного прицілювання зброї на великих відстанях.

2. Космічні технології: в умовах космосу важлива не лише швидкість, але й стійкість до радіаційних впливів, чого досягають завдяки оптичним системам. Вони використовуються для підтримки зв'язку між космічними апаратами, управління орбітальними станціями, передачі великих обсягів наукових даних з космосу на Землю, а також для точного визначення позицій

та траєкторій космічних об'єктів. Оптика тут дозволяє долати величезні відстані з мінімальними затримками.

3. Медичні технології: в медичній сфері оптичні системи забезпечують високу точність і швидкість візуалізації, зокрема в обладнанні для лазерної хірургії, ендоскопії, а також для неінвазивної діагностики. Оптичні волокна тут використовуються для передачі зображень у високій роздільній здатності, що дає лікарям детальнішу інформацію про пацієнтів і сприяє точній постановці діагнозу. Крім того, оптичні системи використовують у моніторингових пристроях для точного вимірювання життєво важливих параметрів у реальному часі.

Загалом, оптичні системи керування є основою для розвитку технологій у багатьох галузях завдяки своїй надійності, швидкості та здатності працювати в складних умовах. Їх застосування не лише підвищує ефективність і точність роботи різних систем, але й розширює можливості в тих галузях, де традиційні методи комунікації та управління неефективні або неможливі.

2.2 Теорема Шеннона

Швидкість передачі визначається як відношення обсягу I переданої інформації до часу T , за який ця інформація передається [7]:

$$C = \frac{I}{T} [\text{bit} / \text{s}]. \quad (2.1)$$

Теорема Шеннона демонструє, як швидкість передачі залежить від технічних характеристик системи зв'язку, зокрема від ширини B смуги переданих частот і від співвідношення сигнал/шум (S/N) у приймальному пристрої цієї системи:

$$C = B \log_2(1 + S / N), \quad (2.2)$$

де S/N – відношення середньоквадратичної потужності сигналу до середньоквадратичної потужності шуму на виході системи зв'язку.

Очевидно, що пропускна здатність системи зв'язку безпосередньо пропорційна ширині B смуги переданих частот.

Оптичний діапазон електромагнітного випромінювання (ЕМВ) охоплює довжини хвиль у межах від 0,01 мкм до 1000 мкм. Видимий спектр умовно визначають у діапазоні $\lambda = 0,38\text{--}0,78$ мкм (фіолетовий колір відповідає 0,41 мкм, а червоний – 0,7 мкм). Проте межі видимого спектра варіюються у різних людей і можуть змінюватися з віком. Наприклад, у дітей здатність бачити поширюється і на ближню ультрафіолетову область з $\lambda = 0,315$ мкм. Спектр сонячного випромінювання охоплює діапазон $\lambda = 0,3\text{--}1$ мкм. Видимий діапазон є найбільш придатним для зору, оскільки на коротших довжинах хвиль енергія значно зменшується через поглинання атмосферою, а на довгих хвилях зір обмежується шумами від власного теплового випромінювання об'єктів та зниженням роздільної здатності ока, як і будь-якого оптичного приладу.

У волоконно-оптичних лініях зв'язку нині використовується ближня інфрачервона область оптичного діапазону з довжинами хвиль $\lambda = 0,85\text{--}1,68$ мкм. Це зумовлено низьким рівнем поглинання електромагнітного випромінювання цього діапазону кремнієм, який є основним матеріалом для виготовлення оптичного волокна.

Освоєння оптичного діапазону електромагнітного випромінювання (ЕМВ) розпочалося у 1960 році з появою лазера – джерела когерентного оптичного випромінювання [8]. Використання оптичних сигналів для передачі та обробки інформації зумовлене такими причинами:

а) частота оптичних коливань (від 10^{13} Гц до 10^{15} Гц) на 3–5 порядків вище освоєної частоти радіодіапазону, що дозволяє в стільки ж разів розширити смугу частот, тобто інформаційну ємність каналу зв'язку і зменшити поперечні розміри ліній передач – світловодів;

б) передача інформації здійснюється електрично нейтральними фотонами, що не взаємодіють один з одним і з зовнішніми електричними і магнітними полями. Це обумовлює високу перешкодозахищеність каналу зв'язку, виключає взаємні наведення і паразитні зв'язку між його елементами;

в) висока спрямованість когерентного оптичного випромінювання дозволяє різко зменшити розміри випромінюючої апертури. Наприклад, для отримання розбіжність $2\theta_{0,5} = 0,1^\circ$ при $\lambda = 1$ см необхідний розмір $L = 5$ м, а при $\lambda = 1$ мкм, $L = 0,5$ мм;

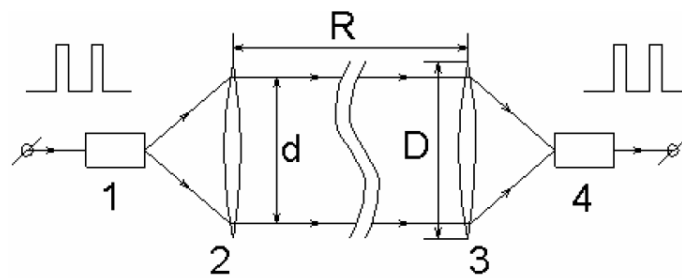
г) когерентний світловий промінь можна сфокусувати на майданчик, розміри якого можна порівняти з довжиною хвилі, що дозволяє різко підвищити щільність запису інформації (до величини 10^8 біт/см²) в оптичних запам'ятовуючих пристроях. При цьому інформація записується в двовимірному вигляді, ємність ОЗУ становить від 10^8 біт до 10^9 біт, ємність ПЗУ складає від 10^{11} біт до 10^{13} біт, швидкість введення-виведення 10^9 біт/с.

д) когерентний світловий промінь, що несе інформацію, можна обробляти за допомогою аналогових оптичних обчислювальних пристроїв, що складаються з лінз, дзеркал, дифракційних решіток та інших елементів, що дозволяють реалізувати заданий алгоритм. Зокрема, вельми швидко і точно виконуються такі операції, як інтеграція, диференціювання, згортка, множення та ін. (швидкість обробки до 10^{12} біт/с).

Волоконно-оптичні лінії зв'язку сьогодні активно розвиваються та знаходять застосування не лише в телекомунікаціях, але й у радіолокації, системах обробки інформації, приладобудуванні тощо. Нові лінії зв'язку, які проектуються та будуються, переважно є волоконно-оптичними й охоплюють як локальні, так і регіональні та магістральні мережі [9].

2.3 Технічні можливості відкритих оптичних систем зв'язку та керування

У відкритих оптичних системах зв'язку світло поширюється у вільному середовищі, наприклад, в атмосфері або космічному просторі. Принципова схема передачі сигналів у таких системах представлена на рисунку 2.1.



1 – джерело світла; 2 і 3 – об'єктиви; 4 – фотоприймач.

Рисунок 2.1 – Відкрита оптична система зв'язку

З урахуванням лише дифракційних ефектів розбіжність світла, що характеризує потужність випромінювання P_R , яка потрапляє на фотоприймач, визначається рівнянням дальності:

$$P_R \approx 0,45 P_A \tau \left(\frac{dD}{R\lambda} \right)^2, \quad (2.3)$$

де P_A – потужність випромінювача;

τ – коефіцієнт пропускання середовища;

d і D – лінійна апертура (діаметр дзеркал), відповідно, передавальної і приймальної оптичних систем;

R – відстань;

λ – довжина хвилі випромінювання.

Коефіцієнт пропускання середовища τ дорівнює:

$$\tau = e^{-aR}, \quad (2.4)$$

$$\alpha = \alpha_B + \alpha_S, \quad (2.5)$$

де α_B – коефіцієнт Бугера (коефіцієнт поглинання);

α_S – коефіцієнт розсіювання.

Закон Бугера – Ламберта – Бера – закон експоненційного зменшення інтенсивності світла в середовищі в залежності від його товщини:

$$I = I_0 e^{-\alpha_B x}, \quad (2.6)$$

де I – інтенсивність світла на глибині x матеріалу;

I_0 – інтенсивність світла на поверхні.

Коефіцієнт поглинання атмосфери значно залежить від довжини хвилі випромінювання та досягає мінімальних значень лише у кількох «вікнах прозорості», розташованих поблизу довжин хвиль від 0,4 мкм до 0,8 мкм; 1,5; 2; 3,5; 10,5 мкм.

Коефіцієнт розсіювання α_S дорівнює сумі коефіцієнтів розсіювання Релею α_{SR} та розсіювання Мі α_{SM} :

$$\alpha_S = \alpha_{SR} + \alpha_{SM}. \quad (2.7)$$

Розсіювання Релея – це процес розсіювання світла на частинках, розміри яких значно менші за довжину світлової хвилі. Його вплив найбільш виражений у діапазоні коротких довжин хвиль:

$$\alpha_{SR} = 8,83 \frac{NA^3}{\lambda^4}, \quad (2.8)$$

де A – площа поперечного перерізу частинок-розсіювачів;

N – густина розсіювачів.

Емпірична формула для коефіцієнта розсіювання M_i розсіювання на частках розмірами набагато більшими, ніж λ) має вигляд:

$$\alpha_{SM} = \frac{3,9}{\gamma} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-0,58\gamma}, \quad (2.9)$$

де γ – метеорологічна дальність видимості, км.

При $\gamma = 5$ км, $\lambda = 1$ мкм, $\alpha_{SM} = 0,43$ км; $\tau = 0,65$.

На дальність і надійність відкритих систем зв'язку в атмосфері значно впливають метеорологічні умови, такі як туман, дощ, сніг, дим, атмосферна турбулентність тощо. Додатково важливу роль відіграють точність наведення світлового променя на фотоприймальну систему та вплив фону (розсіяного випромінювання, небесних світил).

Сучасні наземні відкриті системи зв'язку з великою протяжністю, понад 10 км, зазвичай працюють у діапазоні довжин хвиль близько 10,6 мкм, використовуючи когерентне фотодетектування сигналів. З точки зору дальності зв'язку, космічні умови є більш перспективними для застосування таких систем.

У міських умовах, при дальності зв'язку близько 1 км, оптимальним для передачі сигналів є діапазон довжин хвиль від 0,8 мкм до 0,9 мкм. Застосування відкритих систем (рис. 2.2) не потребує прокладання оптичного кабелю, що значно спрощує їх впровадження. Проте через розсіювання оптичного сигналу атмосферою дальність роботи таких систем обмежується. У міських умовах вона становить до 1000 м, хоча в деяких публікаціях описуються відкриті системи з дальністю дії від 20 мкм до 30 км.



Рисунок 2.2 – Приклад відкритої оптичної системи

З ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДКРИТИХ СИСТЕМ ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТА КЕРУВАННЯ

3.1 Оптичний зв'язок для глибокого космосу

Відео з котом на прізвисько Тейтерс було надіслано з відстані майже 19 млн миль завдяки демонстрації лазерного зв'язку NASA, що стало історичною віхою (рис. 3.1) [10].

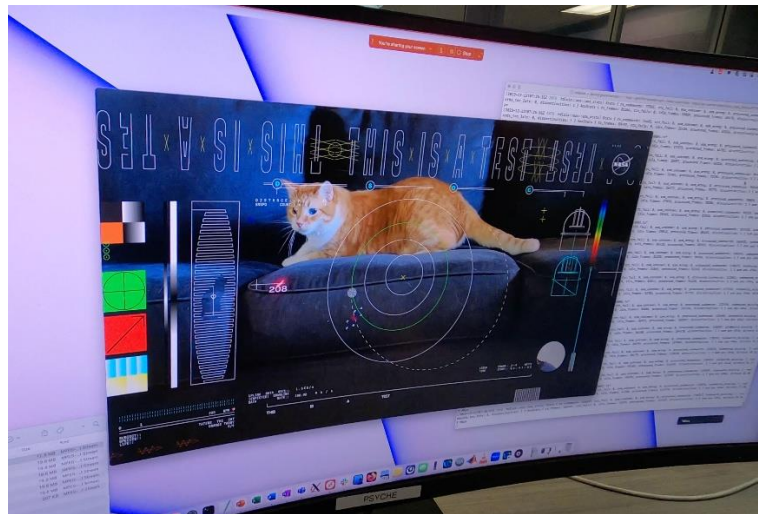


Рисунок 3.1 – Екран комп'ютера з кадром першого потокового відео високої чіткості

Експеримент NASA Deep Space Optical Communications передав потокове відео надвисокої чіткості 11 грудня з рекордної відстані 19 млн миль (31 млн км, або приблизно у 80 разів більше відстані між Землею та Місяцем). Ця віха є частиною демонстрації технології NASA, спрямованої на передачу відео та інших даних із глибоким космосом у дуже високій смузі пропускання, що дозволяє здійснювати майбутні місії людей за межі орбіти Землі.

Це досягнення підкреслює нашу відданість розвитку оптичного зв'язку як ключового елементу для задоволення наших майбутніх потреб у передачі даних. Збільшення нашої пропускної здатності має важливе значення для досягнення наших майбутніх дослідницьких і наукових цілей, і з нетерпінням

чекаємо подальшого розвитку цієї технології та трансформації способу спілкування під час майбутніх міжпланетних місій.

Демонстрація передавала 15-секундне тестове відео за допомогою ультрасучасного інструменту під назвою польотний лазерний трансивер. Відеосигналу знадобилася 101 с, щоб досягти Землі, надіслано з максимальною системною швидкістю передачі даних 267 Мбіт/с. Здатний надсилати та приймати сигнали ближнього інфрачервоного діапазону, інструмент випромінював закодований лазер ближнього інфрачервоного діапазону на телескоп Хейла в обсерваторії Паломар Каліфорнійського технологічного інституту в окрузі Сан-Дієго, штат Каліфорнія, звідки його було завантажено. Потім кожен кадр із циклічного відео надсилався «в прямому ефірі» до Лабораторії реактивного руху NASA в Південній Каліфорнії, де відео відтворювалося в реальному часі.

3.2 Вільний космічний оптичний зв'язок

Волоконно-оптичні системи забезпечують високошвидкісне цифрове з'єднання по більшій частині земної кулі [11]. Однак у деяких випадках неможливо або недоцільно прокласти волоконно-оптичний кабель. Оптичний зв'язок у вільному просторі (ОЗВП) пропонує альтернативу. Він може забезпечити високошвидкісне підключення для з'єднання повітряних, наземних і морських платформ (рис. 3.2).

QinetiQ – це компанія вчених та інженерів, які прагнуть слухати, розуміти та реагувати на потреби клієнтів. QinetiQ управляє широкими можливостями тестування та оцінки повітряних, наземних, морських і цільових систем.

QinetiQ розробляє низку можливостей, щоб допомогти військовим клієнтам вирішувати їхні майбутні виклики підключення. Спираючись на комерційно доступний QinetiQ, ми співпрацюємо з клієнтами та партнерами для розробки системи ОЗВП, придатної для військових випадків.

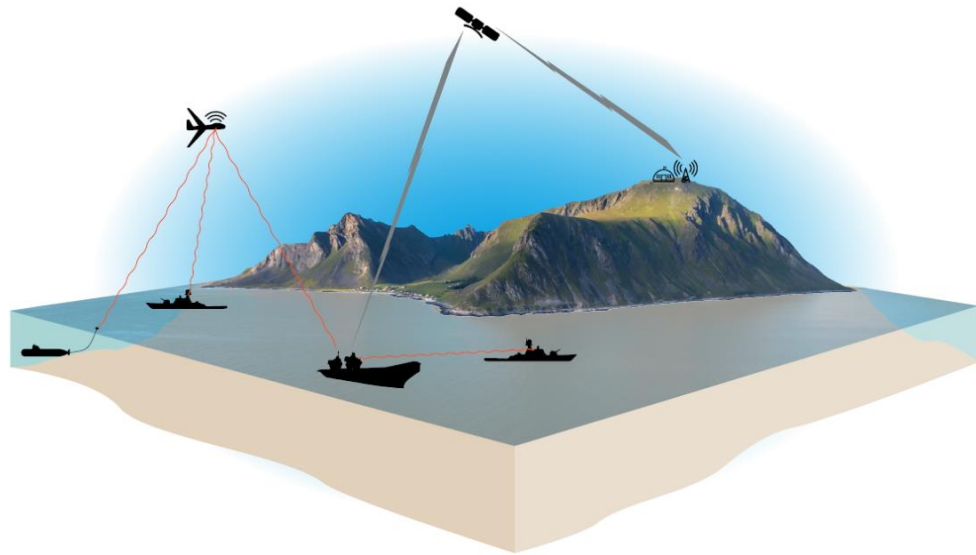


Рисунок 3.2 – Вільний космічний оптичний зв'язок

Лазерний зв'язок працює зі швидкістю, що у багато разів перевищує швидкість радіочастотних каналів зв'язку. Подібно до того, як оптоволоконний широкосмуговий зв'язок змінив наше домашнє та робоче середовище, оптичний зв'язок у вільному просторі обіцяє змінити простір військових боїв. Багато військових платформ мають радіочастотні канали передачі даних, які працюють зі швидкістю старого модему. Оптичний зв'язок — це еквівалент оптоволокна до вашого порогу, пропонуючи кілька гігабайтних каналів передачі даних. У міру того, як датчики та результуючі обсяги даних збільшуються експоненціально, ОЗВП надає масштабовані засоби для передачі даних, які забезпечать інформаційну перевагу.

Хоча це не призначено для заміни радіочастотного зв'язку, є сценарії, коли пряма та безпечна передача даних є більш доцільною, а оптичний найкраще підходить для доповнення цих радіочастотних технологій як частини загальної архітектури.

Системи радіочастотного зв'язку покладаються на широку трансляцію даних на заздалегідь визначеній частоті та їх шифрування для запобігання перехопленню. Оптичний зв'язок у вільному космосі майже неможливо перехопити чи виявити, оскільки лазерний промінь переміщується

безпосередньо від однієї платформи до іншої дуже вузьким шляхом. Перехоплення вимагатиме фізичної присутності супротивника на шляху променя – чого надзвичайно важко досягти.

У сучасних конфліктах супротивники все частіше можуть проводити точне націлювання за допомогою сигналів радіочастотного зв'язку. Завдяки використанню оптичного зв'язку загальна радіочастотна характеристика сил значно зменшується. Цей зменшений підпис значно підвищує живучість синіх сил, обмежуючи здатність супротивника перехоплювати, глушити, обманювати, пеленгувати та завдавати ударів.

Оскільки радіочастотний спектр стає все більш перевантаженим, ОЗВП пропонує альтернативу. Він не тільки пропонує більшу пропускну здатність і безпеку, але й дозволяє уникнути конфлікту спектру. На відміну від радіочастот, лазерний промінь є дуже спрямованим, і різні зв'язки не заважають один одному.

Оскільки оптичні канали передачі даних не використовують радіочастотний спектр, не тільки легше керувати спектром із союзниками, але й легше досягти взаємодії. Оскільки технологія ОЗВП за своєю суттю має низьку ймовірність виявлення або перехоплення, потреба у складному шифруванні/дешифруванні зменшується. Це означає, що залежність від національно-суверенної криптографії зменшується, а сумісність обміну даними між союзниками може бути збільшена.

3.3 Важливість оптичного зв'язку у вільному просторі

Сучасний простір бою вимагає безпрецедентного рівня пропускну здатності та зв'язку для розподілу даних, щоб забезпечити інформаційну перевагу. Вимоги до пропускну здатності та підключення є загальними для кожного з доменів повітряного, морського, наземного та космічного. Однак покладатися на радіочастотний (РЧ) зв'язок є невід'ємна проблема; сама його природа робить його вразливим для виявлення та перехоплення. У сповненому

конфлікті та перевантаженому бойовому просторі покладатися виключно на радіочастотний зв'язок дає супротивнику дуже перспективний вектор атаки; пропонуючи можливість глушити або перехоплювати критично важливі канали зв'язку або пеленгувати та вражати наші сили за допомогою кінетичних засобів (рис. 3.3).

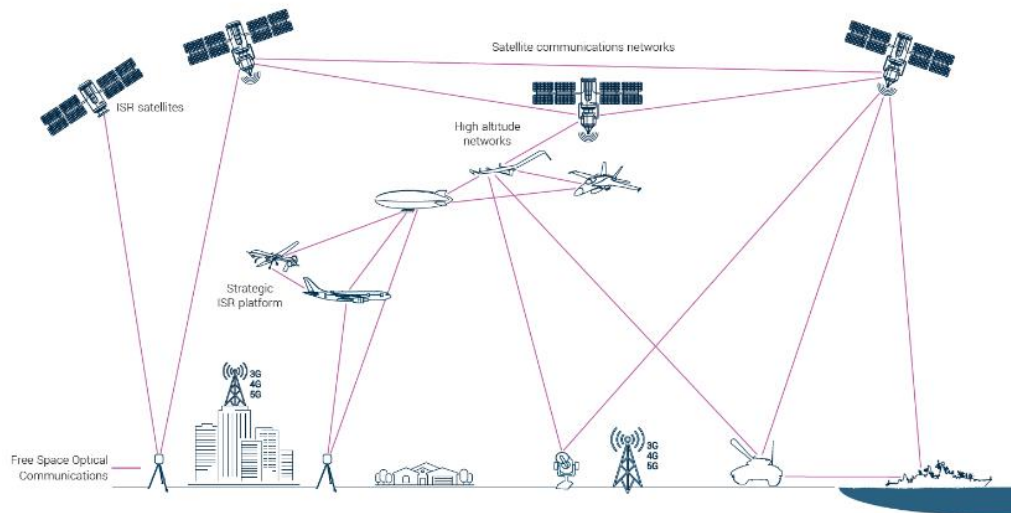


Рисунок 3.3 – Оптичний зв'язок у вільному просторі

3.4 Лазерний зв'язок в військових технологіях

Військові супутники США, виготовлені York Space Systems і SpaceX, успішно продемонстрували на низькій навколоземній орбіті лазерний зв'язок між виробниками, ознаменувавши віху для супутникової мережі наступного покоління Пентагону.

Супутники є частиною Розширеної космічної архітектури для військовослужбовців Космічних сил США, мережі, розробленої для підвищення можливостей військових комунікацій і відстеження ракет.

У демонстрації брали участь супутники з Tranche 0 Розширеної космічної архітектури для військовослужбовців, початкова фаза, що включає 27 супутників, що працюють на висоті приблизно 1000 км. Програма являє

собою перехід від традиційної залежності армії від меншої кількості більших супутників до більш розподіленої мережі менших космічних апаратів.

Денверська компанія York Space Systems оголосила 9 січня, що один із її супутників Tranche 0 Transport передав дані на супутник Tranche 0 Tracking, розроблений SpaceX, за допомогою лазерних терміналів зв'язку. Супутники використовували термінали, надані Tesat-Spacecom. SpaceX використовує термінали внутрішньої розробки для своїх комерційних супутників.

Ця демонстрація реалізує ще один важливий крок у досягненні бачення Космічного агентства розвитку щодо створення масштабованого й розширеного сузір'я супутників, розробленого кількома постачальниками відповідно до єдиного стандарту інтерфейсу, сказав генеральний директор York Дірк Валлінгер у заяві. Ані компанія, ані Космічне агентство розвитку не оприлюднили технічних деталей демонстрації.

Космічне агентство розвитку, яке контролює програму, надало стандартизований протокол терміналу оптичного зв'язку для забезпечення безперебійного обміну даними між супутниками різних виробників. Лазерний зв'язок забезпечує швидшу та безпечнішу передачу даних порівняно з традиційними радіочастотними методами.

4 КВАНТОВИЙ ВІДКРИТИЙ ОПТИЧНИЙ ЗВ'ЯЗОК

4.1 Квантова криптографія

Квантова криптографія, також відома як відкриті квантові оптичні системи оптичного керування (ВКОСОК), — це метод безпечного зв'язку, який використовує принципи квантової механіки для кодування та декодування повідомлень [12]. Ця техніка ґрунтується на унікальних властивостях квантових систем, таких як заплутаність і суперпозиція, для створення незламного ключа шифрування між двома сторонами.

Процес ВКОСОК передбачає створення спільного секретного ключа між двома сторонами, яких традиційно називають «Алісою» та «Бобом». Це досягається шляхом обміну фотонами, які є частинками світла, які виявляють квантові властивості. Фотони кодуються квантовою інформацією, такою як поляризація або фаза, і передаються через незахищений канал, наприклад оптичне волокно або вільний простір.

Будь-яка спроба перехоплювача, якого називають Євою, виміряти або перехопити фотони призведе до помилок у системі, завдяки чому її можна буде виявити. Це пов'язано з теоремою про заборону клонування, яка стверджує, що неможливо створити ідеальну копію довільного квантового стану. У результаті будь-які вимірювання або втручання в фотони порушують їх квантовий стан, вносячи помилки, які можуть виявити «Аліса» та «Боб».

Безпека ВКОСОК спирається на принципи квантової механіки, зокрема на принцип невизначеності Гейзенберга та теорему про заборону клонування. Ці принципи гарантують, що будь-яка спроба прослуховування зв'язку призведе до помилок, завдяки чому їх можна буде виявити. Це забезпечує рівень безпеки, який неможливий за допомогою класичних методів шифрування, які покладаються на складні алгоритми та великі ключі.

На практиці системи ВКОСОК використовують різноманітні техніки для кодування та декодування квантової інформації. До них належать фазова модуляція, поляризаційне кодування та протоколи на основі заплутування.

Вибір техніки залежить від конкретного застосування та вимог системи. Наприклад, деякі системи можуть надавати пріоритет високошвидкісній генерації ключів, тоді як інші можуть зосереджуватися на передачі на великі відстані.

Розвиток ВКОСОК призвів до створення комерційних продуктів і прототипів захищених мереж зв'язку. Ці системи були продемонстровані в різних польових випробуваннях і показали багатообіцяючі результати для безпечної передачі даних на великі відстані.

Основні характеристики квантової криптографії:

1) шифрування, яке неможливо зламати: Quantum Cryptography використовує квантову механіку для створення ключів шифрування, які неможливо зламати традиційними засобами;

2) безпечна передача даних: Quantum Cryptography забезпечує безпечну передачу даних без ризику перехоплення чи підслуховування;

3) квантовий розподіл ключів: використання протоколів квантового розподілу ключів дозволяє безпечно обмінюватися криптографічними ключами між сторонами;

4) безпека на майбутнє: Quantum Cryptography розроблена, щоб протистояти розвитку обчислювальної потужності та залишатися в безпеці перед обличчям нових загроз.

Переваги квантової криптографії очевидні – вона пропонує рівень безпеки, незрівнянний традиційним криптографічним методам. Оскільки кіберзагрози продовжують розвиватися та стають все більш витонченими, Quantum Cryptography пропонує перспективне рішення для захисту конфіденційних даних.

Відповідно до галузевих статистичних даних, очікується, що глобальний ринок квантової криптографії значно зросте в найближчі роки, оскільки організації все більше визнають потребу в підвищеній безпеці даних. Оскільки кіберзагрози зростають, Quantum Cryptography пропонує проактивний підхід до захисту конфіденційної інформації та пом'якшення ризиків витоку даних.

Квантова криптографія має різноманітні застосування в різних галузях, зокрема:

5) безпечний зв'язок: Quantum Cryptography забезпечує безпеку та конфіденційність каналів зв'язку, що робить його ідеальним для конфіденційних програм, таких як урядовий зв'язок, фінансові операції та військові операції;

6) квантово-безпечна криптографія: з появою квантових обчислень традиційні криптографічні методи ризикують бути скомпрометованими квантовими алгоритмами, такими як алгоритм Шора, який може розкласти великі числа експоненціально швидше, ніж класичні алгоритми. Квантова криптографія надає квантово-безпечну альтернативу, стійку до атак квантових комп'ютерів;

7) квантовий інтернет: квантова криптографія є ключовим фактором майбутнього квантового інтернету, мережевої інфраструктури, яка використовує протоколи квантового зв'язку для забезпечення безпрецедентного рівня безпеки та конфіденційності. Квантовий Інтернет обіцяє революціонізувати комунікації, забезпечивши безпечну квантову телепортацію, квантовий розподіл ключів і шифрування з квантовим покращенням.

4.2 Двопольова квантова система оптичного керування

Китайська дослідницька група розробила новий метод квантового зв'язку, спроектувавши відкриту конфігурацію двопольового відкритої квантової оптичної системи оптичного керування (ВКОСОК), що забезпечує безпечний зв'язок на відстані понад 615 км [13].

Згідно з результатами дослідження, нещодавно опублікованими в журналі Nature Communications, передача з використанням нової конфігурації вимагає лише половини кількості оптичного волокна, яке зазвичай вимагається

для звичайних закритих каналів. Це нововведення, яке є перспективним для побудови глобальної квантової мережі в країні.

Один із основних методів квантового зв'язку, ВКОСОК може безпечно обмінюватися криптографічними ключами, відомими лише між спільними сторонами.

З усіх протоколів ВКОСОК подвійне поле є найбільш життєздатним рішенням для міжміського захищеного оптоволоконного зв'язку. Користувачі зв'язку обох сторін повинні незалежно передавати власні оптичні поля, щоб зустрітися на проміжній станції для втручання в конфігурацію ВКОСОК з двома полями.

Потім результат інтерференції використовується двома користувачами для узгодження інформації, тому важливо підтримувати взаємну фазу стабільною. Однак на практиці фаза різко змінюється, спричинена різницею частот між лазерами з обох сторін і швидкими коливаннями фази довгого волокна.

Щоб вирішити цю проблему, у попередніх конфігураціях подвійного поля ВКОСОК була використана гігантська та ресурсне ефективна структура інтерферометра, що означає, що крім основного квантового волокна між двома сторонами ВКОСОК, для оптичної частоти потрібне додаткове волокно, яке називається службовим волокном. розповсюдження, сказав Юань Чжилян, головний науковий співробітник Пекінської академії квантових інформаційних наук.

Дослідницька група під керівництвом Юаня представила нову техніку, яка стабілізує відкритий канал без використання закритого інтерферометра чи службового волокна, і успішно досягла квантового зв'язку на відстані 615,6 км.

В традиційних методах для квантового зв'язку між двома об'єктами, віддаленими приблизно в 615 км, необхідні дві лінії, тоді як у новому методі достатньо однієї лінії.

У ВКОСОК з подвійним полем і відкритою конфігурацією команда застосувала технологію оптичного частотного гребінця, щоб замінити

звичайне службове волокно для калібрування частоти лазерів з обох сторін квантового зв'язку, реалізуючи точну передачу інформації.

Чжоу проілюстрував частотний гребінець як перетворення променя світла з однією частотою в кілька променів світла з різними частотами, які «розділені, як ряд зубів на гребінці».

Технологія частотної гребінки виконує додаткову функцію вирішення проблеми дрейфу волокна, яка неминуче виникає під час квантового зв'язку на великій відстані, сказав Чжоу, пояснивши, що гребінець працює, значно зменшуючи вплив шуму на квантові сигнали, таким чином забезпечуючи точність передачі інформації на великі відстані.

Команда продемонструвала результати своїх досліджень через оптичне волокно з діаметром серцевини близько 10 мікрон і довжиною 615 км, успішно завершивши міжміський квантовий зв'язок.

Двопольна система ВКОСОК з відкритою конфігурацією все ще є відносно великою, і команда зараз працює над розробкою фотонного чіпа розміром 1 квадратний сантиметр для інтеграції різних модулів пристроїв, що використовуються в системі ВКОСОК, сказав Юань.

4.3 Особливості проектування передавача

4.3.1 Вибір довжини хвилі та джерела для передавача

Вибір довжини хвилі для системи ВКОСОК у вільному просторі базується на двох основних аспектах: здатності цієї довжини хвилі проходити крізь атмосферу та ефективності її детекції на приймачі [4].

У системах ВКОСОК у вільному просторі зазвичай використовуються два спектральні вікна з високою пропускнуою здатністю, які відповідають довжинам хвиль $\lambda \sim 850$ нм та $\lambda \sim 1550$ нм. Також застосовувалася третя довжина хвилі ($\lambda \sim 650$ нм) завдяки простоті експлуатації у видимому діапазоні. Оскільки спектральні діапазони $\lambda \sim 850$ нм та $\lambda \sim 1550$ нм відповідають першому та третьому вікнам оптичного волокна, які широко

використовуються в телекомунікаційній галузі, для цих довжин хвиль легко знайти готові компоненти. У системах ВКОСОК також бажані оптичні джерела, здатні до високошвидкісної модуляції, оскільки вони дозволяють здійснювати високошвидкісну передачу ключів.

Це має особливий інтерес через неможливість оптичного підсилення квантових станів, хоча в галузі квантових ретрансляторів спостерігається значний прогрес. Щодо робочої частоти, лазерні діоди, здатні до високошвидкісної модуляції (Гбіт/с), доступні для $\lambda \sim 850$ нм та $\lambda \sim 1550$ нм, тоді як для $\lambda \sim 650$ нм вони зустрічаються рідко.

Хоча для $\lambda \sim 1550$ нм, з точки зору поглинання в міських зонах, спостерігається найменше ослаблення в повітрі (рис. 4.1), технологія детекції на основі InGaAs/InP все ще менш розвинена, ніж кремнієва, поступаючись у таких параметрах, як темнові шуми та ефективність детекції. Однак слід наголосити, що в цій галузі спостерігається значний прогрес, зокрема у підвищенні робочої частоти та досягненні тактових частот у діапазоні геггерц. Нові детектори одиничних фотонів на основі надпровідного ефекту також є перспективними кандидатами, і нещодавно для $\lambda \sim 1550$ нм досягнуто ефективності понад 90 %. Проте їх основним недоліком залишається необхідність у криогенних температурах, які зазвичай становлять діапазон від 0,1 мК до 2 К.

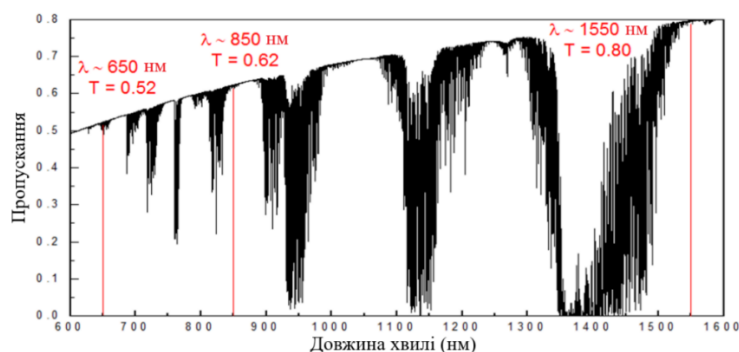


Рисунок 4.1 – Залежність атмосферного пропускання від довжини хвилі для ультрафіолетового, видимого та інфрачервоного діапазонів для міського аерозолію і видимості 5 км

пучка (BS) та ширококутовим пеліклевим роздільником пучка (PL); A_0 та A_1 – два оптичних волоконних атенюатора; C_0 , C_1 і C_3 – три волоконно-кабельні коліматори; P_0 і P_1 – два поляризатори з високим коефіцієнтом ослаблення; L_1 і L_2 – два ахроматичні подвійні лінзи, що формують вихідний телескоп передавача; M_1 і M_2 – два дзеркала з високим коефіцієнтом відбиття.

Для досягнення високих швидкостей передач «Аліса» використовує швидкісні генератори гігагерцевих імпульсних патернів у поєднанні з вертикально-резонаторними лазерами із поверхневим випромінюванням (ВРЛПВ), керованими драйверами з високою пропускну здатністю, що працюють на частотах кілька Гбіт/с. Обидва ВРЛПВ випромінюють на центральній довжині хвилі 848 нм із шириною спектральної смуги 45 пм. Драйвер кожного ВРЛПВ містить автоматичну систему контролю потужності, яка підтримує постійну оптичну вихідну потужність і забезпечує стабільність довжини хвилі при змінах температури та інших властивостей лазера.

Просторове модальне фільтрування досягається шляхом спрямування сигналу в одномодовий оптичний волоконний кабель для довжини хвилі $\lambda \sim 850$ нм, що гарантує поширення лише одного просторового режиму. Два волоконно-оптичні атенюатори зменшують середню кількість фотонів на імпульс до $\mu \sim 0,1$, забезпечуючи, лише 0,5 % випромінюваних імпульсів містять більше одного фотона. У разі використання протоколу із «хибними» станами, як зазначено, можна застосовувати більші значення μ .

Оптичний вихід із атенюаторів поляризується та колімується для формування двох поляризаційних станів, необхідних для протоколу B92. Ці стани об'єднуються за допомогою неполяризуючого кубічного світлороздільника та ширококутового пелікулярного світлороздільника і перенаправляються до телескопічного розширювача пучка Кеплера. Вихідний пучок від «Аліси» має діаметр ~ 40 мм.

Оптика «Аліси» була змонтована на системі підвісу (рис. 4.3), яка здатна генерувати рухи типу «поворот-нахил», необхідні для вирівнювання з приймачем, досягаючи високої точності ($0,00025^\circ$ для вертикальної осі та

0,001° для горизонтальної осі). Вся система була підтримана міцним штативом. Передавач також був ізольований від фону світла, яке потрапляло через дзеркала «Аліси» в детектори «Боба». Для зменшення кута огляду та зменшення фонових шумів на об'єктив «Аліси» (L_2) було встановлено чорний матеріал і довга трубка.

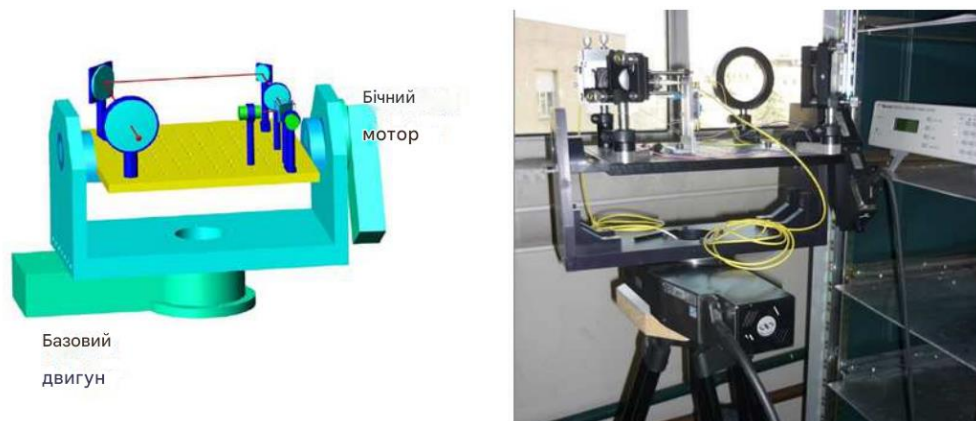


Рисунок 4.3 – 3-D модель (зліва) та фотографія (справа) платформи підвісу «Аліси»: два мотори керують вертикальними та горизонтальними рухами «Аліси» з високою точністю

4.3.3 Часова синхронізація

Синхронізація передавача та приймача досягається шляхом передачі періодичних яскравих імпульсів на іншій довжині хвилі, ніж квантові сигнали, щоб уникнути будь-яких перешкод або взаємодії між ними. Частота цього сигналу є підмножиною значення частоти годинника i , таким чином, синхронізована з квантовими сигналами, що запобігає затримкам часу між обома сигналами. Рисунок 4.4 показує схему процесу синхронізації.

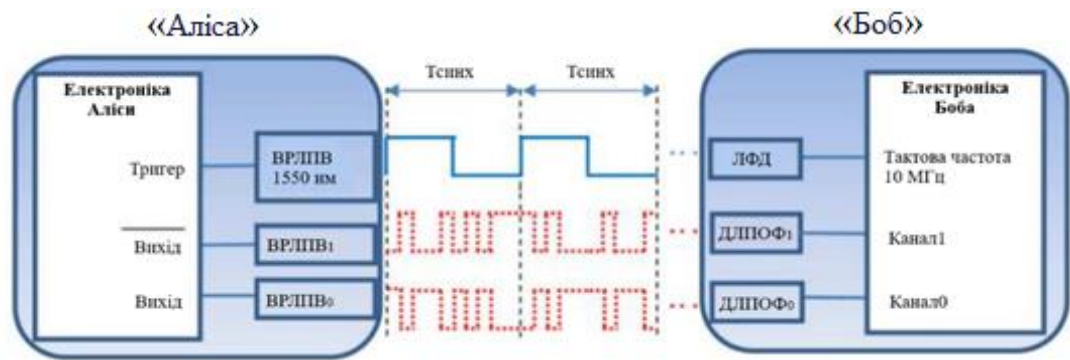


Рисунок 4.4 – Синхронізація часу між «Алісою» та «Бобом»

«Аліса» передає періодичний яскравий імпульс на 1550 нм, який синхронізований з сигналом, що несе ключ, на підперіоді $T_{\text{синх}}$ від початкової тактової частоти квантового сигналу «Аліси». Сигнал синхронізації виявляється на приймачі за допомогою лавинного фотодетектора (ЛФД) і слугує опорним тактовим сигналом для картки міток часу у «Боба». ДЛПОФ – діод лавинного посилення для одиничного фотона.

Довжина хвилі для синхронізації була обрана $\lambda \sim 1550$ нм, оскільки вона співпадає з оптичним передавальним діапазоном (рис. 3.8) і є стандартним телекомунікаційним вікном, що означає, що компоненти, доступні на ринку, легко доступні на цій довжині хвилі. Вона також знаходиться далеко від $\lambda \sim 850$ нм, що полегшує спектральну дискримінацію на приймачі.

4.4 Проектування приймача

4.4.1 Оптична схема приймача

Частка фотонів від «Аліси», що досягають приймача, збирається телескопом Schmidt-Cassegrain Meade LX200, який фокусує промінь вздовж оптичної осі, після чого він вводиться в оптичне волокно діаметром 62,5 мкм за допомогою двох ахроматичних лінз з фокусною відстанню 30 мм. Дихроїчний фільтр відбиває промінь із довжиною хвилі 1500 нм, який

надходить у оптичне волокно з діаметром осердя 200 мкм і підключається до підсиленого фотодетектора.

Цей вихід підключається до зовнішнього 10 МГц годинника аналізатора часових інтервалів для синхронізації з тимчасовою основою Аліси. Використовувався аналізатор часових інтервалів моделі GT658 від GuideTech, який забезпечує смугу пропускання 400 МГц та часову роздільну здатність 75 пс. Його завданням є реєстрація часових подій моментів прибуття фотонів із довжиною хвилі 850 нм. Час прибуття кожного каналу фіксувався за допомогою програмного забезпечення, написаного в LabView, яке забезпечувало інтерфейс із платою міток часу. Схематичне зображення «Боба» наведено на рисунку 4.5.

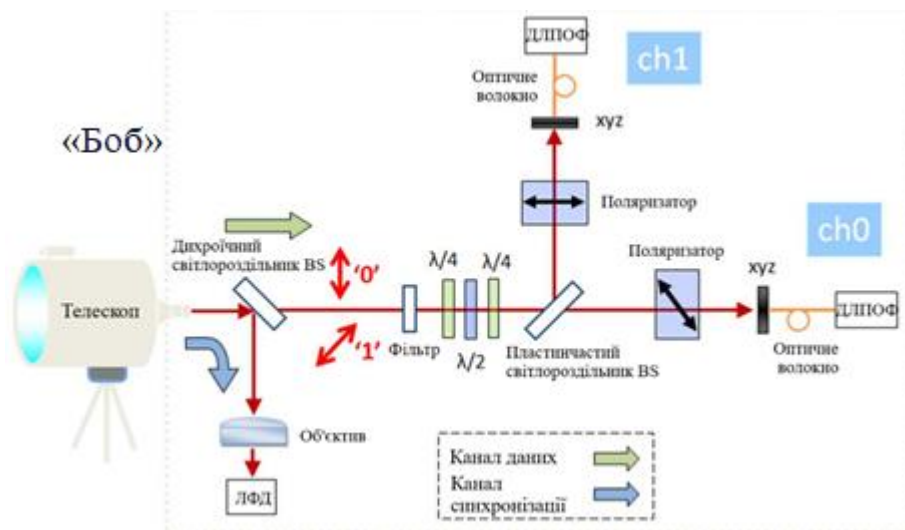


Рисунок 4.5 – Схема приймача: «Боб»

У цій схемі $\lambda/2$ – це півхвильова пластина; об’єктив – ахроматична подвійна лінза, хуз – трьохосьовий позиціонер; ЛФД – лавинний фотодетектор; фільтр – інтерференційний фільтр; $\lambda/4$ – чвертьхвильова пластина; P_0 і P_1 – лінійні поляризатори; ДЛПОФ – фотодетектори лавинного типу для одиничних фотонів.

Сигнал 850 нм розділяється від сигналу 1550 нм за допомогою дихроїчного фільтра, а вузькосмуговий фільтр додатково усуває інші довжини хвиль з сонячного спектра. Існують різні технології для виявлення одиничних фотонів, найпоширенішими з яких є лавинні детектори в режимі Гейгера. Ці детектори – лавинні фотодіоди, що працюють при напрузі вище напруги пробую, що дозволяє одиничному фотону ініціювати самопідтримувану лавину. Це зріла технологія з високою квантовою ефективністю, низьким рівнем темних імпульсів, високою тимчасовою роздільною здатністю та наявністю на ринку. Крім того, технологія виявлення на основі кремнію не потребує криогенних температур для роботи, як у випадку з германієм або InGaAs, для зниження рівнів темних імпульсів. ДЛПОФ, що використовувалися в системі ВКОСОК, – це SPCM-12-AQR від Perkin Elmer, які можуть виявляти 15 мільйонів імпульсів на секунду за технічними характеристиками, з ефективністю виявлення близько 45 % і рівнем темних імпульсів 500 імпульсів на секунду. Ці детектори були охарактеризовані, показавши середню ефективність виявлення 30% і рівень темних імпульсів 300 імпульсів на секунду.

Щодо оптичного виявлення поляризованих станів, фотони 850 нм випадковим чином спрямовувалися до кожної з двох основ детекції за протоколом В92 через 50/50 неполяризуючий подільник пучка. У відбиваючому шляху поляризатор, встановлений перед детектором, орієнтується горизонтально для блокування вертикального стану і проти діагонального стану, тобто під кутом -45° в передавальному шляху. Ця схема забезпечує детерміністичну дискримінацію двох неортогональних станів за рахунок втрати 75 % фотонів: 50 % втрачаються на подільнику пучка, який випадковим чином вибирає основу, тому половина станів вибирає неправильний шлях і блокуються поляризатором; а інші 50 % вибирають правильний шлях, але блокуються поляризаторами, оскільки їх орієнтація знаходиться під кутом 45° від їх передавальної осі.

4.4.2 Детектування одиничних фотонів

ДЛПОФ – діод лавинного посилення для одиничного фотона. Силіконові діоди лавинного посилення для одиничного фотона (ДЛПОФ) широко використовуються в системах ВКОСОК завдяки їхній високій ефективності, низькому рівню шуму, простоті експлуатації та комерційній доступності. ДЛПОФ є лавинним фотодіодом (ЛФД), що працює за напругою, яка називається напругою пробою. Явище, відоме як «лавинний пробій» (рис. 4.6), відбувається за напруги, необхідної для того, щоб пара електрон-дірка (утворена під час поглинання одиничного фотона) набрала достатню кінетичну енергію (завдяки наявності сильного електричного поля у пристрої), щоб створити додаткові пари електрон-дірка через процес ударної іонізації. Процес триває, доки не утвориться макроскопічний струм. Режим детектування одиничних фотонів досягається, коли ЛФД працює при напрузі вище пробою (режим Гейгера), і в цьому режимі ЛФД називається лавинним фотодіодом для детектування одиничних фотонів (ДЛПОФ).

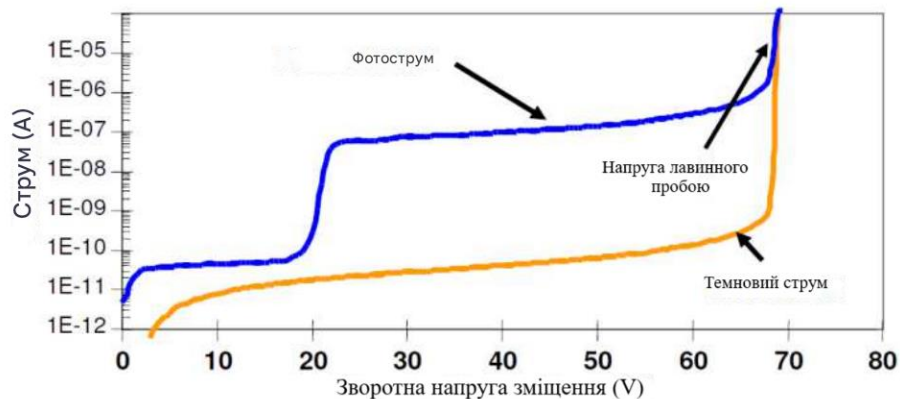


Рисунок 4.6 – Типова поведінка фотоструму та темнового струму лавинного фотодіода InGaAs за $\lambda \sim 1300$ нм, виготовленого компанією Fujitsu

ДЛПОФ, використані в досліджуваній системі ВКОСОК, були комерційно доступними моделями SPCM AQR 12 від компанії PerkinElmer.

Для реєстрації часу прибуття кожного фотона з квантового сигналу, який детектував Боб, використовувалась високоточна карта часової мітки (GT658PCI від GuideTech) з часовою роздільною здатністю 75 пс.

4.5 Експериментальні результати

4.5.1 Експеримент із каналом довжиною 300 метрів

Описана система ВКОСОК була протестована на об'єктах CSIC (Іспанська національна дослідницька рада) у центрі міста Мадрид (Іспанія) для каналу довжиною 300 метрів, як показано на рис. 4.7. Система була охарактеризована шляхом проведення вимірювань квантової швидкості помилок бітів (КШПБ), швидкості секретного ключа (ШСК) та рівня фонових шумів. Ці вимірювання були проведені вдень, за високої сонячної радіації, між весною та літом.



Рисунок 4.7 – 300-метрове з'єднання ВКОСОК між Алісою та Бобом у приміщеннях CSIC в Мадриді (Іспанія)

Результати 24-годинного тесту системи ВКОСОК показані на рис. 4.8. Існує обернена залежність між КШПБ і ШСК, оскільки останній використовується для обчислення першого наступним чином. Відфільтрований ключ генерується шляхом підрахунку подій, викликаних

отриманими фотонами як «0» або «1». Ці події реєструються окремо в двох різних детекторах, і кожен отриманий фотон асоціюється з тимчасовою міткою (зверніть увагу, що в B92 немає сирого ключа, оскільки немає погодження баз). На початку передачі передається коротка послідовність, відома «Алісі» та «Бобу» для обчислення КШПБ. Використовуючи цей зразок для підрахунку кількості помилок (коли «Аліса» і «Боб» не згодні), що стосуються загальної кількості отриманих бітів, можна обчислити КШПБ. Якщо КШПБ перевищує певний поріг, що залежить від протоколу і реалізації (8 % у системі, описаній у попередніх розділах), передача не вважається безпечною. Нарешті, ШСК обчислюється з відфільтрованої швидкості ключа та КШПБ. У реальному з'єднанні цей крок йде разом з корекцією помилок і посиленням конфіденційності. Для врахування цього, втрату швидкості та можливі атаки для прослуховування, швидкість ключа була оцінена з припущенням використання алгоритму каскадної корекції помилок і найгіршого сценарію, в якому одночасно виконуються дві відомі атаки на протокол B92 (атака на неоднозначну дискримінацію станів та Атака на поділ числа фотонів).

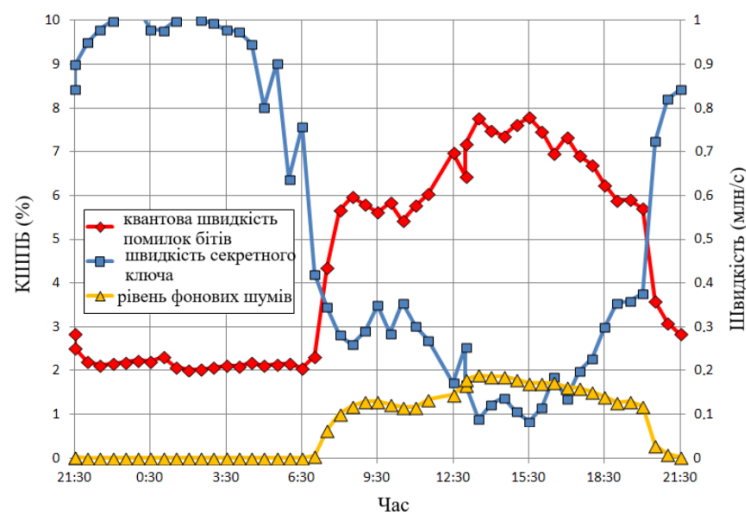


Рисунок 4.8 – Квантова швидкість помилок бітів (КШПБ), швидкість секретного ключа (ШСК) та рівень фонових шумів у 24-годинному експерименті 300-метрового з'єднання

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз фізико-математичних основ розповсюдження оптичного сигналу в різних середовищах. Основна увага приділена дослідженню механізмів, які визначають ефективність та стабільність передачі сигналу в оптичних системах зв'язку та керування.

Розглянуто принципи створення оптичних систем, що базуються на сучасних технологіях, здатних забезпечувати надійність роботи в умовах різних зовнішніх впливів. Особливу увагу приділено перспективним технологіям, які сприяють підвищенню ефективності передачі даних та керованості систем.

У першому розділі було розглянуто основи оптичного зв'язку у вільному просторі (ОЗВП): технологію передачі даних лазерним променем через атмосферу, її переваги, обмеження та вплив розсіювання, турбулентності й поглинання на сигнал.

У другому розділі розглянуто основи відкритих оптичних систем: технологія передачі даних через атмосферу, переваги, обмеження та вплив розсіювання, турбулентності й поглинання на сигнал.

У третьому розділі розглянуто перспективи оптичного зв'язку для глибокого космосу та військових технологій, включаючи використання лазерного зв'язку для передачі даних на великі відстані, таких як міжсупутникове з'єднання та забезпечення високошвидкісного зв'язку в бойових умовах. Акцент на безпеку та пропускну здатність, зокрема в умовах, де традиційний радіочастотний зв'язок є вразливим.

У четвертому розділі розглянуто модель ВКОСОК, яка включає передавач «Аліса» та приймач «Боб», оснащені сучасними технологіями, такими як гімбальні платформи, поляризаційні системи, лавинні фотодіоди в гейгерівському режимі (ЛФД). Розглянуто експериментальні дослідження 300-метрового зв'язку в міських умовах (центр Мадрида), що дозволило оцінити ефективність системи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Henniger H., Wilfert O. An Introduction to Free-space Optical Communications // Radioengineering. 2010. Vol. 19, No. 2. P. 203–212.
2. Yuan R., Cheng J. Free-Space Optical Quantum BPSK Communications in Turbulent Channels: Conference: IEEE Globecom Workshops. 2018.
3. Samir A. Al-Gailani, Mohd Fadzli Mohd Salleh, Ali A. Salem. et al A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks. Published in: IEEE Access. 2020. December 29. Vol. 9.
4. Carrasco-Casado A., Fernández V., Denisenko N. Free-space quantum key distribution. Optical Wireless Communications: chapter from the book. Springer, 2016. 22 p.
5. Senapati B., Bharat S. Rawal. Quantum communication with RLP quantum resistant cryptography in industrial manufacturing // Cyber Security and Applications. 2023. Vol. 1. 100019.
6. Гнатенко О.С., Курський Ю.С., Моргун І.В., Одаренко Є.М. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 4: монографія. Харків: Факт. 2024. 146 с.
7. Franson J. D., Ilves H. Quantum cryptography using optical fibers // Applied Optics. 1994. Vol. 33. Issue 14. P. 2949-2954.
8. Machekhin, Yu.P., Gnatenko, A.S., Kurskoy, Yu.S. Photonic crystal nanolasers as optical frequency standards Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika), 2018, 77(13), стр. 1169–1177
9. Newland M., Schmogrow R., Cantono M., Vusirikala V. Open optical communication systems at a hyperscale operator // Journal of Optical Communications and Networking. 2020. Vol 12. Issue 6.
10. NASA's Tech Demo Streams First Video From Deep Space via Laser. Jet Propulsion Laboratory. December 18. 2023. URL:

<https://www.jpl.nasa.gov/news/nasas-tech-demo-streams-first-video-from-deep-space-via-laser/> (дата звернення 20.11.2024).

11. QinetiQ. Free Space Optical Communications. URL: <https://www.qinetiq.com/en/what-we-do/services-and-products/free-space-optical-communications>. (дата звернення 05.12.2024).

12. Quantum Cryptography: The Future of Secure Communications. October 10, 2024. URL: <https://quantumzeitgeist.com/quantum-cryptography-the-future-of-secure-communications/> (дата звернення 11.12.2024).

13. Source: Xinhua. Chinese scientists develop improved method for quantum communication. 2023-03-14. URL: <https://english.news.cn/20230314/14f469888ef4415085808f534875bd24/c.html> (дата звернення 12.12.2024).

14. Національний стандарт України ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання: Чинний від 2017-07-01. Київ: Держспоживстандарт України, 2016. 26 с.

15. Методичні рекомендації та вимоги щодо оформлення пояснювальної записки атестаційної роботи магістрантів денної форми навчання спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» спеціалізацій «Лазерна і оптоелектронна техніка» та «Фотоніка та оптоінформатика» / Упоряд.: Гнатенко О.С., Крючков А.І., Чернишова Н.М. Харків: ХНУРЕ, 2017. 48 с.