

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)  
ПІДВОДНИЙ БЕЗДРОТОВИЙ ОПТИЧНИЙ ЗВ'ЯЗОК  
(тема)

Виконав:  
здобувач 2 року навчання,  
групи ЛОЕТМ-24-1  
Віталій ЦВІНСЬКИЙ  
(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

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

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

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

Керівник ст. викл. каф. ФОЕТ Сергій КУХТІН  
(посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ \_\_\_\_\_  
(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО  
(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ Електронної та біомедичної інженерії \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ Фізичних основ електронної техніки \_\_\_\_\_

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 \_\_\_\_\_ Цівінському Віталію Максимовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Підводний бездротовий оптичний зв'язок \_\_\_\_\_

затверджена наказом університету від « 10 » листопада 2025 р. № 1024 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 16 \_\_\_\_\_ грудня 2025 р. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_ зелений світлодіод 470 нм; лазерний діод 470 нм, 750 нм; \_\_\_\_\_  
багатошарове діелектричне покриття; оптичні характеристики води; амплітудна схема \_\_\_\_\_  
модуляції. \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

1 Вступ. 2 Методи підводного зв'язку. 3 Особливості передачі оптичних сигналів \_\_\_\_\_  
під водою. 3 Розповсюдження схеми передачі оптичних сигналів під водою. 4 Методи \_\_\_\_\_  
підвищення чутливості передавальних інформаційних систем. 5 Методи конструювання \_\_\_\_\_  
діелектричних оптичних фільтрів. \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій  
Демонстраційний матеріал – 11 слайдів.

---

---

---

---

---

---

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про сучасні технології підводного бездротового зв'язку	04.09.25–21.09.25	Виконано
2	Аналіз фізичних процесів поширення світла у воді та вплив розсіювання. Обґрунтовано вибір елементної бази	26.09.25–07.10.25	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків конструктивних параметрів інтерференційних фільтрів-дзеркал	11.10.25–20.10.25	Виконано
4	Аналіз розрахунків чисельного моделювання спектральних характеристик	22.10.25–25.10.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	01.11.25–14.11.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	15.11.25–21.11.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки тексту КВР на унікальність	26.11.25–08.12.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	10.12.25–13.12.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	15.12.25–17.12.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ ст. викл. каф. ФОЕТ Сергій КУХТІН  
(підпис) (посада, Власне ім'я, Прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 50 с., 12 рис., 4 табл.,  
1 додаток, 14 джерел.

БАГАТОШАРОВА СТРУКТУРА, ДІОКСИД КРЕМНІЮ, ДІОКСИД ТИТАНУ, ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ, МАТРИЧНИЙ МЕТОД, ОПТИЧНИЙ ФІЛЬТР, ПОКАЗНИК ЗАЛОМЛЕННЯ, СЕЛЕКТИВНІСТЬ, СПЕКТР ПРОПУСКАННЯ.

Об'єкт дослідження – інтерференційний фільтр приймального модуля оптичної системи підводного зв'язку.

Мета цієї роботи полягає в розробці та розрахунку конструктивних параметрів багатошарового інтерференційного фільтра для забезпечення високої спектральної селективності на робочій довжині хвилі 470 нм (вікно прозорості води), необхідної для ефективного функціонування підводних телекомунікаційних систем.

Метод дослідження – теоретичний аналіз та математичне моделювання спектральних характеристик методом матриць перенесення.

Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено наступні завдання:

1. Дослідити теоретичні засади роботи інтерференційних оптичних фільтрів та методи їх розрахунку.
2. Обґрунтувати вибір пари плівкоутворюючих матеріалів ( $\text{SiO}_2/\text{Si}_2\text{O}_3$ ) для забезпечення необхідного контрасту показників заломлення.
3. Розрахувати геометричні параметри чвертьхвильових шарів структури.
4. Провести моделювання та оптимізацію спектральних характеристик фільтра для одноканального та багатоканального режимів (470 нм та 750 нм) шляхом зміни кількості шарів для досягнення необхідної крутизни фронтів пропускання.

## ABSTRACT

Explanatory note of the qualification paper: 50 с., 12 рис., 4 табл., 1 додаток, 14 джерел.

INTERFERENCE, MULTILAYER STRUCTURE, MATRIX METHOD, OPTICAL FILTER, SILICON DIOXIDE, SELECTIVITY, REFRACTIVE INDEX, TITANIUM DIOXIDE, TRANSMISSION SPECTRUM,.

The object of research is an interference filter for the receiving module of an underwater optical communication system.

The aim of this work is to develop and calculate the design parameters of a multilayer interference filter to ensure high spectral selectivity at the operating wavelength of 470 nm (water transparency window), which is necessary for the efficient functioning of underwater telecommunication systems.

The method of research is theoretical analysis and mathematical modeling of spectral characteristics using the transfer matrix method.

To achieve the goal, the following tasks were set and solved in the work:

1. Investigate the theoretical foundations of interference optical filters and methods for their calculation.
2. Justify the choice of a pair of film-forming materials ( $\text{SiO}_2/\text{Si}_2\text{O}_3$ ) to ensure the necessary contrast of refractive indices.
3. Calculate the geometric parameters of the quarter-wave layers of the structure.
4. Perform modeling and optimization of the spectral characteristics of the filter for single-channel and multi-channel modes (470 nm and 750 nm) by changing the number of layers to achieve the necessary steepness of the transmission fronts.

## ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки .....	7
Вступ.....	8
1. Огляд сучасних технологій підводного бездротового зв'язку.....	9
1.1 Історичний огляд розвитку підводного зв'язку.....	9
1.2 Акустичний зв'язок: фізичні основи та системні особливості.....	9
1.3 Радіохвильовий зв'язок у підводних умовах .....	13
1.4 Оптичний (лазерний) зв'язок у підводних умовах .....	15
1.5 Гібридні підводні системи бездротового зв'язку .....	18
2. Оптичний підводний бездротовий) зв'язок: принципи, системи та методи підвищення ефективності.....	23
2.1 Передумови розвитку оптичного підводного зв'язку .....	23
2.2 Оптичні властивості водного середовища.....	25
2.3 Типи оптичних методів передачі даних.....	29
2.4 Елементна база оптичних систем зв'язку .....	38
2.5 Методи підвищення ефективності оптичного зв'язку .....	34
3. Електродинамічний розрахунок та моделювання характеристик тонкоплівкового фільтра-дзеркала .....	42
3.1 Теоретичні основи розрахунку багат шарових середовищ.....	42
3.2 Розрахунок параметрів фільтра-дзеркала для приймального модуля .....	44
3.3 Проектування двосмугової системи .....	46
Висновки .....	48
Перелік джерел посилання .....	49
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	51

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

AUV (Autonomous Underwater Vehicle) – автономний підводний апарат;

BER (Bit Error Rate) – коефіцієнт бітових помилок;

FEC (Forward Error Correction) – пряме виправлення помилок.

FSO (Free-Space Optical) – бездротовий оптичний зв'язок;

ISI (Intersymbol Interference) – міжсимвольна інтерференція;

RF (Radio Frequency) – радіочастота;

ROV (Remotely Operated Vehicle) – дистанційно-керований апарат;

SOFAR (Sound Fixing and Ranging) – система виявлення та визначення дальності за звуком;

SSB (Single-Sideband) – односмугова модуляція;

UAWC (Underwater Acoustic Wireless Communication) – підводний акустичний бездротовий зв'язок;

VOX (Voice Operated eXchange) – керування голосом;

EM (Electromagnetic) – електромагнітний;

LOS (Line-Of-Sight) (Line-Of-Sight) – пряма видимість;

N-LOS (Non-Line-Of-Sight) – відсутність прямої видимості;

UWSNS (Underwater Wireless Sensor Network) – підводна бездротова сенсорна мережа;

LED (Light Emitting Diode) – світлодіод;

LD (Laser Diode) – лазерний діод;

OOK (On-Off Keying) – модуляція за принципом «ввімкнено-вимкнено»;

PPM (Pulse-Position Modulation) – імпульсно-позиційна модуляція;;

SNR (Signal-to-Noise Ratio) – співвідношення сигнал/шум;

## ВСТУП

Зростаючий попит на всебічний моніторинг океанічних ресурсів, управління автономними підводними апаратами (АПА) та розгортання великомасштабних підводних сенсорних мереж (UWSNs) вимагає надійного та високошвидкісного бездротового зв'язку. Традиційний акустичний зв'язок, що є домінуючою технологією, забезпечує велику дальність поширення (до кілометрів) та високу проникність крізь товщу води. Однак, він критично обмежений низькою швидкістю передачі даних (кілька десятків кілобіт на секунду) та високою затримкою, що робить його непридатним для завдань, чутливих до швидкості, таких як потокова передача відео або обмін великими масивами даних. Це фундаментальне обмеження стимулювало розвиток альтернативних технологій, а саме підводного оптичного (лазерного) зв'язку (UWOC).

Підводний оптичний зв'язок (UWOC) пропонує найвищу пропускну здатність серед усіх підводних методів, потенційно досягаючи гігабіт на секунду (Гбіт/с), що на порядки перевищує можливості акустики. Втім, його робота ускладнена екстремальними фізичними явищами у водному середовищі: поглинанням світла молекулами води та сильним розсіюванням зваженими частинками та мулом. Ці явища суворо обмежують дальність зв'язку десятками метрів, вимагаючи постійного балансування між швидкістю та робочою відстанню. Таким чином, мета цієї кваліфікаційної роботи полягає у комплексному дослідженні та моделюванні технологічних та системних аспектів підводного бездротового зв'язку, з фокусом на теоретичних основах, апаратній базі та методах оптимізації саме оптичного каналу, що є критично важливим для розробки високоефективних гібридних мережевих архітектур майбутнього.

# 1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДВОДНОГО БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

## 1.1 Історичний огляд розвитку підводного зв'язку

Історично, першим та найнадійнішим методом передачі даних та енергії під водою були дротові системи. Цей підхід досі залишається фундаментальним для багатьох завдань, особливо у сфері телекерованих підводних апаратів ROV. Суть методу полягає у фізичному кабелі (іноді званому «пуповиною»), який з'єднує підводний апарат із поверхневим судном або станцією [1].

Головна перевага дротових систем — це можливість одночасної передачі великих обсягів енергії та забезпечення високошвидкісного каналу зв'язку з майже нульовою затримкою. Це дозволяє операторам на поверхні отримувати відеодані високої чіткості в реальному часі та миттєво керувати маніпуляторами та рушіями апарата. Однак цей метод має значні недоліки: вартість розгортання та обслуговування довгих кабелів є надзвичайно високою. Крім того, робоча зона апарата жорстко обмежена довжиною кабелю, а сам кабель схильний до пошкоджень, заплутування або обривів у складних підводних умовах чи під час штормів [1].

## 1.2 Акустичний зв'язок: фізичні основи та системні особливості

Підводний акустичний зв'язок (UAWC) вважається найпопулярнішим методом бездротового зв'язку під водою. Сама ідея виявлення об'єктів за допомогою звуку у воді сягає ще 1490 року, коли Леонардо да Вінчі пропонував використовувати трубку, вставлену у воду, щоб на слух виявляти далекі кораблі. Однак технологія набула справжньої популярності та практичної реалізації лише під час Першої та Другої світових воєн, що стимулювало її розвиток.

Системи акустичного зв'язку сьогодні здатні забезпечити високоякісну передачу відео з дна найбільших океанських траншей до дослідницьких суден на поверхні або передавати телеметричні дані на великі горизонтальні відстані. Більшість військових і комерційних застосувань сьогодні потребують зв'язку в режимі реального часу як у точках зв'язку, так і в мережевих конфігураціях. Дослідження спрямоване на розробку ефективних алгоритмів обробки сигналів, методів множинного доступу, схем кодування, протоколів для тривалих затримок поширення та суворих вимог до потужності підводного середовища [1].

По суті, система звукового підводного зв'язку складається з електронного водонепроникного корпусу, що включає джерело живлення, перетворювач, водонепроникні навушник, мікрофон та кріпильний пристрій, вбудований пульт керування «натисни і говори» або голосовий передавач (VOX) та вузол для кріплення до повнолицьової маски або маски диярота. Є деякі доступні вдосконалення: керування шумоподавленням, VOX, багатоканальний зв'язок, довший термін служби батареї, більша дальність дії, наземна станція. Схема шумоподавлення дозволяє користувачеві придушувати морський фоновий шум, який зазвичай можна знайти будь-де, де є людина. Недоліком використання шумозаглушення є те, що воно не тільки придушувє шум, але й зменшує дальність.

Система голосового керування розроблена для роботи без використання рук. Коли схема чує звук, вона активує передавач. Поки система чує звук, передавач залишається увімкненим. Якщо протягом встановленого часу, зазвичай приблизно від 1 с до 1,5 с, нічого не чути, передавач вимикається до режиму прийому. Але водолази створюють багато шуму ротом або маскою, коли випаровують гази, і схема VOX чує звук і активує передавач. Саме з цієї причини більшість хороших конструкцій VOX мають певний контроль над налаштуванням чутливості. Багатоканальні канали: для комерційних та військових команд, які працюють в одному районі необхідні альтернативні канали зв'язку [2].

Перші справжні пристрої для акустичного зв'язку були розроблені в США і використовували амплітудну модуляцію з однією бічною смугою (SSB) на частотах від 8 кГц до 15 кГц. Якість сигналу була низькою, і для розшифровки спотвореного мовлення покладалися на слух та мозок людини. Значний прогрес у швидкості передачі даних та дальності зв'язку відбувся з розвитком цифрової передачі даних у 1960-х роках. У табл. 1.1 наведено приклади продуктивності деяких ранніх цифрових акустичних систем, що демонструють поступове зростання швидкості передачі даних [2].

Таблиця 1.1 – Порівняння дальності та швидкості ранніх акустичних систем

Рік	Характеристика системи	Швидкість, (Data Rate), кбіт/с	Дальність / Умови
1995	Рання система UAWC	40	(дальність не вказана)
1996	Система UAWC	8	13 км (горизонтально), 20 м (глибина)
2005	Система UAWC (32 QAM)	125	до 1 км. (горизонтально), 100 м (глибина)
2005	Система UAWC (32 QAM)	60	3 км (горизонтально), 100 м (глибина)

Швидкість поширення звуку ( $c$ ) у морській воді є ключовою фізичною характеристикою. Вона становить приблизно 1500 м/с (у чистій воді близько 1480 м/с), що значно перевищує швидкість у повітрі. Ця швидкість є не сталою, а залежить від трьох основних змінних, що створюють складний і мінливий канал зв'язку:

1) температура ( $T$ ): це найбільш значущий фактор: підвищення температури на 1°C збільшує приблизно швидкість звуку на 3–4 м/с;

2) солоність ( $S$ ): збільшення солоності (кількості розчинених солей) також призводить до зростання  $c$ ;

3) тиск/глибина ( $D$ ): зі збільшенням глибини зростає тиск, що також збільшує швидкість звуку.

Залежність швидкості звуку від глибини спричиняє заломлення (рефракцію) акустичних хвиль (вигинання хвильового фронту в бік меншої швидкості). Це призводить до утворення так званих звукових каналів. Найвідомішим є глибинний звуковий канал SOFAR, який утворюється на глибині, де швидкість звуку досягає свого мінімуму. У цьому каналі хвилі, що відхиляються від осі, постійно заломлюються назад до осі, діючи як хвилевід. Це мінімізує втрати енергії через розбіжність і дозволяє звуку поширюватися на тисячі кілометрів (явление, відоме як ультрадальня гідроакустична траса) [2].

Головні переваги акустичного зв'язку, які визначають його як основну технологію підводних комунікацій, такі:

1) максимальна дальність: забезпечує найбільшу дальність зв'язку в порівнянні з оптичними або радіочастотними методами, ефективно працюючи на відстанях від сотень метрів до десятків кілометрів. Це критично для глибоководних та океанічних досліджень;

2) низьке енергоспоживання (для заданої дальності): завдяки низькій атенуації звуку, для підтримки зв'язку на великих відстанях потрібно відносно менше енергії, що є життєво важливим для автономних підводних апаратів (АПА/AUV) із обмеженим запасом живлення;

3) проникність: звук добре поширюється у воді незалежно від її каламутності (турбідності) та відсутності прямої видимості, на відміну від світла, яке сильно розсіюється у каламутній воді;

4) простота конструкції: основні акустичні модеми мають відносно просту архітектуру, особливо ті, що працюють на низьких швидкостях.

Незважаючи на домінуючу роль, акустичний зв'язок має серйозні недоліки, які створюють унікальні інженерні виклики:

1) низька швидкість передавання даних (низька пропускну здатність): це основний недолік. Через значне згасання високочастотних хвиль, більшість систем працює у вузькому діапазоні низьких частот (до 100 кГц), що фізично обмежує доступну смугу пропускання (bandwidth). Швидкість, як правило, становить від сотень біт до кількох десятків кілобіт на секунду, що робить його непридатним для потокової передачі відео або великих файлів;

2) багатоприменовість (Multipath Propagation): через відбиття від поверхні, дна та об'єктів, сигнал приходить до приймача багатьма різними шляхами з різними затримками. Це явище викликає міжсимвольну інтерференцію (ISI), яка є найважчим викликом для підвищення швидкості зв'язку;

3) висока Затримка (Latency): низька швидкість звуку (1500 м/с) у порівнянні зі швидкістю ЕМ-хвиль ( $3 \times 10^8$  м/с) призводить до значної затримки. На відстані 10 км затримка становить близько 6,7 с (односторонній рух), що унеможливує використання його в системах, чутливих до затримки, і створює проблеми для двонаправленого зв'язку;

4) доплерівський ефект: навіть відносно невеликий рух передавача чи приймача спричиняє значний зсув частоти (ефект Доплера), що вимагає складних алгоритмів корекції, особливо для швидких рухомих об'єктів (наприклад, АПА);

5) шуми: якість зв'язку погіршується як природними джерелами шуму (турбулентність, хвилі, біологічний шум), так і техногенними шумами (судна, двигуни, сонари), які можуть збігатися з частотним діапазоном корисного сигналу.

### 1.3 Радіохвильовий зв'язок у підводних умовах

Радіохвильовий зв'язок RF є альтернативою акустиці, який використовує електромагнітні (ЕМ) хвилі для передачі інформації. Його привабливість полягає у

можливості досягнення набагато вищих швидкостей передачі даних та дуже низької затримки (внаслідок поширення зі швидкістю світла). Однак, через фізичні властивості водного середовища, цей метод має екстремальні обмеження за дальністю [2].

Поширення електромагнітних хвиль у воді, особливо морській, значною мірою залежить від електропровідності середовища. Морська вода є високопровідним середовищем завдяки високій концентрації розчинених іонів солей. Коли ЕМ-хвиля проходить крізь провідне середовище, вона викликає переміщення вільних зарядів (іонів), що призводить до індукування струмів. Енергія хвилі розсіюється на тепло, що спричиняє швидке та значне загасання (атенуацію) сигналу. Ключовим параметром, що описує це явище, є скіновий шар. Скінова глибина — це відстань, на якій амплітуда електромагнітної хвилі зменшується до  $1/e$  (приблизно 37 %) від її початкової амплітуди на поверхні розділу (вода/повітря або випромінювач/вода). Скінова глибина обернено пропорційна квадратному кореню частоти ( $f$ ) та електропровідності ( $\sigma$ ):

$$\delta \propto \frac{1}{\sqrt{\sigma \cdot f}} \quad (1.1)$$

Наслідки для частотного діапазону:

– високі частоти (RF/Microwave): на частотах понад 100 МГц скінова глибина у солоній воді вимірюється сантиметрами або міліметрами. Це робить зв'язок на таких частотах практично неможливим навіть на короткій дистанції, за винятком дуже специфічних випадків, наприклад, контакту антен [2];

– низькі частоти (VLF/ELF): для досягнення глибин понад кілька метрів необхідно використовувати дуже низькі частоти (VLF  $\sim$  3–30 кГц) або надзвичайно низькі частоти (ELF  $\sim$  від 3 Гц до 3 кГц). Хоча ці хвилі проникають глибше (до сотень метрів чи навіть кілометрів), смуга пропускання стає настільки

вузькою, що швидкість передачі даних вимірюється бітами на секунду або навіть хвилину.

З огляду на це, традиційний радіозв'язок (з високою швидкістю) може застосовуватися лише для близькопідводного або поверхневого зв'язку з обмеженою глибиною [2, 3].

Радіохвильові системи, попри обмежену дальність, знаходять застосування там, де критично важливі висока швидкість або низька затримка, або де акустичний шум заважає:

1) короткодистанційний зв'язок на причалі (Docking/Offloading): автономні підводні апарати (АПА) можуть використовувати RF-зв'язок, коли вони фізично пристиковуються до підводної зарядної станції або вузла збору даних. Це дозволяє швидко вивантажувати великі обсяги зібраних даних (наприклад, зображення, відео), використовуючи високу пропускну здатність RF на відстані сантиметрів;

2) зв'язок дайвер-база/водолазний комп'ютер: спеціалізовані системи для комунікації водолазів між собою або з поверхневою базою. Вони працюють на межі поширення, але забезпечують надійний голосовий зв'язок (хоча часто на дуже низьких частотах або з низькою якістю);

3) зв'язок крізь межу розділу (Through-the-Surface/Ice): надзвичайно низькі частоти (ELF) використовуються у військових цілях для односпрямованої передачі простих команд зануреним підводним човнам. В умовах Арктики RF-зв'язок може використовуватися для передачі даних від підводних сенсорів до надводного приймача крізь товщу льоду.

#### 1.4 Оптичний (лазерний) зв'язок у підводних умовах

Оптичний (лазерний) зв'язок UWOC є технологією, що використовує світлові хвилі, переважно у синьо-зеленому спектральному діапазоні, для передачі

даних у водному середовищі. На відміну від акустичного та радіохвильового зв'язку, UWOC забезпечує найвищу швидкість передачі даних серед усіх підводних бездротових методів, досягаючи гігабіт на секунду (Гбіт/с). Однак, його застосування суворо обмежене малою дальністю та чутливістю до каламутності води [4].

Поширення світла у воді регулюється двома основними явищами, які спільно визначають якість і дальність зв'язку:

1) поглинання є домінуючим фактором втрат у чистій воді. Фізично вода має так зване «оптичне вікно» – смугу мінімального поглинання, яка знаходиться у синьо-зеленій частині видимого спектра (довжини хвиль приблизно 450 – 550 нм). Саме тому UWOC-системи використовують сині або зелені лазери чи світлодіоди. Розсіювання (Scattering): це зміна напрямку світлових хвиль внаслідок взаємодії з частинками, зваженими у воді (наприклад, планктоном, мулом, осадам).

2) розсіювання призводить до:

- зменшення інтенсивності прямого сигналу.
- багатопроменевості (Multipath): світло досягає приймача багатьма відбитими шляхами, що подовжує імпульс і викликає міжсимвольну інтерференцію (ISI), знижуючи швидкість передачі.

На відміну від радіохвиль, які швидко загасають через провідність води, світло зазнає меншого загасання на цих оптимальних довжинах хвиль. Проте загальне загасання все ще на порядки більше, ніж у акустичних хвиль. Це вимагає використання високоефективних фотоприймачів і потужних джерел світла. Ключовою умовою для оптичного зв'язку є необхідність прямої видимості LOS між передавачем і приймачем. Будь-яка перешкода або сильне розсіювання, спричинене каламутною водою, різко обриває зв'язок [4].

UWOC-системи поділяються на кілька типів залежно від вимог до LOS та швидкості.

1. Прямий зв'язок LOS: це найпоширеніший тип, де передавач і приймач орієнтовані безпосередньо один на одного. Застосування:

– швидке вивантаження великих обсягів даних (відео, 3D-сканування) з автономних підводних апаратів (АПА/AUV) на приймальну станцію або інший АПА, коли вони знаходяться на відстані кількох метрів (наприклад, на станції стикування).

2. Розсіяний зв'язок N-LOS: використовує розсіювання світла у воді для створення більш широкого кута покриття, жертвуючи дальністю та швидкістю. Застосування:

– короткодистанційний зв'язок у підводних сенсорних мережах, де вузли не можуть бути ідеально вирівняні, або системи трилатерації для позиціонування на дуже малих відстанях.

3. Гібридні Системи: UWOC майже завжди використовується як частина гібридної мережі. Застосування:

– акустика забезпечує далекосяжний, низькошвидкісний контроль і навігацію, тоді як Оптика активується на коротких дистанціях для високошвидкісної передачі зібраної інформації. Це оптимально поєднує переваги обох технологій.

Головними перевагами оптичного зв'язку (UWOC) є:

- а) надзвичайно висока швидкість передачі даних (до Гбіт/с);
- б) надважко низька затримка (поширення зі швидкістю світла);
- в) повна імунітет до акустичного шуму;
- г) мала потужність, необхідна для ближнього зв'язку.

Щодо недоліків чи вірніше обмежень, то це:

- а) дуже мала дальність (зазвичай десятки метрів, максимум 100-200 м у чистій воді);
- б) суворозалежність від LOS;

в) висока чутливість до каламутності (турбідності) та зважених частинок, що обмежує застосування в прибережних водах.

### 1.5 Гібридні підводні системи бездротового зв'язку

Обмеження, притаманні кожному окремому методу зв'язку — низька швидкість акустики (див. підрозд. 1.2), величезне загасання радіохвиль (див. підрозд. 1.3) та порівняно мала дальність стійкого оптичного зв'язку (див. підрозд. 1.4) — природно спонукали до розробки гібридних систем. Сучасні тенденції спрямовані на комбінування двох або більше технологій (акустика, оптика та/або радіо) в одній системі. Мета такого підходу — використати сильні сторони кожного методу, нівелюючи їхні недоліки, що в результаті значно підвищує загальну надійність та енергоефективність системи [2].

Найбільш поширеною та перспективною є гібридна акустично-оптична (opto-acoustic) конфігурація, схема якої показана на рис. 1.1.

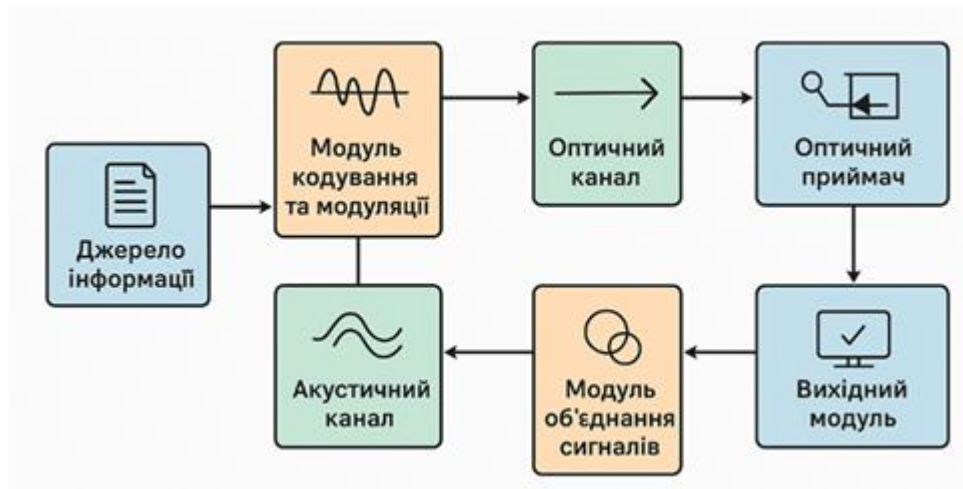


Рисунок 1.1 – Схема гібридної опто-акустичної системи передачі даних

У такій системі надійний, але повільний акустичний канал використовується для завдань, що не потребують високої швидкості: передача команд керування, початкове встановлення зв'язку (сигнали «пробудження»), навігація та зв'язок на великих відстанях. Коли ж виникає потреба у передачі великих обсягів даних (наприклад, відео високої чіткості або телеметрія з сенсорів), і пристрої знаходяться в межах досяжності, система «адаптивно і безшовно» перемикається на високошвидкісний оптичний канал. Такий підхід дозволяє суттєво економити енергоспоживання (до 35 % згідно з деякими дослідженнями) та підтримувати високошвидкісні додатки, що було б неможливо з використанням лише однієї технології. У таблиці 1.2 наведено концептуальне порівняння компонентів у гібридній системі [2].

Таблиця 1.2 – Порівняння компонентів у гібридних технологіях

Компонент	Основна перевага	Основний недолік	Застосування у гібридній системі
Акустика	Велика дальність (км), надійність	Низька швидкість (кбіт/с), висока затримка	Канал керування, навігація, зв'язок на великій відстані
Оптика	Дуже висока швидкість (Гбіт/с), низька затримка	Мала дальність (десятки метрів), вимагає прямої видимості	Високошвидкісна передача даних (відео, телеметрія) на короткій відстані
Радіо (РЧ)	Добре долає межу вода/повітря	Сильне загасання у солоній воді	Зв'язок з поверхневими/повітряними об'єктами

Використовуючи сильні сторони кожного методу, гібридні системи значно підвищують загальну надійність та продуктивність зв'язку. Наприклад, в поширеній опто-акустичній конфігурації, акустичний канал (з великою дальністю) може використовуватися для передачі команд управління та навігації, тоді як високошвидкісний оптичний канал (з високою пропускнуою здатністю) активується для передачі великих обсягів даних, таких як відео в реальному часі.

Це дозволяє не тільки підтримувати високошвидкісні додатки, але й мінімізувати загальне енергоспоживання системи [2].

Гібридні підводні системи класифікують залежно від конкретних технологій, які вони інтегрують для виконання завдань зв'язку. Хоча теоретично можливі різні комбінації, вибір залежить від вимог місії, таких як дальність, швидкість передачі даних, енергоспоживання та необхідність зв'язку з поверхнею.

Основні типи гібридних систем включають:

а) акустично-оптичні (Acoustic + Optical): це найбільш поширений та активно досліджуваний тип гібридних систем. У такій конфігурації акустичний канал (з великою дальністю, але низькою швидкістю) використовується для навігації, передачі команд керування та зв'язку на великих відстанях. Оптичний канал (з високою швидкістю, але малою дальністю) активується, коли потрібна передача великих обсягів даних (наприклад, відео) на коротких дистанціях;

б) акустично-радіочастотні (Acoustic + RF): ця конфігурація поєднує акустичний зв'язок (для комунікації суто під водою) з радіочастотним каналом. РЧ-канал є ефективним для швидкого подолання межі «вода-повітря» та зв'язку з поверхневими станціями, супутниками або літальними апаратами, що є слабким місцем як для акустики, так і для оптики;

в) оптично-радіочастотні (Optical + RF): комбінація, що може використовувати переваги високошвидкісного оптичного зв'язку між підводними вузлами, що знаходяться близько один до одного, та радіочастотний канал для зв'язку з поверхнею;

г) комбіновані (багаторежимні) системи: складніші архітектури, що можуть включати три або більше технології одночасно. Наприклад, система може об'єднувати акустичні, бездротові оптичні та навіть волоконно-оптичні канали (якщо вузли стаціонарні) для досягнення максимальної надійності та гнучкості мережі.

Використання гібридних архітектур дозволяє подолати обмеження окремих технологій, надаючи низку ключових переваг для підводних місій.

1. Універсальність: системи не обмежуються одним методом зв'язку, а можуть поєднувати сильні сторони різних технологій. Це дозволяє їм ефективно працювати в різних умовах та на різних дистанціях, наприклад, використовуючи акустику для дальніх комунікацій та оптику для швидкісної передачі даних.

2. Адаптивність: гібридна система може динамічно «адаптивно і безшовно» перемикатися між каналами зв'язку. Вона може реагувати на зміну умов (наприклад, каламутність води, що блокує оптику), відстань до об'єкта або тип трафіку (наприклад, перемикаючись на оптику для передачі відео) [2].

3. Збільшена ефективна дальність та продуктивність: комбінація технологій дозволяє досягти показників, неможливих для одного каналу. Наприклад, система може використовувати акустичний канал для встановлення зв'язку на великій відстані (кілометри), а потім активувати оптичний канал для передачі даних на гігабітних швидкостях, коли пристрої зближуються.

4. Стабільність та резервування каналів: наявність двох або більше каналів зв'язку суттєво підвищує надійність системи. Якщо один канал (наприклад, оптичний) стає тимчасово недоступним через перешкоду або погіршення умов, система може продовжувати передачу критично важливих даних через резервний канал (наприклад, акустичний), забезпечуючи стабільність місії.

Незважаючи на значні переваги, практичне впровадження гібридних систем пов'язане з низкою складних технічних викликів, які необхідно вирішити:

а) складність інтеграції: об'єднання абсолютно різних фізичних технологій (апаратного та програмного забезпечення) в одному пристрої є нетривіальним завданням. Система стає значно складнішою, адже вона повинна одночасно підтримувати різні передавачі, приймачі та схеми модуляції;

б) енергоспоживання та вартість: хоча кінцевою метою є оптимізація енергії, гібридні системи часто включають компоненти, які самі по собі є

дорогими та енергоємними (наприклад, акустичні трансивери або потужні лазери). Це створює додаткове навантаження на батареї автономних пристроїв, які важко перезарядити під водою;

в) синхронізація та наведення: багато високошвидкісних оптичних каналів, що є частиною гібридної системи, вимагають точного наведення "точка-точка" (Line-of-Sight) між передавачем і приймачем. Підтримка цього вирівнювання між рухомими вузлами (наприклад, AUV) у мінливому підводному середовищі є значним механічним та програмним викликом [2];

г) маршрутизація та протоколи: одним з найбільших викликів є розробка протоколів, здатних забезпечити "адаптивне та безшовне" перемикання між різними каналами зв'язку. Система повинна в реальному часі аналізувати стан середовища, відстань та тип трафіку, щоб прийняти рішення, який канал (акустичний чи оптичний) використовувати. Створення таких ефективних мережевих протоколів залишається актуальною науковою задачею [2].

## 2 ОПТИЧНИЙ ПІДВОДНИЙ БЕЗДРОТОВИЙ ЗВ'ЯЗОК: ПРИНЦИПИ, СИСТЕМИ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ

### 2.1 Передумови розвитку оптичного підводного зв'язку

Попередній аналіз продемонстрував фундаментальні обмеження існуючих технологій підводного зв'язку. Акустичні системи, незважаючи на їхню здатність долати кілометрові відстані, критично обмежені низькою пропускною здатністю (порядку кілобіт на секунду) та високою затримкою. Радіохвильовий зв'язок (RF), хоч і забезпечує високу швидкість, практично неіздатний у провідному морському середовищі, де його робоча відстань обмежується ліченими метрами [4].

Ці обмеження створюють значний «розрив у пропускній здатності» (bandwidth gap) між потребами сучасних підводних місій та можливостями традиційних систем. Розвиток автономних підводних апаратів (AUV), телекерованих апаратів (ROV), розгортання довготривалих сенсорних мереж (UWSNs) та потреби у передачі відео високої чіткості в реальному часі вимагають швидкостей передачі даних, що вимірюються в мегабітах, а в ідеалі — гігабітах на секунду. Гібридні системи (підроз. 1.5) є ефективним компромісом, проте вони не вирішують проблему передачі великих масивів даних «на місці» [5].

Саме ця гостра потреба у високошвидкісному та енергоефективному каналі зв'язку на коротких та середніх дистанціях (від десятків до сотень метрів) стала головною передумовою для активного дослідження та розвитку технологій підводного оптичного бездротового зв'язку [5].

UWOC, по суті, переносить принципи атмосферного оптичного зв'язку (FSO) у водне середовище. На відміну від радіохвиль, електромагнітні хвилі у видимому діапазоні спектра (зокрема, у синьо-зеленій його частині, від 450 нм до 550 нм) зазнають значно меншого поглинання у воді, що відкриває так зване «вікно прозорості» гигабітах на секунду. Використання світла як носія інформації

дозволяє досягти теоретичної пропускної здатності в гигабітах на секунду, що на порядки перевищує можливості акустики [4].

Базовий принцип роботи системи UWOC полягає у перетворенні цифрового електричного сигналу на модульований потік світла. На передавальній стороні (трансмітері) дані модулюють інтенсивність (яскравість) джерела світла — зазвичай, лазерного діода або потужного світлодіода . Згенерований оптичний промінь проходить через товщу води, де він зазнає поглинання та розсіювання (детально розглянуто в підроз. 2.2). На приймальній стороні (ресивері) фотодетектор (наприклад, PIN-фотодіод або лавинний фотодіод APD) вловлює фотони, що прийшли, і перетворює їх назад в електричний сигнал. Цей сигнал потім демодулюється та обробляється для відновлення вихідних даних [5].

Загальна блок-схема процесу передачі даних в системі UWOC наведена на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Узагальнена блок-схема системи підводного бездротового оптичного зв'язку (UWOC)

Таким чином, UWOC є ключовою технологією, що дозволяє подолати обмеження акустичного зв'язку для завдань, які потребують високої пропускної здатності. Однак ефективність цього каналу безпосередньо залежить від фізичних

властивостей самого водного середовища. Для успішного проектування та експлуатації таких систем необхідно детально проаналізувати фундаментальні процеси поглинання та розсіювання світла у воді, що і є предметом наступного підрозділу [5].

## 2.2 Оптичні властивості водного середовища

Ефективність підводного оптичного каналу визначається його Власними Оптичними Властивостями (Inherent Optical Properties, IOPs) — фундаментальними характеристиками середовища, що не залежать від умов освітлення. Головним обмежуючим фактором для UWOC є згасання (або атенуація) оптичного сигналу, яке є сукупним результатом двох незалежних процесів: поглинання та розсіювання [6].

Поглинання (absorption) — це процес, при якому енергія фотона незворотно поглинається середовищем і перетворюється переважно в теплову енергію або хімічну енергію (наприклад, при фотосинтезі). Цей процес призводить до повної втрати фотонів [7].

Розсіювання (scattering) — це процес, при якому фотони змінюють свій напрямок поширення внаслідок взаємодії з частинками середовища. Розсіювання не знищує фотон, але має два негативних наслідки: 1) відхиляє фотони від прямого шляху до приймача, що сприймається як втрата сигналу; 2) створює багатопроменевість (multipath propagation), коли розсіяні фотони приходять на приймач із затримкою, викликаючи часову дисперсію та міжсимвольну інтерференцію (ISI) [7].

Важливо зазначити, що розсіювання у водному середовищі є суттєво анізотропним. На відміну від релєївського розсіювання в атмосфері, у воді фотони переважно розсіюються вперед (під малими кутами відносно початкового напрямку). Для математичного опису цього явища використовується об'ємна

функція розсіювання (Volume Scattering Function, VSF), позначена як  $b(\theta)$ , яка описує кутовий розподіл розсіяного світла.

В інженерних розрахунках підводних оптичних каналів для апроксимації VSF загальноприйнятим стандартом є використання фазової функції Хенї-Грінштейна (Henry-Greenstein phase function):

$$P(\theta) = \frac{1-g^2}{4\pi(1+g^2-2g \cos \theta)^{3/2}}, \quad (2.1)$$

де  $\theta$  – кут розсіювання;

$g$  – параметр аксиметрії, що дорівнює середньому косинусу кута розсіювання.

Для чистої океанічної води значення  $g$  зазвичай високе (близько 0,924), що підтверджує сильне розсіювання вперед. У каламутних прибережних водах значення  $g$  може зменшуватися, що вказує на більш ізотропний характер розсіювання через великі зважені частинки.

Сукупний ефект цих двох процесів описується коефіцієнтом згасання  $c(\lambda)$ , який дорівнює сумі коефіцієнтів поглинання  $a(\lambda)$  та розсіювання  $b(\lambda)$ :

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda), \quad (2.2)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі світла.

Усі три коефіцієнти вимірюються в обернених метрах ( $\text{m}^{-1}$ ) [8].

Втрату потужності оптичного сигналу, що поширюється у воді, для простого каналу прямої видимості (LOS) можна описати законом Бугера–Ламберта–Бера. Цей закон моделює експоненційне зменшення потужності  $P_r$ , що приймається, порівняно з переданою потужністю  $P_t$ , на відстані  $z$ :

$$Pr(z) = Pt \cdot e^{-c(\lambda) \cdot z}, \quad (2.3)$$

де  $P_r$  – потужність, що приймається, Вт;

$P_t$  – потужність, що передається, Вт;

$c(\lambda)$  – загальний коефіцієнт згасання на довжині хвилі  $\lambda$ ,  $\text{м}^{-1}$ ;

$z$  – відстань між передавачем та приймачем, м.

Із формули (2.2) видно, що коефіцієнт  $c(\lambda)$  є критичним параметром, що визначає максимальну дальність зв'язку. Цей коефіцієнт сильно залежить від довжини хвилі випромінювання [9].

Вода по-різному поглинає світло на різних довжинах хвиль. У червоній та інфрачервоній частинах спектра поглинання самою водою є надзвичайно високим, що робить цей діапазон непридатним для зв'язку. В ультрафіолетовій частині спектра домінує поглинання розчиненими органічними речовинами. Однак у синьо-зеленій частині видимого спектра (приблизно 450–550 нм) загальне згасання мінімальне. Цей діапазон називають «вікном прозорості» для підводного зв'язку (рис. 2.2).

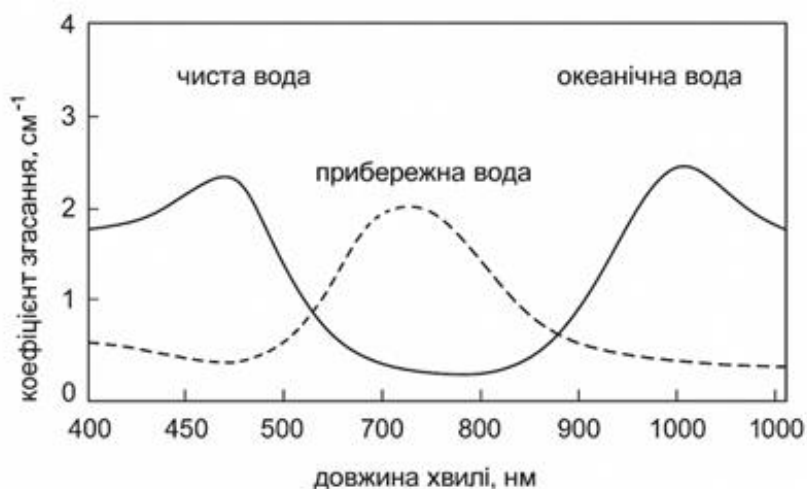


Рисунок 2.2 – Типова залежність коефіцієнтів згасання від довжини хвилі для різних типів води (чиста, прибережна, океанічна)

Окрім самої води, на коефіцієнти поглинання та розсіювання значно впливають розчинені та зважені речовини [6]. Їх концентрація визначає тип води, і для стандартизації цих параметрів у світовій практиці використовується класифікація Джерлов (Jerlov Water Types). Вона поділяє водні маси на дві великі групи.

1. Океанічні води (Types I, IA, IB, II, III): характеризуються високою прозорістю. Тип I — це найчистіша вода, де мінімум згасання припадає на синю область спектра ( $\approx 450\text{--}470\text{ nm}$ ). У таких водах дальність зв'язку може досягати 100 м.

2. Прибережні води (Coastal Types 1, 3, 5, 7, 9): містять значну кількість гумусу, планктону та жовтої речовини. Тут мінімум згасання зміщується у зелену або навіть жовто-зелену область ( $\approx 520\text{--}550\text{ nm}$ ), а загальний коефіцієнт згасання  $c(\lambda)$  значно зростає, обмежуючи дальність зв'язку кількома метрами.

Основні фактори, що впливають на зміну типу води, наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вплив основних домішок на оптичні властивості води

Фактор	Компонент, що змінюється	Опис впливу
Мутність	Коефіцієнт розсіювання $b(\lambda)$	Викликається зваженими частинками (пісок, мул, осад). Це домінуючий фактор у прибережних та портових водах. Різко збільшує $b(\lambda)$ і, як наслідок, загальне згасання $c(\lambda)$ , значно знижуючи дальність зв'язку.
Фітопланктон	Коефіцієнт поглинання $a(\lambda)$	Містить хлорофіл, який сильно поглинає світло в синій ( $\approx 440\text{ nm}$ ) та червоній ( $\approx 675\text{ nm}$ ) частинах спектра. Це зміщує "вікно прозорості" у зелену область ( $\approx 530\text{--}550\text{ nm}$ ).
Розчинені органічні речовини	Коефіцієнт поглинання $a(\lambda)$	Також відомі як "жовта речовина" (Gelbstoff). Сильно поглинають в ультрафіолетовій та синій частинах спектра. У водах з високим вмістом CDOM (напр., річки) вікно прозорості також зміщується до зеленого/жовтого.
Солоність та температура	Показник заломлення, $a(\lambda)$	Мають відносно незначний прямий вплив на коефіцієнти поглинання та розсіювання порівняно з мутністю. Однак, градієнти температури та солоності (термокліни) викликають оптичну турбулентність (мерехтіння), що призводить до флуктуацій потужності сигналу.

Як зазначено в таблиці, температурні градієнти викликають специфічне явище — оптичну турбулентність, яка вимагає окремого розгляду.

Підводна оптична турбулентність виникає внаслідок випадкових змін показника заломлення води  $n$ , спричинених флуктуаціями температури та солоності. Хоча зміни показника заломлення є незначними (порядку  $10^{-6}$ ), на трасі поширення променя вони призводять до викривлення хвильового фронту.

Це викликає явище сцинтиляцій (мерехтіння) — швидких випадкових змін інтенсивності сигналу на приймачі. Ефект сцинтиляції може призвести до глибоких завмирань (fading) сигналу, коли рівень потужності падає нижче порогу чутливості приймача, викликаючи сплески помилок (burst errors).

Інтенсивність оптичної турбулентності характеризується структурним параметром показника заломлення  $C_n^2$ , який для підводного середовища може варіюватися в межах від  $10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$  (слабка турбулентність) до  $10^{-10} \text{ м}^{-2/3}$  (сильна турбулентність). Статистичний розподіл інтенсивності сигналу в умовах турбулентності зазвичай моделюється лог-нормальним законом розподілу, що необхідно враховувати при розрахунку бюджету потужності системи.

Таким чином, вибір оптимальної робочої довжини хвилі (зазвичай сині або зелені лазери) та проєктування системи безпосередньо залежать від типу води, в якому передбачається її експлуатація [6].

### 2.3 Типи оптичних методів передачі даних

Окрім фізичних властивостей самого середовища (підрозд. 2.2), на продуктивність та надійність системи UWOC фундаментально впливає геометрична конфігурація каналу зв'язку. Вибір конфігурації залежить від конкретної задачі: вимог до мобільності платформ, необхідної дальності зв'язку, точності систем наведення та умов навколишнього середовища. Всі конфігурації

каналу UWOC можна класифікувати за вимогою до наявності прямої видимості між передавачем (Tx) та приймачем (Rx) [10].

Найбільш поширеною та енергоефективною є конфігурація прямої видимості LOS. Вона передбачає наявність прямого, нічим не заблокованого шляху між передавачем та приймачем. Передавач (зазвичай лазер) формує вузький колімований пучок, спрямований безпосередньо на фотодетектор приймача (рис. 2.3). Головними перевагами LOS є висока енергоефективність, оскільки майже вся енергія концентрується на приймачі, та максимальна дальність зв'язку. Проте, цей підхід має суттєві недоліки: він вимагає складних і точних систем наведення РЛТ та є вразливим до будь-яких блокувань на шляху променя [10].

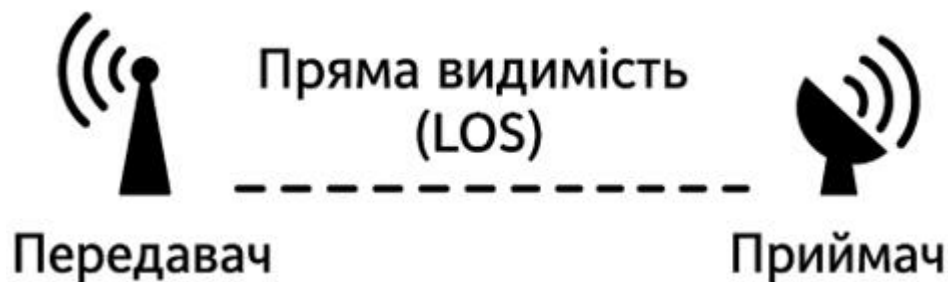


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення каналу зв'язку за прямою видимістю (LOS)

На противагу LOS, системи з непрямою, або розсіяною, передачею (Non-LOS, N-LOS) не вимагають точного вирівнювання і, більше того, покладаються на ефект розсіювання (детально розглянутий в 2.2). У такій конфігурації передавач (зазвичай LED) має широку діаграму спрямованості, «заливаючи» світлом певний об'єм води. Приймач, у свою чергу, має широке поле зору (FOV) і вловлює фотони, що прийшли з різних напрямків (рис. 2.4). Основна перевага N-LOS — відсутність вимог до вирівнювання, що ідеально для мобільних мереж або роїв роботів. Однак це досягається ціною величезних втрат потужності та сильної

міжсимвольної інтерференції, що різко обмежує дальність (до кількох метрів) та швидкість передачі даних [11].

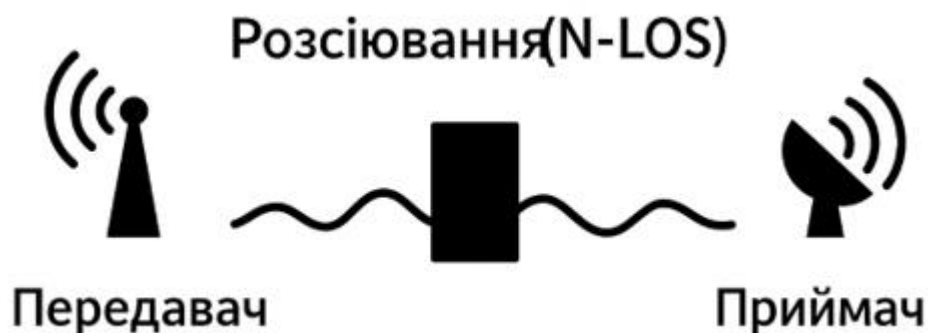


Рисунок 2.4 – Схематичне зображення каналу зв'язку за рахунок розсіювання (N-LOS)

Третім типом є рефлекторні (відбиті) системи, що є гібридом між LOS та N-LOS і використовують відбиття світлового променя від якої-небудь поверхні. Як відбивач може використовуватися поверхня води (при спокійній воді), дно або спеціальний пасивний рефлектор, встановлений на іншому об'єкті (рис. 2.5). Це дозволяє обходити перешкоди та розширювати зону покриття, але призводить до значних втрат потужності при відбитті та чутливості до стану відбиваючої поверхні (наприклад, хвилювання води) [11].

## Відбиття від поверхні (рефлекторний канал зв'язку)

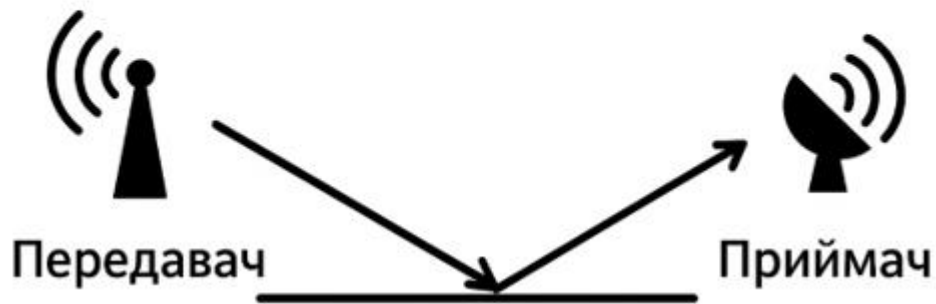


Рисунок 2.5 – Схема рефлекторного каналу зв'язку  
(на прикладі відбиття від поверхні)

Для забезпечення надійного зв'язку критично важливо, щоб потужність оптичного сигналу, що надходить на фотодетектор приймача ( $P_{Rx}$ ), перевищувала його поріг чутливості ( $S_{sens}$ ). Цей баланс описується рівнянням дальності (Link Equation), яке враховує всі джерела втрат у системі.

Потужність на приймачі  $P_{Rx}$  можна виразити як функцію від потужності передавача  $P_{Tx}$ , ефективності компонентів та втрат у каналі:

$$P_{Rx} = P_{Tx} \cdot \eta_x \cdot \eta_{Rx} \cdot L_{geo} \cdot L_{water} \cdot L_{sys}, \quad (2.4)$$

де  $\eta_{Tx}, \eta_{Rx}$  – оптична ефективність (ККД) передавальної та приймальної систем (включає втрати на лінзах, фільтрах, склі гермобоксу);

$L_{geo}$  – геометричні втрати (втрати через розходження пучка);

$L_{water}$  – втрати на поглинання та розсіювання у воді (закон Бера-Ламберта);

$L_{sys}$  – системний запас (system margin), що враховує непередбачувані втрати (забруднення скла, старіння компонентів).

Аналіз геометричних втрат ( $L_{geo}$ ). Геометричні втрати є одним з найбільш вагомих факторів зниження потужності, особливо для систем з великою відстанню. Навіть у абсолютно прозорій воді пучок світла розширюється з відстанню.

Для лазерного пучка з гаусовим розподілом інтенсивності та кутом розходження  $\theta$  (у радіанах), площа плями засвічення на відстані  $z$  становить приблизно  $\pi \left(z \frac{\theta}{2}\right)^2$ . Якщо площа апертури приймача  $A_{Tx}$  менша за площу плями пучка, то приймач вловлює лише частину енергії. Геометричні втрати можна оцінити як відношення площ:

$$L_{geo} = \frac{A_{Rx}}{A_{beam}(z)} \approx \frac{D_{Rx}^2}{(z \cdot \theta)^2}, \quad (2.5)$$

де  $D_{Rx}$  – діаметр апертури приймача.

З формули видно, що втрати зростають пропорційно квадрату відстані ( $1/z^2$ ). Для N-LOS систем, де світло випромінюється сферично, геометричні втрати є ще більшими і розраховуються як відношення площі приймача до площі сфери радіусом  $z$ .

Аналіз втрат у середовищі ( $L_{water}$ ). Як було розглянуто в підроз. 2.2, ці втрати мають експоненційний характер:

$$L_{water} = \exp(-c(\lambda)z). \quad (2.6)$$

Це додає до рівняння дальності експоненційний множник, який домінує на великих дистанціях. Наприклад, у каламутній воді ( $c \approx 1,0\text{м}^{-1}$ ) кожний метр шляху зменшує потужність сигналу в  $e \approx 2,7$  рази.

Об'єднуючи вищенаведені фактори, отримуємо повне рівняння для розрахунку потужності на вході фотодетектора:

$$P_{Rx}(z) = P_{Tx} \eta_{opt} \frac{A_{Rx}}{\pi \left( z \cdot \frac{\theta}{2} \right)^2} \cdot \exp(-c(\lambda)z). \quad (2.7)$$

Це рівняння дозволяє інженеру розрахувати максимальну дальність зв'язку  $z_{max}$  для заданої потужності передавача та чутливості приймача, або ж визначити необхідну потужність лазера для досягнення заданої дальності. Важливим є те, що через експоненційний характер загасання, просте збільшення потужності лазера дає лише незначний приріст дальності (логарифмічна залежність), що робить оптимізацію чутливості приймача та вибір довжини хвилі більш пріоритетними завданнями [12].

#### 2.4 Елементна база оптичних систем зв'язку

Для практичної реалізації підводного оптичного зв'язку необхідні два ключові вузли: передавальний модуль Tx та приймальний модуль Rx. Набір компонентів, що використовуються в цих модулях, безпосередньо визначає бюджет потужності системи (розрахований у підроз.2.3) та граничну швидкість передачі даних (рис. 2.6).

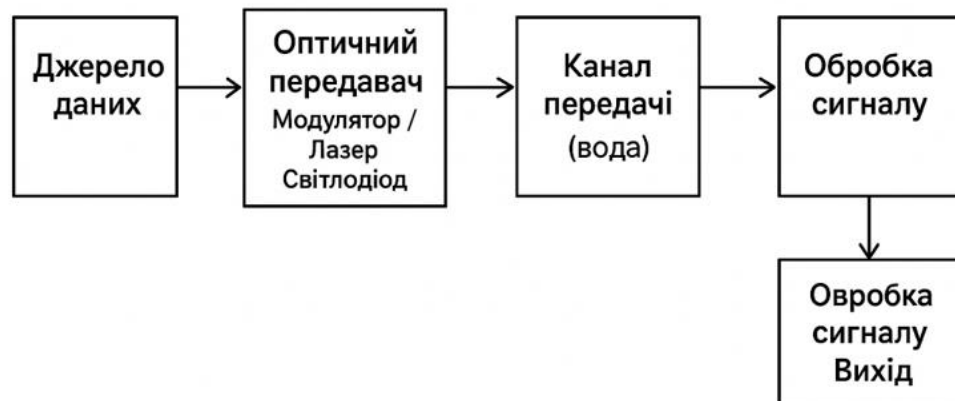


Рисунок 2.6 – Блок-схема компонентів типової системи UWOC

Ключовим елементом передавача є джерело оптичного випромінювання. Воно повинно працювати у «вікні прозорості» води (від 450 нм до 550 нм) та мати здатність до швидкої модуляції. У сучасних системах домінують два типи: світлодіоди (LED) та лазерні діоди (LD). Світлодіоди (LED) є некогерентними, джерелами з відносно широкою спектральною смугою ( $\Delta\lambda \approx 20 - 40$  нм). Вони мають широку діаграму спрямованості, що робить їх ідеальними для систем N-LOS та зв'язку на малих дистанціях. Головним обмеженням LED є низька смуга пропускання модуляції (зазвичай до 100–200 МГц), що обмежує швидкість передачі даних [12].

Лазерні діоди генерують когерентне випромінювання з вузькою спектральною шириною ( $\Delta\lambda < 5$  нм) та малим кутом розходження. Це дозволяє ефективно вводити випромінювання в оптичні системи та передавати енергію на великі відстані. Сучасні сині/зелені лазерні діоди (на основі GaN/InGaN) підтримують пряму модуляцію струмом на швидкостях до декількох геггерц. Лазерні діоди (LD) є когерентними, генерують вузький промінь високої інтенсивності та здатні до модуляції на надвисоких швидкостях (гегабіт на секунду і вище). Вони є стандартом для високопродуктивних LOS-систем, але вимагають точного наведення та є дорожчими (таблиця 2.2) [12].

Таблиця 2.2 – Порівняння LED та лазерних діодів (LD) для UWOC

Характеристика	Світлодіод (LED)	Лазерний діод (LD)
Когерентність	Некогерентне	Когерентне
Спектральна ширина	Широка (20 – 40 нм)	Дуже вузька (< 5 нм)
Діаграма спрямованості	Широка (30°– 120°)	Дуже вузька (< 1°)
Швидкість модуляції	Помірна (до ~500 Мбіт/с)	Висока (Гбіт/с і вище)
Вимоги до наведення	Низькі (ідеально для N-LOS)	Дуже високі (тільки для LOS)
Вартість та складність	Низька	Висока

На стороні приймача критичним завданням є перетворення слабкого оптичного потоку фотонів у електричний струм з мінімальним додаванням шуму. Використовуються три основні типи детекторів.

1. PIN-фотодіоди: найпростіший тип детектора з  $p$ - $i$ - $n$  структурою. Вони мають квантову ефективність  $\eta \approx 0,6 - 0,8$ , але не мають внутрішнього підсилення (коефіцієнт множення  $M = 1$ ). Це обмежує їх використання системами з високим рівнем сигналу.

2. Лавинні фотодіоди (Avalanche Photodiode, APD): використовують ефект лавинного пробою для створення внутрішнього підсилення фотоструму. Коефіцієнт множення може досягати  $M = 100$ , що значно підвищує чутливість. APD є стандартом для далеkobійних систем UWOC.

3. Однофотонні лавинні діоди (SPAD): працюють у режимі Гейгера (вище напруги пробою), що дозволяє реєструвати окремі фотони. SPAD-масиви (SiPM) забезпечують теоретичну межу чутливості, дозволяючи встановлювати зв'язок на екстремальних дистанціях (до 100–200 м), де сигнал загасає до рівня окремих фотонів.

Якість відновлення сигналу визначається Співвідношенням Сигнал/Шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR). На відміну від ідеальних умов, реальний фотодетектор генерує шум, який має кілька складових. Струм на виході детектора  $i(t)$  можна описати як:

$$i(t) = I_{signal}(t) + I_{noise}(t), \quad (2.8)$$

де корисний струм  $I_{signal} = RP_{rx}$  ( $R$  – чутливість фотодіода, А/Вт).

Потужність шуму (дисперсія струму шуму  $\sigma^2$ ) складається з трьох незалежних компонентів:

- 1) дробовий шум виникає через дискретну (квантову) природу світла та електричного заряду. Він залежить не тільки від корисного сигналу, але й

від фонового засвічення (сонячного світла, що проникає у товщу води) та темного струму.

$$\sigma_{shot}^2 = 2qM^2F(M)(I_{signal} + I_{background} + I_{dark})B \quad (2.9)$$

де  $q$  – елементарний заряд елементарний заряд ( $1,6 \times 10^{-19}$  Кл);

$M$  – коефіцієнт лавинного множення (для PIN  $M = 1$ );

$F(M)$  – коефіцієнт надлишкового шуму лавини (для APD);

$I_{background}$  – струм, викликаний фоновим сонячним світлом;

$B$  – смуга пропускання приймача, Гц.

Важливо зазначити, що у приповерхневих шарах води вдень домінуючим фактором є саме  $I_{background}$ , що робить сонячне світло головною завадою для UWOC.

2) тепловий шум (або шум Джонсона-Найквіста) генерується тепловим рухом електронів у навантажувальному резисторі  $R_L$  та електронних компонентах підсилювача. Він не залежить від оптичного сигналу:

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{4k_B T B}{R_L} F_n, \quad (2.10)$$

де  $k_B$  – стала Больцмана;

$T$  – абсолютна температура (К);

$R_L$  – опір навантаження;

$F_n$  – коефіцієнт шуму підсилювача.

3) темновий струм – це струм, що протікає через фотодіод навіть за відсутності освітлення через термогенерацію носіїв заряду. Він врахований у формулі дробового шуму як  $I_{dark}$ . Об'єднуючи всі компоненти, електричне співвідношення сигнал/шум для системи з APD можна записати як:

$$SNR = \frac{(MRP_{rx})^2}{2qM^2F(M)(RP_{rx}+I_{bg}+I_{dark})B+\frac{4k_BTB}{R_L}} \quad (2.11)$$

Аналіз цього рівняння дозволяє виділити два режими роботи системи:

1) режим обмеження дробовим шумом (Quantum limit): коли сигнал сильний або фонове засвічення значне (день, мала глибина). У цьому випадку SNR лінійно залежить від потужності сигналу.

2) режим обмеження тепловим шумом (Thermal noise limit): коли сигнал дуже слабкий (велика глибина, ніч) і використовується PIN-діод без підсилення. У цьому випадку  $SNR \propto P_{rx}^2$ , що робить систему менш ефективною. Саме тому використання APD (де  $M \gg 1$ ) дозволяє подолати тепловий поріг і значно підвищити дальність зв'язку.

Розуміння природи цих шумів дозволяє інженерам застосовувати методи оптичної фільтрації (для зменшення  $I_{bg}$ ) та цифрові алгоритми корекції помилок (FEC), які будуть розглянуті в наступному розділі.

## 2.5 Методи підвищення ефективності оптичного зв'язку

Попередній аналіз фізичних обмежень каналу (згасання, розсіювання, турбулентність та шуми) вказує на те, що досягнення високих швидкостей передачі даних (Гбіт/с) на значних відстанях неможливе лише за рахунок збільшення потужності лазера. Необхідне застосування комплексних методів обробки сигналу на трьох рівнях: модуляції, просторової стабілізації та каналного кодування.

Попередній аналіз фізичних обмежень каналу (згасання, розсіювання, турбулентність та шуми) вказує на те, що досягнення високих швидкостей передачі даних (Гбіт/с) на значних відстанях неможливе лише за рахунок збільшення потужності лазера. Необхідне застосування комплексних методів

обробки сигналу на трьох рівнях: модуляції, просторової стабілізації та каналного кодування.

### 1. Амплітудна маніпуляція (OOK - On-Off Keying).

Найпростіший метод, де біт «1» кодується наявністю імпульсу світла, а «0» – його відсутністю.

Переваги: простота реалізації приймача та передавача.

Недоліки: низька енергоефективність (передавач працює 50 % часу в середньому). Поріг вирішення на приймачі сильно залежить від рівня сигналу, який постійно «плаває» через турбулентність, що вимагає адаптивних алгоритмів порогу.

### 2. Імпульсно-позиційна модуляція (L-PPM – Pulse Position Modulation).

У PPM час ділиться на кадри, кожен з яких містить  $L$  часових слотів. Символ кодується положенням одного імпульсу в одному з  $L$  слотів.

Переваги: висока енергоефективність. Для передачі  $\log_2 L$  біт використовується лише один короткий імпульс. Наприклад, у 16-PPM передається 4 біти за один спалах лазера. Це ідеально для автономних підводних апаратів (AUV), де запас енергії батареї критичний.

Недоліки: вимагає ширшої смуги частот та точної синхронізації годинників передавача і приймача.

### 3. Багаточастотна модуляція (OFDM - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)

Типова залежність BER від SNR для різних схем модуляції показана на рис. 2.7. Для боротьби з міжсимвольною інтерференцією (ISI), викликаною багатопробним поширенням у каламутній воді, використовують оптичний OFDM. Високошвидкісний потік даних розбивається на сотні повільних підпотоків, кожен з яких модулює свою піднесучу частоту. Оскільки світло не може мати від'ємну інтенсивність (на відміну від радіосигналу), використовуються

модифікації DCO-OFDM (з постійним зміщенням) або ACO-OFDM (асиметрично обмежений) [13].

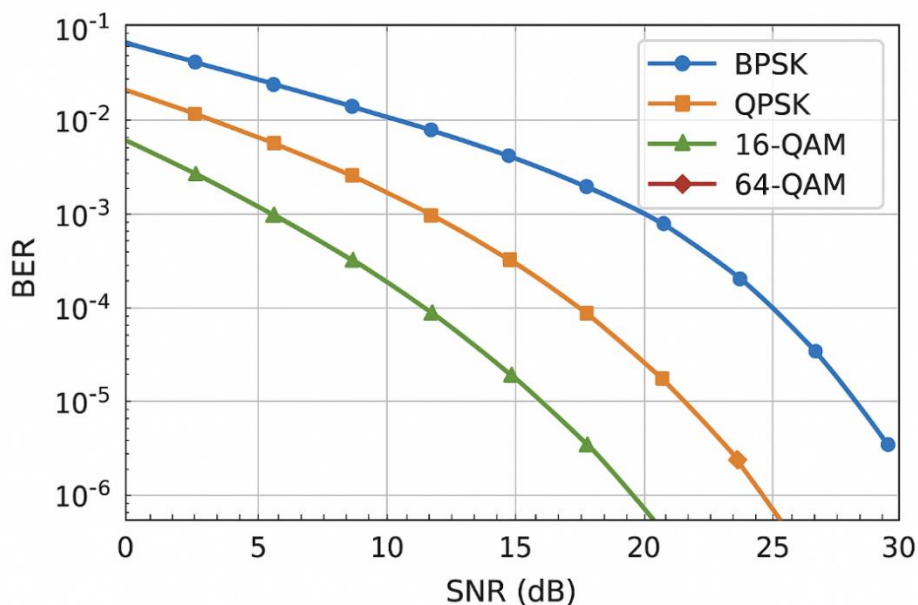


Рисунок 2.7 – Типова залежність BER від SNR для різних схем модуляції

Для систем прямої видимості (LOS), де використовуються вузькі лазерні пучки, критичним завданням є підтримка оптичного контакту між рухомими підводними об'єктами. Система ПАТ (Pointing, Acquisition, and Tracking) реалізує цей процес у три етапи:

1) наведення (Pointing) та Сканування: за відсутності зв'язку передавач починає сканувати зону невизначеності (uncertainty cone), де ймовірно знаходиться приймач. Використовуються алгоритми спірального або растрового сканування. Для швидкого відхилення променя застосовуються MEMS-дзеркала або п'єзоелектричні дефлектори, які мають малу інерційність порівняно з механічними підвісами;

2) захоплення (Acquisition): коли приймач детектує сигнал сканування, він відправляє зворотний сигнал-відповідь (через низькошвидкісний акустичний

канал або широкий світлодіодний промінь). Після підтвердження "рукостискання" обидві сторони зупиняють сканування і фіксують положення;

3) супровід (Tracking): активний режим, що компенсує вібрації та рух платформ. Частина прийнятого світла відводиться на позиційно-чутливий детектор (квадрантний фотодіод – QPD або камеру). Якщо пляма світла зміщується від центру, система автоматичного регулювання (PID-регулятор) подає сигнал на приводи для корекції кута нахилу дзеркал, утримуючи зв'язок стабільним.

Підводний оптичний канал характеризується нестабільністю: рівень сигналу може різко падати через турбулентність або перекриття променя зграєю риб чи бульбашками. Це призводить до виникнення пакетних помилок (burst errors), коли втрачається цілий блок даних. Для їх виправлення без повторної передачі (ARQ), яка є неефективною через затримки, застосовують FEC:

1) коди Ріда-Соломона (RS): Є стандартом для боротьби з пакетними помилками. Вони працюють з символами (групами біт), а не окремими бітами, що дозволяє виправляти довгі серії пошкоджених даних;

2) LDPC (Low-Density Parity-Check): Сучасні коди, що дозволяють працювати на межі пропускної здатності каналу (межа Шеннона). Вони ефективні проти випадкового шуму (дробового та теплового), але чутливі до пакетних втрат, тому часто використовуються у каскаді з кодами Ріда-Соломона.

Використання FEC додає надлишковість (overhead), зазвичай від 7 % до 25 %, але дозволяє знизити вимоги до SNR на 5–8 дБ, що еквівалентно льщенню дальності зв'язку від 10 м до 20 м [13].

### 3 ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОПЛІВКОВОГО ФІЛЬТРА-ДЗЕРКАЛА

#### 3.1 Теоретичні основи розрахунку багат шарових середовищ

Під поняттям шаруватого середовища розуміють фізичну структуру, в якій характеристики матеріалу є постійними в будь-якій площині, перпендикулярній до фіксованого напрямку, і змінюються лише вздовж цього напрямку (осі  $z$ ).

Процес поширення електромагнітної хвилі в такій системі зручно описувати, розкладаючи вхідну плоску хвилю на дві незалежні складові (моди): з  $E$ -поляризацією та  $H$ -поляризацією. Математичний зв'язок між векторами електричного ( $E$ ) та магнітного ( $H$ ) полів на границях досліджуваного шару (координати  $a$  та  $b$ ) описується наступним співвідношенням:

$$\begin{pmatrix} E(a) \\ H(a) \end{pmatrix} = M_{ab} \begin{pmatrix} E(b) \\ H(b) \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

Щоб оцінити роботу оптичної системи, розраховують її амплітудні коефіцієнти відбиття ( $r$ ) та пропускання ( $t$ ). Для багат шарової системи (мультишару) ці параметри визначаються через елементи матриці переходу та показники заломлення середовищ ( $n$ ):

$$r = \frac{m_{11}n_0 + m_{12}n_0n_s - m_{21} - m_{22}n_s}{m_{11}n_0 + m_{12}n_0n_s + m_{21} + m_{22}n_s} \quad (3.2)$$

$$t = \frac{2n_0}{m_{11}n_0 + m_{12}n_0n_s + m_{21} + m_{22}n_s}, \quad (3.3)$$

де  $n_0$  – показник заломлення середовища, звідки падає світло;

$n_s$  – показник заломлення підкладки.

Особливий інтерес становить бреггівське дзеркало. Це конструкція з періодичним чергуванням матеріалів, де кожен шар має оптичну товщину, рівну

чверті робочої довжини хвилі ( $\lambda/4$ ). Умова резонансу для такої структури має вигляд:

$$n_i d_i = \frac{\lambda}{4}. \quad (3.4)$$

Для таких періодичних структур розрахунок значно простіший. Спочатку знаходиться матриця для однієї плівки товщиною  $d$  і показником заломлення  $n$ :

$$M(n, d, \lambda) = \begin{pmatrix} \cos \delta & \frac{i}{n} \sin \delta \\ in \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

А потім, щоб отримати характеристику всього дзеркала, матрицю однієї пари шарів підносять до степеня  $k$  (кількість періодів):

$$M_{total} = (M_{pair})^k. \quad (3.6)$$

Схема такої структури з чергуванням матеріалів з різними коефіцієнтами заломлення показана на рис. 3.1.

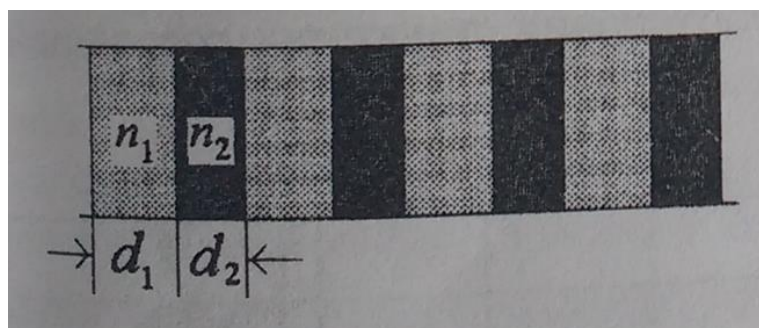


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення структури брегівського дзеркала

### 3.2 Розрахунок параметрів фільтра-дзеркала для приймального модуля

У рамках роботи було спроектовано комбінований оптичний вузол — фільтр-дзеркало. Його завдання полягає у зборі та фокусуванні вхідного випромінювання на фотодетектор із одночасною фільтрацією сигналу.

Для реалізації цієї задачі обрано схему з використанням фокусуєчого дзеркала з інтерференційним покриттям. Така конструкція дозволяє направити пучок світла на детектор без використання додаткових лінз [14]. Спеціальне багат шарове покриття дзеркала забезпечує вибіркоче відбиття: воно ефективно відбиває лише корисний сигнал на робочій довжині хвилі (470 нм), тоді як фонове випромінювання та шуми проходять крізь підкладку або поглинаються.

Схематичне зображення принципу роботи розробленого вузла наведено на рис. 3.2.

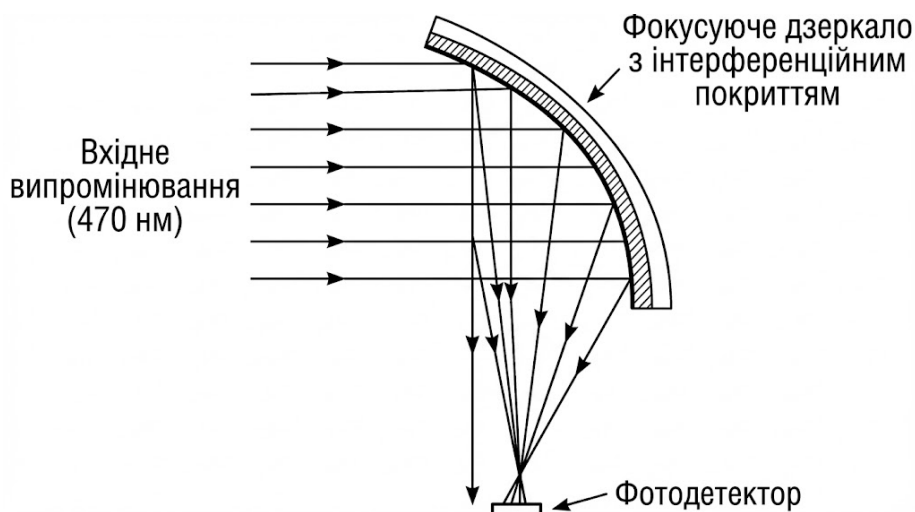


Рисунок 3.2 – Оптична схема приймального модуля з параболічним фільтром-дзеркалом

Схема ілюструє роботу комбінованого вузла. Увігнуте дзеркало з селективним покриттям виконує подвійну функцію: фокусує вхідний корисний сигнал (470 нм) на фотодетектор та відфільтровує небажане фонове випромінювання.

Моделювання спектральних характеристик проводилося для джерела випромінювання з довжиною хвилі 470 нм (вікно прозорості морської води). Розрахунок базувався на наведених вище формулах для наступної структури:

- формула шарів:  $(H \cdot L)^{40}$ , (40 пар шарів);
- матеріали:  $SiO_2$  (показник заломлення 1,45) та (показник заломлення 1,55);
- підкладка: оптичне скло ( $n_{sub} = 1,52$ ).

Використання матеріалів з близькими показниками заломлення у поєднанні з великою кількістю шарів дозволило отримати вузьку смугу пропускання, що є критично важливим для виділення слабкого корисного сигналу (рис. 3.3).

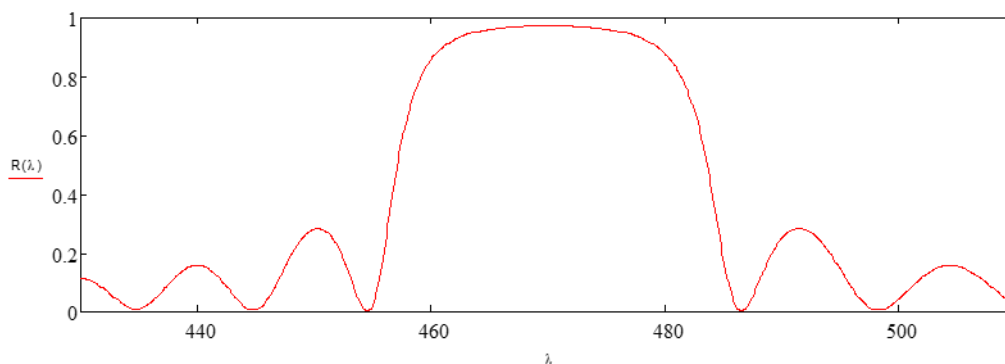


Рисунок 3.3 – Розрахунковий спектр відбиття вузькосмугового дзеркала на довжині хвилі 470 нм ( $N = 40$  пар шарів)

### 3.3 Проектування двосмугової системи

Враховуючи, що умови підводного зв'язку (каламутність, наявність органічних сполук) можуть змінюватися, рівень сигналу на одній довжині хвилі може суттєво падати. Для підвищення надійності системи доцільно використовувати передачу даних на кількох частотах.

У зв'язку з цим було проведено розрахунок складного фільтра-дзеркала, що працює одночасно на двох довжинах хвиль: 470 нм та 750 нм.

Параметри розрахованої структури:

- кількість шарів: структура типу  $(L \cdot H)^{150}$ ;
- матеріали: оптимізована пара з показниками заломлення 1,45 та 1,48;
- підкладка: оптичне скло ( $n_{sub} = 1,52$ ).

Зменшення оптичного контрасту матеріалів разом зі збільшенням кількості періодів до 150 дозволило досягти необхідної селективності (вузьких піків відбиття) для обох спектральних каналів (рис. 3.4).

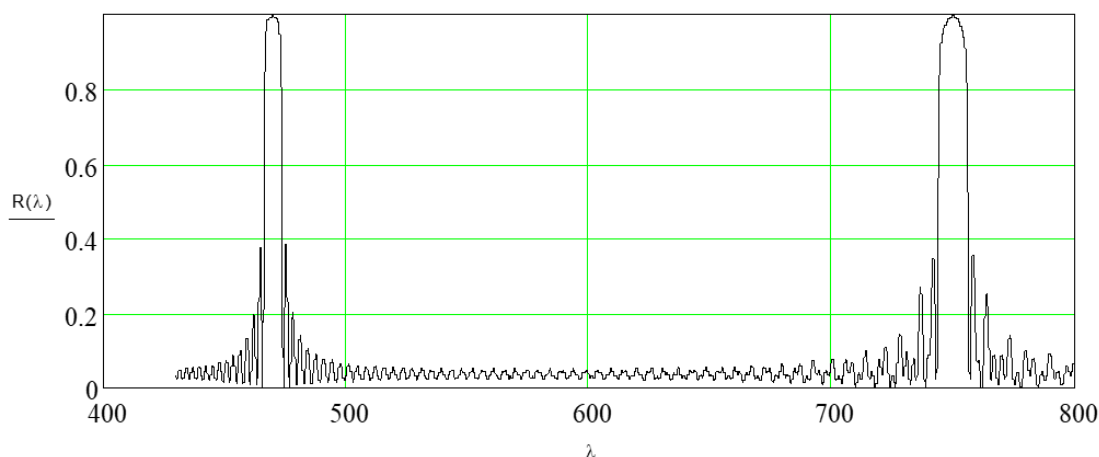


Рисунок 3.4 – Розрахунковий спектр відбиття двосмугового дзеркала для довжин хвиль 470 нм та 750 нм

На отриманому графіку спостерігаються два чітко виражені максимуми відбиття. Така характеристика дозволяє використовувати одну оптичну систему для одночасного прийому сигналів у синьо-зеленому та ближньому інфрачервоному діапазонах, що значно розширює функціональні можливості приймального модуля.

## ВИСНОВКИ

У роботі досліджено проблематику побудови систем підводного оптичного зв'язку (UWOC). Встановлено, що головними факторами, які обмежують дальність передачі даних, є загасання сигналу та вплив фонових шумів водного середовища. Визначено, що найбільш ефективним методом підвищення завадостійкості приймального модуля є застосування вхідних інтерференційних фільтрів.

У першому розділі виконано порівняльний аналіз існуючих технологій підводного зв'язку. Підтверджено переваги оптичних систем синьо-зеленого спектра (450–550 нм) для швидкісної передачі інформації. Сформульовано технічні вимоги до приймальних модулів, які мають забезпечувати стабільний прийом сигналу в умовах низького співвідношення сигнал/шум.

У другому розділі проаналізовано фізичні процеси поширення світла у воді та вплив розсіювання. Обґрунтовано вибір елементної бази, зокрема джерел випромінювання (світлодіоди та лазери) та фотоприймачів. Теоретично доведено необхідність попередньої спектральної фільтрації сигналу перед його реєстрацією фотодетектором.

Третій розділ присвячено розрахунку конструктивних параметрів інтерференційних фільтрів-дзеркал на основі пари матеріалів  $SiO_2$  та  $Si_2O_3$ . Розроблено та проаналізовано дві схеми: вузькосмуговий фільтр для роботи зі світлодіодним джерелом (470 нм) та двосмугове багат шарове дзеркало для багатоканальних систем, що працюють у видимому (470 нм) та ближньому інфрачервоному (750 нм) діапазонах.

За результатами чисельного моделювання спектральних характеристик підтверджено працездатність запропонованих рішень. Отримані графіки демонструють високий коефіцієнт відбиття (близько 90 %) у робочих зонах та ефективно відсікання завад, що дозволяє рекомендувати розроблені фільтри для використання у реальних системах підводного зв'язку.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. An Introduction to Underwater Communications. URL: <https://www.marinetechologynews.com/articles/marinetechnology/introduction-to-underwater-communications-100052> (дата звернення 10.10.2025).
2. Al-Zhrani S., Bedaiwi N. M., El-Ramley I. F., Barasheed A. Z., Abduldaiem A. et al. Underwater Optical Communications : A Brief Overview and Recent Developments. *Eng. Sci.* 2021. Vol. 16. P. 146–186.
3. Кухтін С., Федоренко Є.. Особливості сучасних систем передачі даних відкритими оптичними трасами. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем MEICS-2024* : 9 Всеукраїнська науково-практична конференція, 27-29 листопада 2024. м. Дніпро, Україна, С. 172–173.
4. Kaushal H., Kaddoum G. Underwater Optical Wireless Communication. *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. P. 1518–1547.
5. Zeng Z., Fu S., Zhang H., Dong Y., Zhou J. A survey of underwater optical wireless communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017. Vol. 19, No 1. P. 204–238.
6. Underwater Optical Wireless Communications / ed. S. Arnon. Cambridge : Cambridge University Press, 2012.
7. Mobley C. D. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters. San Diego, CA : Academic Press, 1994.
8. Jaruwatanadilok S. Underwater wireless optical communication channel modeling and performance evaluation using photon tracing. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2008. Vol. 26, No 9. P. 243–266.
9. Gabriel C., Khalighi M. A., Bourennane S., Leon P., Rigaud V. Channel modeling for underwater optical communication : 2013 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP).

10. Arvanitakis G. N. et al. Experimental Investigation of Non-Line-of-Sight Underwater Optical Wireless Communication. *Journal of Lightwave Technology*. 2020. Vol. 38, No 19. P. 543–578.
11. Doniec M. W., Rus D. Using reflections to extend the range of underwater optical communication : 2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV). IEEE, 2010.
12. Oubei H. M. et al. 2.3 Gbit/s underwater wireless optical communications using a 520 nm laser diode. *Optics Express*. 2015. Vol. 23, No 16. P. 207–224.
13. Johnson L. K. et al. Component characterization and validation for underwater optical communications. *Journal of Optical Engineering*. 2013.
14. Кухтін С.М., Гнатенко О.С. Волоконно-оптичний сенсор те з брегівською структурою температури. *Ж. нано- електрон. Фіз.* 2023. Т. 15. № 5  
URL: [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(5\).05027](https://doi.org/10.21272/jnep.15(5).05027) (дата звернення 14.11.2025).