

DOI: 10.18372/2310-5461.67.20239
УДК 621.391.8

А. О. Янушевський, аспірант
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Orcid.org/0009-0001-9462-9517
e-mail: Anton.Yanushevskyi@gmail.com;

О. В. Коржик, д-р техн. наук, професор
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Orcid.org/0000-0001-6793-1676
e-mail: avkorzhyk@gmail.com

ПРОБЛЕМАТИКА ЕФЕКТИВНОГО АКУСТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ У ПІДВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ (ОГЛЯД)

Вступ

Комерційне видобування морських ресурсів, розвиток підводних досліджень за допомогою автономних підводних апаратів (АПА) та дистанційно керованих підводних апаратів (ДКПА), зв'язок з підводними човнами та військовими підводними дронами, моніторинг підводної активності, сейсмічний моніторинг та попередження цунамі, сенсори для контролю стану підводних трубопроводів, нафтових платформ та морських ферм, розробки підводного інтернету речей потребують не тільки надійного, а й швидкісного бездротового зв'язку.

Найбільш розвинутий та розповсюджений спосіб бездротового зв'язку – за допомогою електромагнітних хвиль – знаходить досить обмежене використання для організації підводного зв'язку через суттєве затухання радіосигналу у воді. Відстань, на яку можливе використання електромагнітного зв'язку під водою, зазвичай не перевищує 10 м [1].

Підводний оптичний зв'язок, використовуючи надвисокі частоти, пропонує швидкість передачі до гігабіт за секунду і низькі затримки, не потребує великої потужності передавача, але через високі оптичні втрати, залежність від прозорості води і перешкоди від морських організмів також не є придатним для організації підводного зв'язку на великі відстані. Типовий діапазон застосування систем підводного оптичного зв'язку не перевищує 100 метрів [2]. Додатково можемо відмітити таку особливість оптичного лазерного зв'язку, як вузька спрямованість сигналу. Сучасні системи підводного оптичного зв'язку зазвичай використовують лазери у синьо-зеленому спектрі (довжини хвиль між 470–550 нм), оскільки ці довжини хвиль зазнають мінімальних втрат енергії під час

передачі під водою з коефіцієнтом затухання приблизно 0,39 дБ/м. Дослідження і розробка систем підводного оптичного зв'язку активно проводяться з 1992 року.

Єдиним придатним і універсальним способом для організації підводного зв'язку на відстанях від сотень метрів до одиниць і десятків кілометрів досі залишається акустичний зв'язок. Станом на сьогодні саме він забезпечує найбільшу дальність передачі сигналу у водному середовищі, хоч і суттєво поступається іншим методам за швидкістю та затримкою передачі даних. Підводний акустичний канал лишається основою для зв'язку з підводними човнами, між автономними підводними апаратами, гідрографічними станціями та морськими системами моніторингу.

Постановка проблеми

Підводний акустичний зв'язок (ПАЗ) залишається критично важливим інструментом для обміну інформацією з та між об'єктами, що функціонують у водному середовищі – зокрема, підводними човнами, ДКПА та АПА, сенсорними вузлами, морськими платформами та береговими станціями. Незважаючи на помітний прогрес у галузі, існує низка фундаментальних проблем, які обмежують ефективність і надійність таких систем у реальних умовах.

Насамперед складність самого підводного середовища передачі створює значні виклики. ПАЗ, особливо в мілководних районах, стикається з серйозними проблемами, такими як реверберація, численні відбиття сигналу від дна і поверхні (ефект мультишляху), частотне-вибіркове загасання, зміна частоти та розширення спектру у разі руху об'єктів ПАЗ через низьку швидкість поширення звуку у воді (що обумовлює помітно виражений ефект Доплера), які призводять до інтерференцій, фазових зміщень та спотворень сигналу.

Під мілководними районами у статті розуміються прибережні та шельфові ділянки морів та океанів з глибинами до 200 м, як найбільш цікаві ділянки з точки зору промислової діяльності (видобуток нафти, газу, мінералів) та типові для охоронної діяльності прикордонних служб.

Швидкість поширення звуку у воді залежить від температури, тиску та солоності, що спричиняє нерівномірність акустичного каналу. Усе це суттєво ускладнює процес декодування інформації, особливо за умов фонових шумів як природного (хвилювання, дощ, біологічні джерела), так і антропогенного походження (двигуни суден, гідролокатори, бурові установки тощо).

Наслідком цих фізичних обмежень є характерна для ПАЗ порівняно низька швидкість передачі даних. У більшості випадків вона становить від кількох сотень бітів до десятків або сотень кілобіт на секунду, залежно від використаної технології, дальності зв'язку та умов середовища. Наприклад, при зв'язку на великі відстані (кілька кілометрів) часто доводиться обмежуватися частотами до 10–15 кГц і швидкостями передачі менше ніж 1 кбіт/с. У таблиці 1 наведено параметри існуючих типових комерційних зразків підводних акустичних модемів, а також одного експериментального прототипу.

Таблиця 1

Модеми для цифрового підводного акустичного зв'язку

Назва	Модуляція	Несуча частота, кГц	Робоча полоса частот, кГц	Швидкість передачі даних, біт/с	Потужність споживання передавача, Вт	Потужність споживання приймача, Вт	Споживання в режимі очікування, мВт	Максимальна дальність, м
LinkQuest UWM2000 [3]	н/д	35,695	17,85	17800	2	0.8	8	1500
LinkQuest UWM1000 [4]	н/д	10	5	5000	40	0.8	9	1000
TriTech Micron-Modem [5]	н/д	24	8	40–100	3,5	0,28	н/д	500
Desert Star Systems SAM-1 [6]	н/д	37,5	8,2	23	32	0,168	н/д	250
Дослідницький прототип [7]	FSK	35	6	200	0,75	н/д	35	350

З даних наведених у таблиці видно, що навіть для дальності передачі даних від сотень метрів до 1–1,5 км швидкість передачі даних, зазвичай, не перевищує декілька десятків кбіт/с.

Ще однією важливою групою проблем є енергетичні та конструктивні обмеження. Умови експлуатації автономних морських апаратів, а особливо – морських сенсорів, не дозволяють використовувати габаритну та енерговитратну апаратуру, тому модеми мають бути компактними, енергоефективними та здатними працювати в широкому діапазоні умов. У той же час передавання сигналів на великі відстані потребує суттєвої потужності, що обмежує автономність і час місії таких систем.

Крім того, у сфері ПАЗ практично відсутні універсальні стандарти – станом на 2024 р. є тільки один міжнародний стандарт цифрового підводного зв'язку – JANUS [8], розроблений у рамках НАТО Центром морських досліджень і експериментальних розробок (CMRE). Він був формалізований у березні 2017 року як STANAG4748 і слугує базовим протоколом цифрового зв'язку між підводними системами – як військовими, так

і цивільними. Тому кожен виробник реалізує власні протоколи і способи модуляції, що ускладнює інтеграцію обладнання у багатокомпонентні гетерогенні системи.

Особливо гостро ця проблема проявляється в умовах прибережної зони, де різноманітність підводних пристроїв і мереж, що належать різним організаціям, призводить до конфліктів сумісності та взаємодії. Через відсутність єдиних стандартів забезпечення ефективного і надійного зв'язку різними системами стає вкрай складним, що також ускладнює координацію спільних операцій, дослідницьких проєктів та екологічного моніторингу у цих регіонах.

Таким чином, сучасні проблеми підводного акустичного зв'язку прямо пов'язані з практичними викликами – від розвідки морських ресурсів і екологічного моніторингу до побудови автономних роботизованих систем та забезпечення морської безпеки. Їх подолання вимагає міждисциплінарного підходу, поєднання досягнень гідроакустики, обробки сигналів та технологій зв'язку нового покоління.

Ця стаття присвячена огляду особливостей розповсюдження акустичних сигналів у підводному середовищі в мілководних районах, які потрібно враховувати при розробці та побудові систем підводного зв'язку, наявних технологій для підвищення ефективності систем підводного акустичного зв'язку, аналізу різних підходів та визначення перспективних напрямків подальшого розвитку систем підводного акустичного зв'язку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перші системи підводного акустичного зв'язку з'являються приблизно у 1950-х роках. Спочатку використовували амплітудну модуляцію, а потім модуляцію однієї бокової смуги. Ці системи призначалися для передавання голосових повідомлень в аналоговому вигляді. На початку 1980-х років з'являються перші системи передавання даних за допомогою підводного акустичного зв'язку [9], [10]. Такі системи [10] використовували передавання даних за допомогою багаточастотної маніпуляції – FSK (Frequency Shift Keying) – набір тонів на частотах між 45 та 55 кГц, а також додаткові службові сигнали: пілотний сигнал на частоті 60 кГц для коригування доплерівського зсуву та сигнал для синхронізації початку передавання кожного інформаційного повідомлення. Швидкість передавання даних становила 400 біт/с у горизонтальному каналі на відстані 800 м. Зауважимо, що в зазначену систему було закладено можливість коригування доплерівського зсуву для взаємного переміщення приймача і передавача зі швидкістю до 8 м/с.

Подальший розвиток систем цього типу відбувався у напрямі збільшення кількості тонів для частотної маніпуляції та використання коригувальних кодів для виправлення помилок. Частотна ефективність таких систем підводного зв'язку становила 0,24 біт/с/Гц.

З 1990-х років починають досліджувати і створювати системи підводного зв'язку на основі фазової маніпуляції сигналів, через що такі системи отримують назву когерентних. Розвиток продуктивності цифрових сигнальних процесорів у ці роки дозволив реалізувати досить складні алгоритми обробки сигналів. Хоча побудова когерентної системи зв'язку передбачає наявність опорного сигналу (локального генератора частоти), який узгоджується з прийнятим сигналом, перші системи підводного акустичного зв'язку з фазовою маніпуляцією використовували відносну фазову маніпуляцію PSK (Phase Shift Keying), коли фаза кожного символу задавалася відносно попереднього, тобто не залежала від абсолютного значення фази прийнятого сигналу. Такі системи отримали назву частково когерентних.

Описана в [11] система зв'язку з двійковою фазовою маніпуляцією BPSK (Binary PSK) та квадратурною фазовою маніпуляцією QPSK (Quadrature PSK), розроблена для Вдосконаленої Безекіпажної Пошукової Системи (Advanced Unmanned Search System), дозволяла обмін даними зі швидкістю 1200–4800 біт/с, використовуючи смугу частот 6 кГц, але лише за відсутності багатошляхового розповсюдження сигналу.

Запропонована в [12] система акустичного зв'язку для вертикального підводного каналу, використовуючи смугу частот 10 кГц, продемонструвала високу швидкість передавання даних до 20 кбіт/с при вірогідності бітової помилки 10^{-2} .

Розроблений прототип акустичної системи підводного зв'язку для дистанційного передавання зображень і команд між надводним судном та підводним роботом, оснований на системі з когерентним прийомом [13], показав швидкість 500 кбіт/с на відстані до 60 м з вірогідністю бітової помилки 10^{-7} . Для досягнення такої досить великої для підводного акустичного каналу швидкості передавання даних використовувалася 16-позиційна квадратурна амплітудна модуляція QAM16 (16-level Quadrature Amplitude Modulation). Система працювала на несучій частоті 1 МГц у смузі частот 250 кГц, використовувався перетворювач із вузькою діаграмою спрямованості та керуванням напрямом по зворотному каналу. Прийнятий сигнал складався з двох основних багатопромених компонентів: прямого сигналу та відбитого від поверхні, що надходив із затримкою в 11 символів. У приймальному каналі використовувався одноканальний еквалайзер з адаптивною обробкою, який приймав вибірки з періодом, що дорівнює тривалості одного символу. Алгоритм адаптації базувався на методі найменших квадратів, що дозволяло суттєво зменшити середньоквадратичну похибку фазової оцінки, а також знизити ймовірність виникнення бітових помилок з 10^{-4} до 10^{-7} .

У роботі [14] запропоновано алгоритм із використанням фазової синхронізації другого порядку з адаптивним еквалайзером. Використовувалися квадратурна фазова маніпуляція QPSK та 8-фазова маніпуляція 8-PSK. Тестування для трьох типів підводних акустичних каналів – велика відстань (110 морських миль) – глибоководний канал; велика відстань (48 морських миль) – мілководний канал; і коротка відстань (2 морські милі) – мілководний канал – показало швидкість передавання даних 660 біт/с, 1 та 10 кбіт/с відповідно при вірогідності помилки менше ніж 10^{-4} . У випадку мілководного каналу і короткої відстані вико-

ристовувалася несуча частота 15 кГц і смуга частот приблизно 5 кГц. Розглянута схема приймача – комбінація еквалайзера зі зворотним зв'язком за рішенням і фазової синхронізації другого порядку – є найпоширенішою схемою когерентного приймача.

Аналогічний за структурою приймач, але з використанням модуляції вищого порядку – 16-кватратурної амплітудної модуляції (16-QAM), показав швидкість прийому 32 кбіт/с на відстані 1500 м, частота несучої – 20 кГц, смуга пропускання – 8 кГц [15].

Когерентні системи підводного акустичного зв'язку дозволили ефективно боротися з міжсимвольною інтерференцією й досягти ефективності 2–4 біт/с/Гц за умови відсутності або мінімальних взаємних переміщень передавача й приймача. Відповідно до дослідження [16], доплерівські зсуви суттєво впливають на роботу когерентних систем, побудованих на схемі лінійного еквалайзера з фазовою синхронізацією, що вимагає внесення змін у приймач для їх компенсації. Для роботи в каналах із великими доплерівськими зсувами в [17], [18] запропоновано й досліджено приймач, який містить трекер каналу та лінійний декодер. Трекер працює на основі модифікованого алгоритму рекурсивних найменших квадратів, який використовує частотні фільтри – доплерівські лінії. Декодер застосовує коефіцієнти трекера каналу для виконання декодування за критерієм мінімальної середньоквадратичної помилки.

Основними недоліками систем з адаптивними еквалайзерами, які використовують секцію зворотного зв'язку за рішенням і фазову синхронізацію, є чутливість до динамічних змін сигналу для різних каналів зв'язку, а також зростання енергії шуму еквалайзера пропорційно до кількості його вагових коефіцієнтів. У разі каналів із великим часом реверберації це суттєво впливало на ефективність системи зв'язку та її обчислювальну складність.

Для компенсації цих недоліків було запропоновано кілька модифікацій класичного еквалайзера: розріджений еквалайзер (ефективний, коли значущими є лише деякі коефіцієнти фільтра, як у каналах із довгими затримками); сліпий еквалайзер (працює без навчальних послідовностей, адаптується на основі отриманих даних); турбо-еквалайзер (поєднує декодування зі зворотним зв'язком і еквалізацію, особливо ефективний зі згортковими кодами).

Запропоновані в роботі [19] модифікації класичного еквалайзера – використання розрідженого еквалайзера, в якому оновлення коефіцієнтів відбувається лише при перевищенні середньоквадратичною похибкою визначеного порогу, а також

у секції зворотного зв'язку – перехід від методу найменших квадратів до ефективніших методів оновлення – дозволили суттєво зменшити обчислювальну складність. Проведене експериментальне випробування показало швидкість передавання даних 5 кбіт/с при використанні смуги частот 5 кГц у випадку вертикального каналу на глибину 3 км.

Таким чином, уже в 1990-х роках спектральна ефективність систем підводного акустичного зв'язку досягла 2 біт/с/Гц, а в окремих випадках – 4 біт/с/Гц, що відповідає швидкості передавання даних 20–80 кбіт/с при використанні смуги частот 10–20 кГц. Відповідно до теореми Шеннона–Гартлі існує верхня межа пропускної здатності каналу зв'язку, яка визначається смугою частот і відношенням сигнал/шум на приймачі. З урахуванням наведених у першому розділі цієї статті даних щодо спектральної потужності шумів у морі $N(f)$, а також спектральної потужності приймального сигналу $S(f)$, яка залежить від частотної характеристики передавача, та враховуючи частотно-залежне загасання сигналу на шляху від передавача до приймача, формула для розрахунку максимальної пропускної здатності каналу підводного акустичного зв'язку має вигляд:

$$C = \int_{f_1}^{f_2} \log_2 \left(1 + \frac{S(f)}{N(f)} \right) df,$$

де $N(f)$ – спектральна потужність шумів у морі, $S(f)$ – спектральна потужність приймального сигналу, яка залежить від частотної характеристики передавача, f_1, f_2 – визначають діапазон робочих частот. Використовуючи спрощений запис наведеної формули

$$C = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right),$$

та наведені у розглянутих роботах значення відношення потужності сигналу до шуму в реалізованих системах підводного акустичного зв'язку – від 6 до 13 дБ – дозволяють оцінити максимальну можливу пропускну здатність підводного акустичного каналу зв'язку в межах 34,5–76 кбіт/с. Можемо зробити висновок, що наявні у 90-ті роки технології дозволяли досягти максимальної спектральної ефективності, але за умови роботи в найпростіших – вертикальних – акустичних каналах.

У випадку роботи в найбільш цікавих з точки зору потреб підводного зв'язку горизонтальних акустичних каналах ефективність суттєво зменшується через багатопроменеве розповсюдження акустичних хвиль (особливо в мілких морях), ефект Доплера у разі як взаємного руху передавача і приймача, так і відбиття акустичних хвиль від поверхні моря за наявності хвиль, а також доплерівське розширення спектра, обумовлене комбінацією зазначених факторів – яке виникає

через накладання різних доплерівських зсувів, що належать різним променям.

У 1990-х роках починають активно досліджуватися і розвиватися технології множинного прийому-передачі. У 2006 р. в статті [20] пропонується і досліджується ідея просторової модуляції,

де передача інформації здійснюється не лише класичними модуляційними схемами (QAM, PSK), але й вибором певної антени для передачі.

Загальна структура системи передачі інформації з просторовою модуляцією представлена на рис. 1 [21].

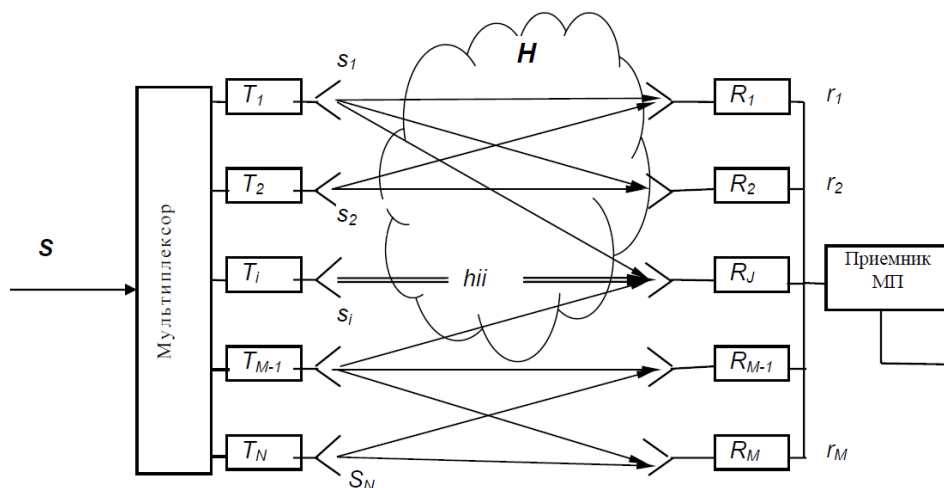


Рис. 1. Структура системи передачі інформації з просторовою модуляцією

Пропускна здатність такої системи розраховується за формулою:

$$C = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \times M,$$

де $M = \min(N_{tx}, N_{rx})$, N_{tx} , N_{rx} – кількість передавальних та приймальних антен відповідно. Таким чином, використання просторовою модуляцією надає можливість багаторазового збільшення швидкості передачі даних без збільшення полоси частот чи співвідношення сигнал/шум

Як зазначено в [21], існують дві групи методів просторово-часового кодування в каналах з просторовою модуляцією: просторово-часове решіткове кодування (STLC) та просторово-часове блочне кодування (STBC).

Починаються дослідження запропонованих підходів для використання у системах підводного акустичного зв'язку. У роботах [22], [23] проведено дослідження використання просторово-частотного кодування для застосування в підводних акустичних каналах, показано значне покращення ефективності роботи у порівнянні з традиційними системами, представлено дані випробувань такої системи підводного акустичного зв'язку. Для передачі даних використовувався 10-елементний антенний масив з відстанню 2 м між елементами, а для прийому – аналогічний 8-елементний антенний масив. Акустична потужність передавача становила 190 дБ відносно 1 мкПа на відстані 1 м. Досліджувалася робота як у разі використання просторово-часового решіткового кодування

(STLC), так і у разі просторово-часового трелісного кодування (STTC), а також їхніх комбінацій. До складу приймача входили три адаптивних еквалайзери низької складності з оберненим зв'язком по рішенням. Час-тотний ресурс ділився на декілька піддіапазонів із захисними інтервалами між ними. Використовувалися різні схеми модуляції: двофазна маніпуляція (BPSK), квадратурна фазова маніпуляція (QPSK).

За результатами проведеного експерименту було продемонстровано надійну передачу даних на швидкості 48 кбіт/с при використанні полоси в 23 кГц та 12 кбіт/с при полосі 3 кГц у горизонтальному каналі на відстані 2 км; спектральна ефективність складала 4 біт/с/Гц.

У роботі [24] представлено використання турбоеквалайзера для прийому сигналів множинного прийому-передавання. Просторово-часове кодування даних виконувалося за допомогою коду Алауті (Alamouti). Передавальна і приймальна антени склалися з двох елементів, рознесених на 5 м по вертикалі. Для передачі використовувалася несуча частота 12 кГц, полоса частот становила 4 кГц. Швидкість передачі даних складала 2,6 кбіт/с із використанням завадостійкого кодування з кодовою швидкістю 1/3.

Інший сучасний метод підвищення спектральної ефективності базується на використанні ортогональних піднесучих, кожна з яких модулюється окремо – OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing). У роботі [25] запропоновано і прак-

тично досліджено використання системи підводного акустичного зв'язку, що працює в полосі частот 12 кГц (центральна частота 27 кГц), з розділенням на 512, 1024 та 2048 ортогональних піднесучих, з використанням нульового заповнення на захисному інтервалі замість циклічного пре-фіксу для зменшення потужності передавача. Підводний акустичний канал автори розглядають як такий, де всі шляхи мають однакове доплерівське розтягування/стискання у часі, і для компенсації доплерівського зсуву пропонують двокрокову компенсацію: перетворення широкосмугової проблеми у вузькосмугову + точне вирівнювання. Приймач працює блок за блоком і не орієнтований на сталість каналу між символами, що забезпечує ефективну роботу у випадку швидкозмінних підводних умов; використовує нульові піднесучі (null subcarriers) для допомоги у компенсації ефекту Доплера та пілотні піднесучі для оцінки стану каналу. У двох практичних експериментах досягнуто швидкості передачі даних у 7,0; 8,6 та 9,7 кбіт/с при використанні квадратурної фазової маніпуляції та 2/3 згорткового кодування на відстані до 800 м. Особливої уваги заслуговує той факт, що передача даних відбувалася навіть при відносній швидкості в 10 вузлів, коли доплерівський зсув перевищував розділення між несучими – система показала відмінний результат для системи підводного акустичного зв'язку. Частотна ефективність склала 0,81 біт/с/Гц.

У порівнянні з іншою технологією безпосереднього розширення спектра сигналу – DSSS (direct sequence spread spectrum) – OFDM за інших однакових умов показує кращу ефективність [26].

Відмічено [27] ефективне застосування модуляції з розширенням спектра за допомогою чірпу (Chirp Spread Spectrum, CSS) для боротьби з мультишляховим розповсюдженням при передачі даних по підводному акустичному каналу. Відповідно до результатів моделювання та експерименту, наведених у [28], CSS-модуляція показала найкращий результат у порівнянні з BPSK та багато-частотною FSK як у разі багатошляхового розповсюдження, так і для прямого (єдиного) шляху за відсутності взаємного руху передавача та приймача. Можливість розділення багатопроменевих компонентів на боці приймача у разі лінійної частотної модуляції несучого сигналу (CSS-модуляція) також продемонстровано в роботі [29]. За результатами проведених натурних випробувань на відстані між передавачем та приймачем 230 м досягнуто швидкості передачі даних 6061 біт/с та 11,1 кбіт/с при вірогідності бітової помилки 0,00091 та 0,0109 відповідно. Використовувалася

полоса частот від 40 кГц до 80 кГц, миттєві швидкості взаємних переміщень передавального та приймального пристроїв під час випробувань не перевищували 2 м/с.

Через флуктуації параметрів морського середовища та зміни у взаємному розташуванні приймача і передавача в каналі підводного гідроакустичного зв'язку неодмінно виникають помилки. Для зменшення їхньої вірогідності та з метою підвищення надійності передачі даних практичні системи зв'язку використовують коди виявлення та корекції помилок через додавання надлишкової інформації до повідомлення. Використання цих кодів для ПАЗ також має особливості. У роботі [30] досліджено ефективність шести FEC-кодів у підводному акустичному каналі північних широт: згорткового, турбокоду, LDPC, BCH, турбопродуктового (TPC) та полярного коду. Метою було оцінити коефіцієнт пакетних помилок (PER) в умовах стабільного каналу, що, на думку авторів, краще відображає кінцеву продуктивність системи порівняно з коефіцієнтом бітових помилок (BER). Аналіз проводили на основі сигналів, записаних під час експерименту поблизу Шпіцбергену, з використанням 2/4/8-PSK-модуляції в діапазоні 3830–6170 Гц та лінійного гідрофонного масиву.

Середовище передачі ускладнювалося багатопроменевістю, розсіюванням сигналу кригою, доплерівськими спотвореннями та змінним SNR. Для аналізу розробили модель, яка включала кодер, 2-PSK-модуляцію, СЕВ-DFE-еквалайзер і декодер.

Досліджували дві конфігурації пакетів: короткий (128 біт, кодування 0,2) і довгий (1024 біти, кодування 0,5). Полярний код показав найкращий PER у короткому пакеті: перевага над згортковим кодом зросла з 22 % до 98 % при збільшенні кількості гідрофонів від 1 до 8. Для довгого пакета перевага полярного коду над турбокодом зросла з 27 % до 39 %. Впровадження турбоеквалізації у СЕВ-DFE-полярному декодері дозволило знизити PER на 10–45 %.

Аналіз BER показав, що жоден код не забезпечив стабільно найкращих результатів. Згортковий код мав найнижчий BER при кодуванні 0,2 (1–3 гідрофони) і 0,5 (8 гідрофонів), а TPC – при кодуванні 0,6 (1–3 гідрофони). Полярний код не продемонстрував високої ефективності за BER: його помилки часто мають структурний характер, на відміну від спорадичних помилок у LDPC або турбокодах.

Виклад основного матеріалу

Відповідно до наведеного вище огляду розроблених та існуючих систем ПАЗ можна виділити декілька окремих груп таких систем відповідно до ключових технологій, які вони використовують:

G2 – системи з частотною маніпуляцією, G3 – когерентні системи з фазовою маніпуляцією, G4 – системи на основі розширення спектра (переважно OFDM, DSS та CSS), G5 – MIMO-системи. Хронологічний розвиток технологій ПАЗ та умовні можливості показано на рис. 2. Подальше

порівняння та аналіз особливостей будемо проводити відповідно до визначених груп систем ПАЗ.

З огляду на частотну ефективність та можливості зі швидкості передачі даних найкращі результати показують системи на основі таких сучасних технологій, як OFDM, MIMO та їхні комбінації.

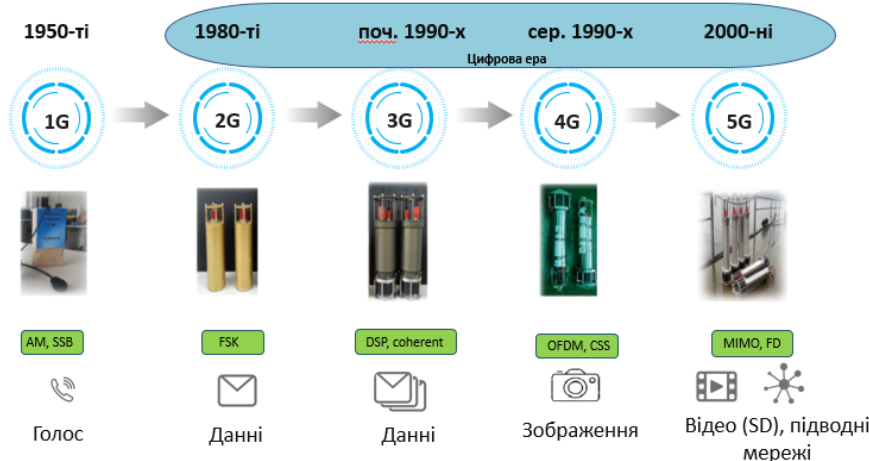


Рис.2. Розвиток технологій підводного акустичного зв'язку

Проведений огляд показує, що на сьогодні в області цифрового ПАЗ розроблено та реалізовано велику кількість різноманітних способів передачі та прийому даних по підводному акустичному каналу. Можна стверджувати, що ефективність систем ПАЗ суттєво залежить від особливостей підводного акустичного каналу між об'єктами зв'язку: вертикальний чи горизонтальний канал, час реверберації, рівень додаткових променів, взаємний рух тощо. Різноманітність можливих сценаріїв взаємодії об'єктів підводного акустичного зв'язку зумовлює потребу у впорядкуванні та систематизації цих сценаріїв для можливості їх порівняння та ефективного аналізу. Пропонуємо наступну класифікацію сценаріїв взаємодії для можливості порівняння ефективності методів ПАЗ для визначеного сценарію.

Класифікація систем підводного зв'язку за архітектурою взаємодії:

- стаціонарний вузол (комунікаційний об'єкт) – рухомий підводний вузол (комунікаційний об'єкт);
- стаціонарний вузол – нерухомий підводний вузол;

- надводний вузол – рухомий підводний вузол;
- надводний вузол – нерухомий підводний вузол;
- рухомий підводний вузол – нерухомий підводний вузол;
- нерухомий підводний вузол – нерухомий підводний вузол;
- рухомий підводний вузол – рухомий підводний вузол.
- По взаємодії вузлів:
 - багато абонентів – одночасна взаємодія з центральним вузлом;
 - багато абонентів – послідовна взаємодія з центральним вузлом;
 - багато абонентів – взаємодія між абонентами і центральним вузлом.

Додатково, у кожному сценарію можливе виділити різні моделі взаємодії, зумовлених співвідношенням обсягів даних, що передаються між абонентами – таблиця 2.

Таблиця 2

Моделі взаємодії абонентів підводного акустичного зв'язку

Система підводного зв'язку за архітектурою взаємодії	Співвідношення об'єму даних між абонентами
Стаціонарний вузол (комунікаційний об'єкт) – рухомий підводний вузол (комунікаційний об'єкт)	Переважно дані передаються в напрямку стаціонарного вузла
Стаціонарний вузол – нерухомий підводний вузол	Переважно дані передаються в напрямку стаціонарного вузла
Надводний вузол – рухомий підводний вузол	Переважно дані передаються в напрямку надводного вузла

Закінчення табл. 2

Надводний вузол – нерухомий підводний вузол	Переважно дані передаються в напрямку надводного вузла
Рухомий підводний вузол – нерухомий підводний вузол	Переважно дані передаються в напрямку рухомого підводного вузла
Нерухомий підводний вузол – нерухомий підводний вузол	Однаковий обсяг даних між вузлами
Рухомий підводний вузол – рухомий підводний вузол	Однаковий обсяг даних між вузлами

Аналіз існуючих рішень організації ПАЗ відповідно до особливостей розповсюдження звуку в мілкому морі

Море не є однорідним та незмінним середовищем. В залежності від глибини змінюються температура води та гідростатичний тиск, що особливо помітно на мілководді. Температура води змінюється залежно від пори року, наявності та швидкості вітру, погодних умов. Морські течії та конвекція призводять до такого явища, як турбулентність. Через хвилювання поверхні моря, а також життєву діяльність морських організмів у воді наявні бульбашки повітря. У мілких морях суттєвий вплив на розповсюдження звуку виникає через відбиття звукових хвиль від поверхні моря та морського дна.

Рефракція звукових променів

Швидкість звуку в морі залежить від температури, тиску та солоності води. При збільшенні те-

мператури на 1 °C швидкість звуку зростає приблизно на 4 м/с, а зі збільшенням глибини на 10 м швидкість звуку збільшується приблизно на 20 см/с [31]. Що стосується зміни солоності, то її потрібно враховувати лише в місцях, де у море потрапляє велика кількість прісної води з річок.

Можна вважати, що в морських умовах швидкість звуку змінюється у межах від 1450 до 1500 м/с. Відповідно до зміни швидкості звуку звукові хвилі відхиляються в напрямку до області, де швидкість розповсюдження менша. На рисунку 3 показані типові випадки зміни руху звукових хвиль залежно від розподілу температури по глибині: крива 1 ілюструє шлях звукової хвилі у випадку повільного зменшення температури з глибиною, що характерно для літа; крива 2 – при суттєвій зміні температури з глибиною, що характерно для південних морів; а крива 3 відповідає випадку збільшення температури з глибиною, що характерно для зимової пори року.

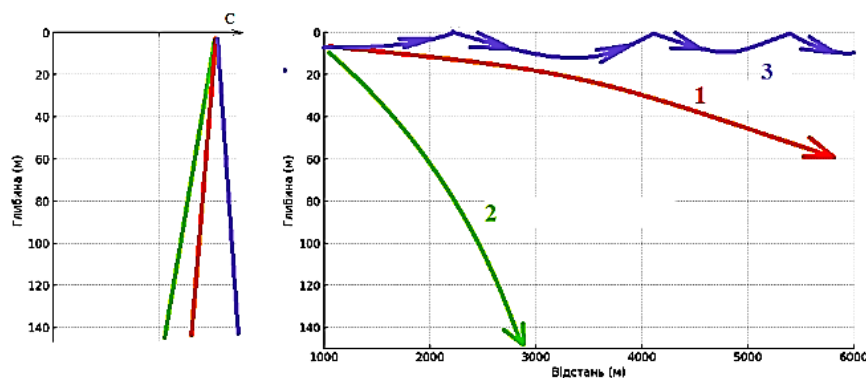


Рис. 3. Профіль швидкості звуку та рефракція звукових променів

Явище рефракції в морській воді призводить до утворення зон акустичної тіні, в яких інтенсивність звуку дуже швидко зменшується. І хоча в зони тіні, особливо в умовах мілководного моря, все ж проникає певна кількість акустичної енергії за рахунок відбиття від дна та розсіювання на нерівностях поверхні, рівень сигналу в цих зонах залишається значно нижчим, що, в більшості випадків, робить неможливим надійний зв'язок у цих зонах і є добре відомим у гідроакустиці під

поняттям геометричної дальності дії гідроакустичних приладів. Вплив рефракції не залежить від того, яка з технологій ПАЗ використовується. Але геометрична дальність залежатиме від взаємного розташування об'єктів зв'язку, тобто визначатиметься відповідно до запропонованої вище архітектури взаємодії об'єктів ПАЗ.

Поглинання та розсіювання звуку

Через хвилювання поверхні моря, рух кораблів та життєдіяльність морського планктону поблизу поверхні з'являється багато маленьких

бульбашок із повітрям. Ці бульбашки повітря призводять до поглинання енергії звукових хвиль через їх стискання та розширення під дією звукового тиску, що спричиняє передачу тепла воді. Поглинання енергії буде особливо помітним у разі співпадіння частоти звуку з власною частотою коливань бульбашки, тобто у випадку резонансу. Частоту резонансу можна знайти за наближеним виразом [31]:

$$f \approx \frac{0,66}{2r},$$

де r – радіус бульбашки в см, а f частота в кГц.

У воді переважно залишаються бульбашки діаметром у долі міліметра, що відповідає частотам приблизно від 15 кГц до 100 кГц, тоді як більші бульбашки швидко підіймаються на поверхню. Іншою причиною поглинання звуку є в'язкість зсуву води, а на частотах від 100 Гц до 100 кГц поглинання звуку переважно відбувається через вплив в'язкості об'єму води на процеси релаксації під час розповсюдження акустичних хвиль [30].

На зменшення інтенсивності звукових хвиль також впливають температурні неоднорідності. Наявність течій, нагрівання поверхні моря та виникаючі при цьому процеси конвекції і змішування призводять до виникнення більш-менш помітних температурних неоднорідностей, які суттєво впливають на розповсюдження звукових хвиль, особливо ультразвукових. Ці неоднорідності призводять до флуктуацій швидкості звуку, коливань рівня сигналу та розсіювання.

Разом із геометричними втратами, пов'язаними з розширенням акустичних хвиль у просторі, втрати, пов'язані з розсіюванням акустичних хвиль, та втрати, пов'язані з поглинанням, складають загасання звуку на шляху від передавача до приймача і можуть бути виражені формулою [32].

$$A(l, f) = \left(\frac{l}{l_r}\right)^k \cdot a(f)^{(l-l_r)},$$

де f – частота сигналу, l – відстань взята відносно опорної відстані l_r (типово 1 м), k – відповідає моделі розповсюдження і приймає значення 1 для циліндричного і 2 для сферичного розповсюдження звукових хвиль, а коефіцієнт $a(f)$ відповідає втратам пов'язаним з розсіюванням та поглинанням акустичних хвиль. За результатами проведених експериментів значення коефіцієнта загасання β добре апроксимуються наступною аналітичною залежністю:

$$\beta = 0,036 \cdot f^{\frac{3}{2}} \text{ дБ/км},$$

де f – частота в кГц.

Відповідно до наведених в [32] даних втрати пов'язані з розсіюванням та поглинанням акустичних хвиль швидко зростають зі збільшенням частоти і складають від орієнтовно 4 дБ/км на частотах 20 кГц, 29 дБ/км на частотах 80 кГц до 45 дБ на частотах 160 кГц.

Разом із спектральною потужністю морських шумів втрати на шляху від передавача до приймача визначають енергетичну дальність системи ПАЗ, відповідно до вимог щодо співвідношення сигнал/шум на вході приймача, які, в свою чергу, визначаються технологією системи ПАЗ.

Шуми моря. Фоновий шум моря обумовлений різними факторами, такими як шуми від кораблів (низькочастотні шуми до сотень Гц), шуми від морської поверхні (0,5–50 кГц), удари гальки об камені, шуми від морських організмів, шуми від тектонічних процесів, атмосферні шуми над поверхнею моря (0,5–50 кГц) і можуть бути специфічними в окремих районах. Наприклад, в тропічних морях суттєвим джерелом шумів є класання креветок, спектр шумів яких простирається від одиниць кГц до 15–20 кГц, перебуваючи на 20–40 дБ вище, ніж інші шуми. На частотах вище за 100 кГц переважаючим стає молекулярний тепловий шум. Щільність спектральної потужності фонових шумів моря складає приблизно 51 дБ відносно 1 мкПа на частоті 1 кГц і зменшується зі швидкістю приблизно 18 дБ/декаду зі збільшенням частоти [32].

Разом із залежністю загасання сигналу від частоти на шляху від передавача до приймача, спектральна потужність шумів дозволяє визначити оптимальні параметри системи підводного акустичного зв'язку (ПАЗ). Збільшення робочої частоти, з одного боку, сприяє збільшенню енергетичної дальності зв'язку завдяки зниженню рівня шумів, а з іншого – призводить до підвищення загасання сигналу, що, своєю чергою, зменшує дальність. Таким чином, для визначеної відстані існує оптимальна смуга частот для ПАЗ, що обумовлює одну з особливостей цих систем.

Як можемо бачити з наведеного в цій статті огляду існуючих систем ПАЗ, робоча смуга часто є співмірною з центральною частотою – табл. 3. Це має суттєві наслідки для розробки методів обробки сигналів, оскільки перешкоджає застосуванню припущення про вузькосмуговість, на якому базується багато принципів радіозв'язку. Потрібно враховувати широкосмугові ефекти.

Таблиця 3

Центральна частота та полоса частот систем підводного акустичного зв'язку

Група систем ПАЗ	Несуча частота	Робоча полоса частот	Оцінка співмірності (несуча частота $\gg$ робочої полоси)
G2 (системи на базі FSK) [11]	50кГц	10кГц	виконується частково
G3 (когерентні системи) [13], [14], [19]	1МГц 15кГц	250кГц 5кГц	не виконується не виконується
G4 (системи з розширення спектра OFDM, CSS) [24], [25]	12кГц 27кГц	4кГц 12кГц	не виконується не виконується
G5 (системи використовуючи MIMO) [23]	30кГц 38.5кГц	3кГц 23кГц	виконується не виконується

Використання у системи ПАЗ не оптимальних частот (більш високих частот, ширшої смуги) може бути можливим за рахунок формування діаграми направленості, що дозволяє компенсувати втрати сигналу та зменшити рівень шумів.

Швидкі та повільні зміни акустичних сигналів у морі виникають через інтерференцію між відбитими сигналами, що надходять до приймача з різними фазами, взаємний рух передавача та приймача, різноманітні перешкоди на шляху акустичних хвиль, а також через тіньовий ефект. Це призводить до постійних флуктуацій рівня приймального сигналу. Для опису таких змін застосовуються різноманітні статистичні моделі затухання як для швидких, так і для повільних коливань.

Як зазначено в [32], досі немає загальноприйнятих статистичних характеристик акустичних комунікаційних каналів. Частина каналів має де-

термінований характер, інші описуються затуханням за розподілом Райса або Релея, а новітні дослідження пропонують застосовувати К-розподілене затухання, яке фактично моделює змішане затухання: частина сигналу має Райсове, а інша – Релеєве затухання. Слід зауважити, що К-розподілене затухання не враховує рух передавача чи приймача та ефект Доплера.

Загальновідомою моделлю швидкого затухання, яка прямо враховує Доплерівський ефект, є модель Джейка. У цій моделі зміни фази і частоти сигналу зумовлені рухом, що викликає корекцію частоти (ефект Доплера) і описує мультишляхове поширення в каналах зв'язку.

Багатошляхове розповсюдження звука у морі. Явище багатошляхового розповсюдження звуку в морському середовищі, особливо в умовах мілководдя (рисунок 4), суттєво впливає на поширення звукових хвиль та ефективність роботи гідроакустичних систем зв'язку.

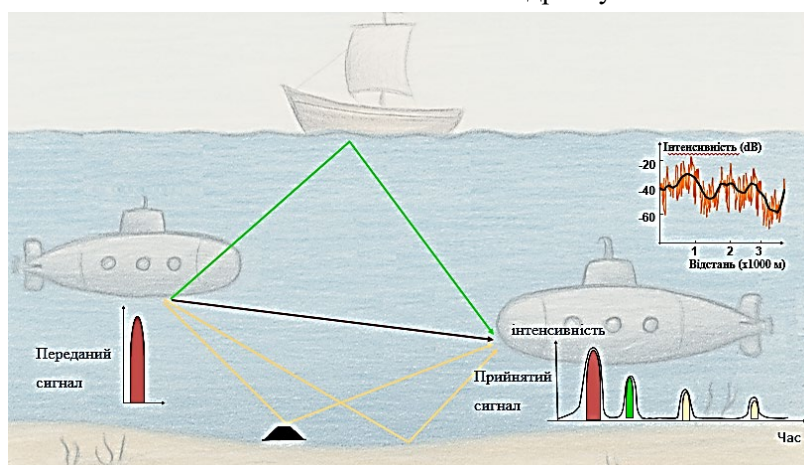


Рис. 4. Багатошляхове розповсюдження звука у мілкому морі

Багатошляховість виникає переважно внаслідок відбиття звукових хвиль від поверхні моря та морського дна, а також, у меншій мірі, – від неоднорідностей у товщі води. Додатковими факторами є нерівності морського дна та хвилюва структура поверхні.

З наведеного в цій статті огляду існуючих систем ПАЗ можна бачити, що одна з ключових задач розробки та дослідження систем ПАЗ зосереджується на ефективній компенсації багатопроменевого розповсюдження звукових хвиль.

У табл. 4 наведено огляд впливу ефекту багатошляховості в різних системах ПАЗ.

Таблиця 4

Ефект багатошляховості в системах підводного акустичного зв'язку

Група систем ПАЗ		Метод компенсації багатошляхового прийому	Оцінка ефективності
G2 (системи на базі FSK)		без використання засобів адаптивної фільтрації	Системи ПАЗ цього типу характеризуються високою стійкістю до багатошляхового розповсюдження, однак мають низьку частотну ефективність, що обмежує їх пропускну здатність
G3 (когерентні системи)		еквалайзер в різних модифікаціях	Ключовий компонент когерентних систем, дозволяє суттєво покращити якість прийому. Основними недоліками систем з адаптивними еквалайзерами які використовують секцію зворотного зв'язку по рішенню (класична схема еквалайзера) і фазовою синхронізацією є чутливість до динамічних змін сигналу для різних каналів зв'язку, збільшення енергії шуму адаптивних еквалайзерів є пропорційним до кількості вагових коефіцієнтів, чутливість до накопичення помилок, що у випадку акустичних каналів з великим часом реверберації суттєво впливає на ефективність роботи системи зв'язку а також на обчислювальну складність. Для компенсації зазначених недоліків запропоновані такі модифікації як розріджений еквалайзер та турбоеквалайзер
G4 (системи з розширення спектра OFDM, DSSS, CSS)	OFDM	еквалізація в частотній області; захисний інтервал (який зазвичай реалізується як циклічний префікс або нульовий префікс);	Краща ефективність у порівнянні з системами G3, оскільки в разі OFDM частотно-селективний канал перетворюється на набір плоских каналів завдяки розподілу сигналу на вузькі піднесучі. Використання циклічного префікса усуває інтерсимвольну інтерференцію, якщо його довжина перевищує максимальну затримку. Застосування частотної еквалізації є простішим і швидшим, ніж часової
	DSSS	завдяки технології (кодове розширення спектру); використання RAKE приймача	Нижча ефективність ніж у OFDM. Для компенсації багатошляхового розповсюдження може використовуватися адаптивний приймач із RAKE-структурою
	CSS	завдяки технології (розподілення енергії по часово-частотній площині)	CSS має властивість розподілення енергії по часово-частотній площині, що забезпечує йому високу стійкість до багатошляхових спотворень. Ця властивість є «природною» для лінійно-модульованих чіпів, де миттєва частота змінюється монотонно протягом усього символу. У акустичному каналі з багатошляховістю затримані копії сигналу зсунуто по часу, але через зміну частоти з часом, ці копії мають відмінні частотні компоненти в момент часу, коли приймається основний сигнал, через часові копії не конструктивно інтерферують, спричиняють лише незначне зниження сигналу-шуму (SNR). Не вимагає складної еквалізації
G5 (системи використовуючи MIMO)		просторово-часове кодування	Малочутливі до багатошляховості. Наявність багатошляховості необхідна для покращення продуктивності таких систем (просторового розділення каналів)

Доплерівський ефект. Доплерівський ефект у підводних акустичних системах полягає в зміні частоти акустичних хвиль, що виникає через рух джерела звуку (наприклад, підводного апарата або човна) або приймача відносно один одного. На відміну від радіо- та світлових хвиль, у воді співвідношення між швидкістю звуку (~1500 м/с) та швидкістю руху об'єктів підводного зв'язку (зазвичай до кількох метрів на секунду) значно менше, ніж відповідне співвідношення для електромагнітних хвиль. Через це ефект Доплера має суттєвий вплив на якість підводного зв'язку.

Для кількісного визначення зміни частоти сигналу внаслідок Доплерівського ефекту використовується коефіцієнт α , який описує відношення між зміною частоти Δf та відносною швидкістю руху v джерела або приймача відносно звукового середовища за формулою:

$$\alpha = \frac{f' - f_0}{f_0} = \frac{v}{c},$$

де f_0 – початкова частота сигналу, $f' - f_0$ – зміна частоти сигналу через Доплерівський ефект, v – відносна швидкість руху джерела або приймача відносно середовища, c – швидкість звуку у воді (приблизно 1500 м/с).

Автономні підводні акустичні апарати можуть рухатися зі швидкістю декілька метрів за секунду, підводні човни 5–15 м/с, що відповідає значенням коефіцієнта α від 0,00667 до 0,01 що обов'язково має бути враховано. Наприклад, для частоти 20 кГц у разі взаємного руху приймача і передавача зі швидкістю 5 м/с зсув частоти буде дорівнювати 66,7 Гц.

У поєднанні з ефектом багатошляхового розповсюдження, внаслідок різної взаємної швидкості передавача й приймача для різних шляхів проходження звуку, на стороні приймача також спостерігається розширення спектра.

З наведеного у цій статті огляду існуючих систем ПАЗ можна бачити, що одна з задач розробки та дослідження систем ПАЗ зосереджується на ефективній компенсації спектральних змін обумовлених ефектом Доплера, але переважно фокусуються на доплерівському зсуві, дослідження та оцінка доплерівського розширення спектра в явному вигляді в наявних публікаціях та дослідженнях відсутня.

У табл. 5 наведено дані аналізу впливу вказаних ефектів в різних системах ПАЗ

Таблиця 5

Ефект Доплера в системах підводного акустичного зв'язку

Група систем ПАЗ		Метод компенсації зсуву	Метод компенсації розширення спектра	Оцінка ефективності
G2 (системи на базі FSK)		Безпосереднє відстеження доплерівського зсуву за допомогою пілотного сигналу	Планування тональних частот з достатнім інтервалом	Стійкі до доплерівського зсуву та доплерівського розширення спектра
G3 (когерентні системи)		еквалайзер в різних модифікаціях	немає даних	Низька ефективність у випадку каналів з високою динамікою характеристик
G4 (системи з розширення спектра OFDM, DSSS, CSS)	OFDM	нульові піднесучі; пілотний сигнал	немає даних	Через порівняно високі значення коефіцієнта α OFDM є дуже чутливими до доплерівського зсуву що вимагає застосування алгоритмів компенсації та зменшує ефективність. У разі застосування алгоритмів компенсації досягається висока стійкість
	DSSS	використання RAKE приймача	немає даних	Помірна ефективність. Доплерівський зсув викликає фазове зміщення PN-коду (розширюючого коду), що знижує кореляцію і ускладнює синхронізацію. Для компенсації використовується адаптивний приймач із RAKE-структурою та частотною синхронізацією. Доплерівське розширення спектра порушує ортогональність сигналів і призводить до інтерференції

Закінчення табл. 5

Група систем ПАЗ		Метод компенсації зсуву	Метод компенсації розширення спектру	Оцінка ефективності
	CSS	завдяки технології (розподілення енергії по часово-частотній площині)	завдяки технології (розподілення енергії по часово-частотній площині)	Висока. За рахунок поступової зміни частоти (chirp) доплерівський зсув можна розглядати як невелике спотворення темпу сигналу, яке відносно легко коригується; спектральна енергія чірпа “розтягнута”, що допомагає уникати різних фазових зсувів.
G5 (системи використовуючи просторове кодування - MIMO)		Оцінка фази та компенсація доплерівського зсуву	немає даних	Потребують застосування алгоритмів компенсації для забезпечення стійкості до доплерівського зсуву.

Висновки

У статті проведено систематичний огляд наявних технологій і практичних рішень у сфері підводного акустичного зв'язку (ПАЗ), а також узагальнено ключові проблеми та обмеження, що стримують розвиток цієї галузі. Зважаючи на швидкі темпи розвитку морських технологій і зростаючі інтереси та вимоги до підводних комунікацій, особливо актуальним є аналіз сучасного стану систем ПАЗ та пошук можливостей подальшого підвищення їх ефективності.

Розширення використання морських ресурсів, зростання військових потреб та активний розвиток наукових досліджень у морях зумовлюють підвищені вимоги до підводного зв'язку. На сьогодні єдиною технологією, здатною забезпечити бездротовий зв'язок на відстанях понад 100 м, залишається акустичний канал.

Згідно з аналізом сучасних публікацій у галузі підводного акустичного зв'язку, існуючі системи дозволяють досягати швидкості передачі даних до 48 кбіт/с у смузі 23 кГц (дальність 2 км) та спектральної ефективності до 4 біт/с/Гц при швидкості 12 кбіт/с у смузі 3 кГц. Підвищення спектральної ефективності в сучасних системах ПАЗ забезпечується за рахунок використання всіх ключових технологій цифрової модуляції та обробки сигналів, серед яких OFDM, MIMO та модуляції високого порядку (8-PSK, 16-QAM, а в перспективі – 64-QAM).

Водночас, навіть за досить високої спектральної ефективності, швидкість передачі даних залишається недостатньою для низки практичних застосувань, таких як передавання зображень і відео, через особливості частотного ресурсу. Розши-

рення можливостей автономних підводних апаратів (АПА) та дистанційно керованих підводних апаратів (ДКПА) вимагає пошуку шляхів подальшого збільшення пропускну здатності.

Перспективними напрямками є використання високочастотних діапазонів (>100 кГц), застосування масивів акустичних перетворювачів з адаптивною діаграмою направленості, а також забезпечення ширококутовості гідроакустичних перетворювачів, що потребує подальших досліджень. Робочі частоти в районі 30–50 кГц в існуючих системах ПАЗ обираються виходячи з забезпечення максимальної енергетичної ефективності. На думку авторів статті, зниження енергетичної ефективності під час використання вищих частот може бути компенсовано застосуванням масивів акустичних перетворювачів з адаптивною діаграмою спрямованості.

Основні проблеми, які намагаються вирішити розробники систем ПАЗ, включають: міжсимвольну інтерференцію через багатопротиневе розповсюдження, доплерівський зсув і доплерівське розширення спектра. Дослідження цих явищ і розробка нових методів їх компенсації залишаються актуальними. Особливої уваги потребують дослідження впливу та методів компенсації доплерівського розширення спектра, яке зумовлене не лише взаємним рухом передавача й приймача, а й динамікою поверхні моря, від якої відбиваються акустичні хвилі. У наявних публікаціях це питання майже не розглядається. Дослідження використання синтезованих діаграм направленості для окремих шляхів поширення звуку з наступною комбінованою обробкою сигналів вбачається перспективним методом альтернативної компенсації багатошляхового розповсюдження акустичних хвиль.

Суттєве підвищення ефективності систем ПАЗ, особливо у випадку використання технології МІМО, пов'язане із застосуванням рознесених антен як на передачі, так і на прийомі. Однак наведені в розглянутих публікаціях вертикальні масиви гідрофонів мають значні розміри, що обмежує можливість їх застосування в мобільних системах, зокрема автономних підводних апаратах. Зазначене обмеження потребує подальших досліджень, особливо, в аспектах розташування акустичних перетворювачів у вказаних мобільних системах ПАЗ.

Для максимізації швидкості передачі при збереженні допустимого рівня помилок в мінливих умовах підводного середовища доцільно впроваджувати адаптивні схеми модуляції та кодування.

У ході проведеного огляду було запропоновано класифікацію сценаріїв взаємодії об'єктів ПАЗ та здійснено порівняльний аналіз впливу підводного середовища на ефективність різних систем. Необхідність такої класифікації зумовлена суттєвою різницею в результатах функціонування систем підводного акустичного зв'язку за різних сценаріїв, що ускладнює їх безпосереднє порівняння. Запропонована класифікація може бути корисною для формування уніфікованих критеріїв оцінювання ефективності та вибору оптимальних технічних рішень залежно від умов застосування.

Проведений аналіз дозволив виокремити ключові проблеми та окреслити перспективні напрями подальших досліджень, спрямовані на підвищення загальної ефективності систем акустичного зв'язку та їх пропускної здатності у підводних комунікаціях.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Kumara S., Vatsb C. Underwater communication: A detailed review. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021.
- [2] Al-Zhrani S., Bedaiwi N. M., El-Ramli I. F., Barasheed A. Z., Abduldaem A., Al-Hadeethi Y. Underwater Optical Communications: A Brief Overview and Recent Developments. *Engineered Science*. 2021. Vol. 16. P. 146–186. DOI: <https://doi.org/10.30919/es8d574>.
- [3] LinkQuest Inc. LinkQuest Underwater Acoustic Modems. UWM2000 Specifications. URL: <https://www.link-quest.com/html/uwm2000.htm> (дата звернення: 28.01.2025).
- [4] LinkQuest Inc. LinkQuest Underwater Acoustic Modems. UWM1000 Specifications. URL: <https://www.link-quest.com/html/uwm1000.htm> (дата звернення: 28.01.2025).
- [5] Micron Modem – 2023 Datasheet, Rev. 6. Trittech International Ltd. 2023. URL: <https://www.tritech.co.uk/files/Datasheets/Micron-Modem-2023-datasheet-rev6.pdf> (дата звернення: 28.01.2025).
- [6] SAM-1 Technical Reference Manual / Desert Star Systems. 2019. 62 с. URL: <https://desertstarsystems.nyc3.digitaloceanspaces.com/Manuals/SAM-1TechnicalReferenceManual.pdf> (дата звернення: 28.01.2025).
- [7] Benson B., Caffè M., Hovem J. Design of a low-cost underwater acoustic modem. *IEEE Embedded Systems Letters*. 2010. Vol. 2, No. 3. P. 58–61. DOI: <https://doi.org/10.1109/LES.2010.2050191>.
- [8] Petroccia R., Alves J. The JANUS Underwater Communications Standard: From Promulgation to Present. *Proceedings of the OCEANS 2024 – Singapore*. Singapore, 2024. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANS51537.2024.10682419>.
- [9] Baggeroer A. B., Koelsch D. E., von der Heydt K., Catipovic J. DATS – A Digital Acoustic Telemetry System for Underwater Communications. *OCEANS '81*. Boston, MA, USA, 1981. P. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1981>.
- [10] Von Der Heydt K. Design and performance analysis of a Digital Acoustic Telemetry System for the short range underwater channel. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1984. Vol. OE-9, No. 3. P. 242–252. DOI: <https://doi.org/10.1109/JOE.1984.1145632>.
- [11] Mackelburg G. R. Acoustic data links for UUVs. *IEEE Conf. Proc. OCEANS '91 [Ocean Technologies and Opportunities in the Pacific for the 90's]*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1991. Vol. 2. P. 1400–1406. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1991.606496>.
- [12] Jones J. C. et al. The design and testing of a DSP, half-duplex, vertical, DPSK communication link. *Oceans '97*. Halifax, NS, Canada, 1997. Vol. 1. P. 259–266. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1997.634372>.
- [13] Kaya A., Yauchi S. An Acoustic Communication System for Subsea Robot. *OCEANS*. Seattle, WA, USA, 1989. P. 765–770. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1989.586677>.
- [14] Stojanovic M., Catipovic J. A., Proakis J. G. Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels. *IEEE J. Ocean. Eng.* 1994. Vol. 19. P. 100–111. DOI: <https://doi.org/10.1109/48.289455>.
- [15] Ochi H., Watanabe Y., Shimura T. Experiments on acoustic communication with quadrature amplitude modulation in multipath environment. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2004. Vol. 43, No. 5S. P. 3140–3145. DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.43.3140>.
- [16] Eggen T. H. Underwater acoustic communication over Doppler spread channels: PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA, USA, 1997. 205 p. DOI: <https://doi.org/10.1575/1912/5709>.

- [17] Eggen T. H., Baggeroer A. B., Preisig J. C. Communication over Doppler spread channels. Part I: Channel and receiver presentation. *IEEE J. Oceanic Eng.* 2000. Vol. 25, No. 1. P. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.1109/48.820737>.
- [18] Eggen T. H., Preisig J. C., Baggeroer A. B. Communication over Doppler spread channels. II. Receiver characterization and practical results. *IEEE J. Oceanic Eng.* 2001. Vol. 26, No. 4. P. 612–621. DOI: <https://doi.org/10.1109/48.972101>.
- [19] Johnson M., Brady D., Grund M. Reducing the computational requirements of adaptive equalization in underwater acoustic communications. *OCEANS '95*. San Diego, CA, USA, 1995. Vol. 3. P. 1405–1410. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1995.528669>.
- [20] Mesleh R., Haas H., Ahn C. W., Yun S. Spatial Modulation – A New Low Complexity Spectral Efficiency Enhancing Technique. *Communications and Networking in China*. Beijing, 2006. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/CHINACOM.2006.344658>.
- [21] Банкет В. Л., Незгазинська Н. В., Токар М. С. Методи просторово-часового кодування для систем радіозв'язку. *Цифрові технології*. 2009. № 6. С. 5–166.
- [22] Roy S. et al. Enhanced underwater acoustic communication performance using space-time coding and processing. *Oceans '04*. Kobe, Japan, 2004. Vol. 1. P. 26–33. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2004.1402890>.
- [23] Roy S., Duman T. M., McDonald V., Proakis J. G. High-Rate Communication for Underwater Acoustic Channels Using Multiple Transmitters and Space-Time Coding: Receiver Structures and Experimental Results. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2007. Vol. 32, No. 3. P. 663–688. DOI: <https://doi.org/10.1109/JOE.2007.899275>.
- [24] Nordenvaad M. L., Oberg T. Iterative Reception for Acoustic Underwater MIMO Communications. *OCEANS 2006*. Boston, MA, USA, 2006. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2006.307060>.
- [25] Li B., Zhou S., Stojanovic M., Freitag L., Willett P. Multicarrier Communication Over Underwater Acoustic Channels With Nonuniform Doppler Shifts. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2008. Vol. 33, No. 2. P. 198–209. DOI: <https://doi.org/10.1109/JOE.2008.920471>.
- [26] Frassati F., Lafon C., Laurent P.-A., Passerieux J.-M. Experimental assessment of OFDM and DSSS modulations for use in littoral waters underwater acoustic communications. *Europe Oceans 2005*. Brest, France, 2005. Vol. 2. P. 826–831. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2005.1513163>.
- [27] Ayela G., Nicot M., Lurton X. New innovative multimodulation acoustic communication system. *Proc. IEEE Oceans Conf.* 1994. Vol. 1. P. 292–295. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1994.363896>.
- [28] Czapiewska A., Łuksza A., Studański R., Wojewódka Ł., Żak A. Evaluation of Selected Modulation Techniques in Underwater Multipath Channel. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 13395–13404. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3530948>.
- [29] Кебкал К. Г., Кебкал А. Г., Яковлев С. Г. Спосіб цифрового зв'язку за багатоприменовими гідроакустичними каналами з використанням частотно-модульованого несучого сигналу. *Акустичний журнал*. 2004. Т. 50, № 2. С. 220–230.
- [30] Pelekianakis K., Paglierani P., Alvarez A., Alves J. Comparison of error correction codes via optimal channel replay of high north underwater acoustic channels. *Computer Networks*. 2024. Vol. 242. P. 110270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110270>.
- [31] Brekhovskikh L. M., Lysanov Yu. P. Fundamentals of Ocean Acoustics. 3rd ed. New York: Springer, 2003. 273 p. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1792644>.
- [32] Stojanovic M., Preisig J. Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization. *IEEE Communications Magazine*. 2009. Vol. 47, No. 1. P. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.4752682>.

Янушевський А. О., Коржик О. В.

ПРОБЛЕМАТИКА ЕФЕКТИВНОГО АКУСТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ У ПІДВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ (ОГЛЯД)

У статті досліджено сучасний стан, технологічні рішення та актуальні проблеми цифрового підводного акустичного зв'язку (ПАЗ), який набуває зростаючого значення у зв'язку з розвитком видобування морських ресурсів, використанням автономних і дистанційно керованих підводних апаратів, підводних дронів, систем моніторингу та побудови «підводного інтернету речей». Вступна частина статті аналізує сучасні методи підводного зв'язку – електромагнітний, оптичний та акустичний – і вказує на їхні обмеження: електромагнітний зв'язок у воді обмежений дистанцією близько 10 метрів через сильне затухання, оптичний зв'язок має вузьку спрямованість і обмежений прозорістю води з типовим радіусом дії до 100 метрів, тоді як акустичний зв'язок залишається єдиним придатним та універсальним засобом зв'язку на відстанях від сотень метрів до десятків кілометрів.

Основна частина статті фокусується на особливостях акустичного каналу у мілководних районах (до 200 м глибини), які є особливо важливими з огляду на промислову та охоронну діяльність. Розглядаються проблеми багатошляхового розповсюдження, ефекти Доплера, питання геометричної та енергетичної дальності, фактори що обмежують швидкість передачі даних. Проводиться порівняння ефективності різних методів передачі та прийому сигналів в системах ПАЗ.

У висновках статті підкреслюється, що за останні десятиліття технології підводного акустичного зв'язку досягли передачі даних зі швидкістю до 48 кбіт/с на дистанції близько 2 км з ефективністю до 4 біт/с/Гц. Підвищення спектральної ефективності відбувається завдяки впровадженню сучасних технологій, таких як OFDM, MIMO і високопорядкова модуляція (8-PSK, 16-QAM). Водночас обмежений частотний ресурс та складні умови підводного середовища стримує подальше зростання швидкості передачі даних.

Автори виокремлюють ключові виклики для ПАЗ – багатошляхове розповсюдження, доплерівський зсув та спектральне розширення, які ускладнюють стабільність і надійність зв'язку. Запропоновано напрямки подальших досліджень: доплерівське розширення спектра, використання рознесених антен малогабаритних підводних апаратів, синтезованих діаграм направленості, адаптивної модуляції і кодування для максимізації швидкості та якості зв'язку в мінливих і складних умовах підводного середовища, а також використання височастотних діапазонів для підвищення пропускної здатності систем.

Практична цінність роботи полягає у глибокому аналізі наявних рішень, визначенні їхніх переваг і недоліків та формуванні рекомендацій для підвищення ефективності та надійності систем ПАЗ в умовах мінливого підводного середовища. Окремо відзначено проблему відсутності галузевої стандартизації (крім протоколу JANUS), що ускладнює взаємодію різномірних систем, особливо в прибережних зонах з великою кількістю користувачів. Стаття пропонує класифікацію сценаріїв взаємодії підводних об'єктів, містить порівняльний аналіз впливу середовища на системи ПАЗ та визначає перспективні напрямки для подальшого розвитку ефективних і надійних систем підводного акустичного зв'язку.

Ключові слова: підводний; акустичний; зв'язок; ефективність; обмеження; багатошляхове; мілке; море; доплерівські; спектр;

Yanushevskiy A., Korzyh O.

A REVIEW OF CHALLENGES IN EFFICIENT UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION

The article investigates the current state, technological solutions, and pressing issues of digital underwater acoustic communication (UAC), which is gaining increasing importance due to the development of marine resource extraction, the use of autonomous and remotely operated underwater vehicles, underwater drones, monitoring systems, and the construction of the "underwater Internet of Things." The introductory part of the article analyzes modern underwater communication methods – electromagnetic, optical, and acoustic – and highlights their limitations: electromagnetic communication underwater is limited to about 10 meters due to strong attenuation; optical communication has narrow directivity and is constrained by water transparency, typically reaching up to 100 meters; whereas acoustic communication remains the only suitable and universal means of communication over distances ranging from hundreds of meters to tens of kilometers.

The main part of the article focuses on the characteristics of the acoustic channel in shallow water areas (up to 200 m depth), which are particularly important considering industrial and security activities. Issues such as multipath propagation, Doppler effects, geometric and energy range limitations, and factors restricting data transmission rates are discussed. A comparison of the efficiency of different underwater acoustic communication methods is provided.

The conclusions emphasize that over recent decades underwater acoustic communication technologies have achieved data transmission rates up to 48 kbps at distances around 2 km with spectral efficiency up to 4 bits/s/Hz. Improvements in spectral efficiency have been achieved through the implementation of modern technologies such as OFDM, MIMO, and high-order modulation schemes (8-PSK, 16-QAM). At the same time, the limited frequency resource and complex underwater environment restricts further growth in data transmission speeds.

The authors identify key challenges for underwater acoustic communication – multipath propagation, Doppler shifts, and spectral spreading – which complicate the stability and reliability of communication. Directions for further research are proposed, including detail analysis of Doppler spreading features, the use of spatially separated antennas for small size underwater vehicles, synthesized beamforming patterns, and adaptive modulation and coding to maximize data rate and communication quality in complex and varying underwater environmental conditions, as well as the use of high-frequency bands to increase system throughput.

The practical value of the work lies in the in-depth analysis of existing solutions, identifying their advantages and disadvantages, and forming recommendations to enhance the efficiency and reliability of UAC systems in changing underwater environments. The article also highlights the problem of the lack of industry standardization (except for the JANUS protocol), which complicates interoperability among heterogeneous systems, especially in coastal zones with numerous users. The article offers a classification of underwater object interaction scenarios, provides a comparative analysis of environmental impacts on UAC systems, and outlines promising directions for further development of effective and reliable underwater acoustic communication systems.

Keywords: underwater; acoustic; communications; efficiency; limitations; shallow; sea; multipath; propagation; Doppler; spectral.

Стаття надійшла до редакції 31.07.2025 р.

Прийнято до друку 10.09.2025 р.