

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Гладкіх Нікіта Дмитрович



УДК 681.883, 681.883.45

## ЦИФРОВИЙ ПІДВОДНИЙ АКУСТИЧНИЙ ЗВ'ЯЗОК В МІЛКОМУ МОРІ

Спеціальність 05.09.08 — прикладна акустика та звукотехніка

### **АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ — 2018

## Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України на кафедрі акустики та акустoeлектроніки.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
**Дідковський Віталій Семенович**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор, завідувач кафедри акустики та акустoeлектроніки

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор,  
**Мислович Михайло Володимирович**, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, завідувач відділом теоретичної електротехніки.

– кандидат технічних наук, доцент  
**Мелешко Микола Андрійович**, Національний авіаційний університет, професор кафедри комп'ютерних мультимедійних технологій.

Захист відбудеться «29» травня 2018 р. о 14:30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.19 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою 03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37, корпус 12, аудиторія 412.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «27» квітня 2018 р.



Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.Б. Швайченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування теми дослідження.** Система цифрового гідроакустичного зв'язку в умовах мілководних акустичних хвилеводів є необхідним елементом для розгортання і роботи по дослідженню світового океану за допомогою датчиків, сенсорів, автономних безпілотних підводних апаратів (АБПА). Оскільки корабель не може одночасно моніторити великі простори океану протягом тривалого часу на великих площах и в широкому діапазоні глибин застосовуються АБПА і датчики, які обмінюються даними по бездротовим каналам зв'язку. Бездротовий зв'язок дає широкі можливості для об'єднання цілого класу автономних апаратів в єдину інформаційну мережу з можливістю оперативного керування і моніторингу обстановки. Можна залишати стаціонарні, або дрейфуючі датчики на довгий час для збору даних без необхідності тримати плавзасоби поблизу, одночасно отримувати данні з широкої мережі таких засобів, що будуть покривати значні об'єми акваторій. Оперативність розгортання засобів для моніторингу акваторій також є сильною стороною АБПА. Для забезпечення надійної роботи АБПА, оперативного зв'язку і управління АБПА з кораблем, моніторингу широкої акваторії силами групи АБПА очевидною є необхідність розробки продуктивного, надійного і високоефективного бездротового зв'язку в морі і океані. Серед засобів, що забезпечують бездротовий зв'язок в товщі води найбільш ефективними, надійними і універсальними є засоби цифрового гідроакустичного (ЦГА) зв'язку. Саме розробці такого засобу зв'язку присвячена дана робота. Розробки підходів і теоретичних засад проектування таких засобів велась такими дослідниками, як: Кебкал К.Г., Кілфойл Д., Дідковський В.С., Коржик О.В., Пелеканакіс К., Стоянович М. та ін.. Основними напрямками дослідження були: розробка хвилевої теорії розповсюдження акустичних хвиль в гідроакустичних хвилеводах (Дідковський В.С., Коржик О.В., Пелеканакіс К., Стоянович М.), адаптація підходів прийнятих у радіозв'язку і космічному зв'язку до акустичних полів в гідроакустичних каналах (Кебкал К.Г., Кілфойл Д.), розробка статистичних моделей багатопроменевого розповсюдження акустичних сигналів в хвилеводах (Кілфойл Д.). Суттєвим недоліком робіт де використовується статистична модель розповсюдження акустичних сигналів в хвилеводах є ігнорування явища дисперсії. Недоліком більшості робіт з використанням хвилевої теорії є розгляд акустичного сигналу, як вузькосмугового, що протирічить вимогам по збільшенню пропускної здатності каналу і рідко зустрічається на практиці. Для усунення вказаних недоліків в останні роки такі розробники, як: Дідковський В.С., Коржик О.В. розглядають поширення широкосмугових імпульсних сигналів в хвилеводах в рамках хвилевої теорії. Такий підхід є більш строгим, враховує широкий спектр явищ пов'язаних з інтерференцією акустичних хвиль, нормальними модами хвилеводу, дисперсією, тощо. Основні співвідношення, що дозволяють проводити моделювання акустичних полів в хвилеводах розглядали в своїх роботах Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т., Петрищев О.М., Улітко А.Ф. Шаєн Ц.Ф., Ластовенко О.Р., Лісю-

тін В.Я., Ярошенко А.А., Бріллюен Л., Бреховських Л.М., Останні роботи Дідковського В.С., Коржика О.В. присвячені аналізу векторного поля акустичної інтенсивності в хвилеводі і взаємодії різночастотних коливань в хвилеводі. Складність структури акустичних полів в хвилеводах призводить до зниження продуктивності систем цифрового гідроакустичного (ЦГА) зв'язку в мілководних каналах аж до їх повної непрацездатності. Цей факт призводить до необхідності розробки підходу по зменшенню впливу інтерференції, дисперсій і міжчастотної взаємодії на продуктивність ЦГА. Основне протиріччя, що постає перед розробником полягає в наступному:

- Необхідно збільшувати частоти зв'язку для збільшення швидкості передачі даних і зменшення впливу дисперсії на складний акустичний сигнал.
- Необхідно зменшувати частоту для зменшення впливу неоднорідностей в хвилеводі і збільшення дальності зв'язку.

Приведене протиріччя вимагає від розробника пошуку компромісу і адаптації до конкретних умов. Це призводить до неможливості розробки універсальних засобів ЦГА зв'язку, що будуть адаптовані до будь-яких умов, або до вкрай невисокої продуктивності таких засобів. В роботі представлено один з можливих алгоритмів пошуку компромісного рішення, а саме систему адаптації до умов каналу. Представлена система експериментально перевірена і підтвердила свою ефективність.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі акустики та акустoeлектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Виконані в дисертації дослідження були використані в рамках: держбюджетної прикладної науково-дослідної роботи «Розробка широкосмугового акустичного вушного ехо-спектрометра та нової ефективною програми універсального аудіологічного скринінгу новонароджених» (№ державної реєстрації 0116U003795). Експериментальна частина роботи було виконана на базі Київського науково дослідного інституту гідроапаратури і на факультеті акустики Технічного Університету міста Ле-Ман (Франція). Виконані дослідження були проведені за сприяння програми «Erasmus+».

**Мета і завдання дослідження** – розробка теоретичних засад, принципів і підходів до проектування засобів цифрового гідроакустичного зв'язку, що забезпечить надійний і ефективний обмін інформацією через водне середовище в умовах мілководних акустичних каналів з урахуванням інтерференції та дисперсій. Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1. розробка розрахункової моделі гідроакустичного каналу, яка найбільш повно відповідає умовам протяжних каналів невеликої глибини і дозволяє моделювати поширення широкосмугових акустичних сигналів в хвилеводі;
2. визначення найбільш значущих причини погіршення якості зв'язку в мілководних каналах і запропонувати підхід для зменшення їх впливу;

3. визначення і експериментальна перевірка ефективності запропонованого підходу, в якості критеріїв оцінки ефективності використовувати: ефективність використання частотного діапазону, тривалість імпульсу, розмір кодового алфавіту, швидкістю передачі даних, імовірність бітової помилки під час передачі.

*Об'єкт дослідження* – процес передачі цифрових даних між абонентами за допомогою коротких імпульсних акустичних сигналів в хвилеводах.

*Предмет дослідження* – система цифрового гідроакустичного зв'язку в умовах мілководних акустичних хвилеводів.

**Методи дослідження.** При виконанні дослідження в якості моделі гідроакустичного хвилеводу в роботі розглядається модель хвилеводу Пікеріса, використовується хвилева теорія власних мод хвилеводу. Для моделювання широкосмугових акустичних сигналів зазначена модель використовуються для розрахунку аплітудних і фазових коефіцієнтів членів ряду Фур'є, що утворений розкладанням в ряд багаточастотного акустичного сигналу. На основі розробленої моделі гідроакустичного (ГА) хвилеводу було проведено комп'ютерне моделювання в ході якого створена модель була детально проаналізована і розроблені рекомендації для проектування ЦГА систем зв'язку. Для перевірки приведених рекомендацій було проведено експериментальне дослідження системи зв'язку на основі подвійної фазової маніпуляції, побудовано квантилі розподілення фази отриманих послідовностей, отримано закон розподілення фази. Ефективність запропонованих підходів було експериментально підтверджено. В роботі розроблено метод адаптації до умов каналу. Ефективність методу було підтверджено експериментально. Група експериментів проводилася в залежності від:

1. "вільний" простір або гідроакустичний канал;
2. ширина частотного діапазону;
3. нижня гранична частота займаного діапазону;
4. верхня гранична частота діапазону;
5. тривалість імпульсу;
6. розмір кодового алфавіту;
7. інтервал між суміжними імпульсами в повідомленні;
8. тип використовуваної модуляції в системі зв'язку;

Для визначення продуктивності системи ЦГА в роботі використовуються:

1. швидкість передачі даних;
2. імовірність бітової помилки;

### 3. ефективність використання частотного діапазону.

Оскільки розроблена комп'ютерна модель продемонструвала досі мало вивчене явище "вихорів" акустичної енергії в хвилеводі, в роботі було проведено експеримент для підтвердження винайденого явища. Результати комп'ютерного моделювання порівняно з результатами лабораторного експерименту.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

1. В роботі вперше розроблено теоретичні основи та проведено експериментальні дослідження що до реалізації систем кодового гідроакустичного зв'язу з урахуванням особливостей розповсюдження акустичних імпульсів в акустичних хвилеводах.
2. В роботі вперше розглянуто поширення "пачки" акустичних радіоімпульсів з амплітудною і фазовою модуляцією в плоско-паралельному гідроакустичному каналі з урахуванням дисперсії.
3. Проведено оцінку швидкості поширення акустичної енергії пачки імпульсів в хвилеводі, з врахуванням областей сингулярності для різних глибин розташування абонентів.
4. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень вперше показано зв'язок швидкості передачі даних з розрядністю використовуваного коду, шириною робочої смуги частот, тривалістю акустичного імпульсу для кодового гідроакустичного зв'язу в мілкому морі.
5. Розроблено метод динамічної адаптації до умов каналу, що знижує вплив інтерференції і дисперсії на основі сигналів з модуляцією несучої частоти неперервною функцією.
6. Експериментально підтверджено наявність в ГА каналі вихорів потоку акустичної енергії внаслідок канального розповсюдження і взаємодії акустичних мод.

### **Практичне значення отриманих результатів**

1. Розроблена модель гідроакустичного каналу дозволяє прогнозувати ефективність обраної реалізації системи кодового гідроакустичного зв'язу з урахуванням особливостей розповсюдження акустичних імпульсів в акустичних хвилеводах.
2. Детально розглянутий вплив дисперсії на форму акустичного імпульсу є основою для вибору функції на основі якої проводиться розширенням спектру сигналу і є базисом для розробленого в роботі методу адаптації до умов каналу.
3. Аналіз областей сингулярності в хвилеводі дозволяє рекомендувати використання сигналів з розширенням спектру, що зменшить вплив частотних замирань в каналі і дозволить збільшити надійність системи ЦГА зв'язку.

4. Отримані в роботі криві, що відображають зв'язок швидкості передачі даних з розрядністю використовуваного коду, шириною робочої смуги частот, тривалістю акустичного імпульсу для кодового гідроакустичного зв'язку в мілкому морі є основою для моделювання ефективності систем ЦГА зв'язку.
5. Розроблений метод динамічної адаптації до умов каналу знижує вплив інтерференції і дисперсії дозволяє значно підвищити продуктивність ЦГА зв'язку.
6. Експериментальне підтвердження наявності в ГА каналі вихорів потоку акустичної енергії є підтвердженням адекватності обраної моделі, надає строге пояснення явища частотних завмирань в каналі, є важливим фактором для моделювання ЦГА зв'язку в мілкому морі.
7. Результати дисертаційної роботи впроваджені в Державному підприємстві «Київський науково дослідний інститут гідроприладів» при виконанні розрахунків характеристик засобів підводного зв'язку по контракту № STE-1-31-K/KE-17 від 18.04.2017р. з РК, що підтверджується відповідним актом впровадження. Отримані результати використовуються в навчальному процесі КПІ імені Ігоря Сікорського при підготовці технічних спеціалістів з акустики, зокрема, по дисципліні «Конструювання акустичних пристроїв та систем» та «Моделювання акустичних процесів та полів».

**Особистий внесок здобувача.** У наукових працях, виконаних в співавторстві і особисто здобувачу належить постановка та розв'язок задачі, моделювання задачі, систематизація та аналіз отриманих результатів моделювання. В патенті здобувач приймав участь в розробці формули винаходу і проводив патентні дослідження.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі акустики та акустoeлектроніки факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» під керівництвом доктора технічних наук, професора Дідковського В.С.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації були обговорені на

- V науково-технічній конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки», м. Київ, 2015 р;
- акустичному симпозіумі «КОНСОНАНС – 2015», м. Київ, 2015 р;
- IV міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми координації воєннотехнічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки 2016», м. Київ, 2016 р;
- конференції «Системи обробки інформації». м. Харків, 2015;

- на семінарах на факультеті акустики технічного університету міста Ле-Ман, LAUM, 2016.

**Публікації.** Основний зміст роботи відображено у 10 наукових працях, з них 6 у провідних наукових фахових виданнях (5 статей в Українських виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз даних, 1 стаття у іноземному виданні), 1 патент на корисну модель та 3 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура і об'єм дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Загальний обсяг роботи складає 136 сторінок, у тому числі 111 сторінок основного тексту, 60 рисунків та список використаних джерел із 66 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано постановку задачі, мету і ціль дослідження, описано наукову новизну і практичну цінність результатів роботи, наведено дані стосовно апробації результатів дисертації.

У **першому розділі** описується стан та рівень дослідженості задач підводного акустичного кодового зв'язку, приводяться показники оцінки якості ЦГА зв'язку, формулюються задачі по управлінню частотним діапазоном в системі ЦГА зв'язку.

Основним критерієм оцінки системи цифрового гідроакустичного зв'язку обрано «продуктивність». В роботі вперше визначено продуктивність в чисельному еквіваленті, та надано розрахункову формулу продуктивності ЦГА зв'язку. Продуктивність залежить від швидкості передачі даних ( $C$ , біт/с), імовірності бітової помилки в передаваних повідомленнях ( $I_b$ ), ефективності використання частотного діапазону ( $\frac{I_\Sigma}{\Delta f}$ , біт/Гц), сумарної споживаної потужності ( $P_\Sigma$ , Вт) засобів цифрового зв'язку. Значення продуктивності розраховується наступним чином:

$$E = \frac{k_c C - I_b + k_e \frac{I_\Sigma}{\Delta f}}{k_p P_\Sigma}. \quad (1)$$

де коефіцієнти  $k_c$ ,  $k_e$ ,  $k_p$  – вагові коефіцієнти,  $I_\Sigma$  – загальна кількість передаваної інформації в частотному діапазоні  $\Delta f$ . Вагові коефіцієнти задаються розробником наступним чином:

$$\begin{cases} k_c &= 1 / C_t, \\ k_e &= \Delta f_{av} / C_t, \\ k_p &= 1 / P_{av} \end{cases} \quad (2)$$

. де  $C_t$  – мінімальне значення швидкості передачі для вирішення поставленої задачі,  $f_{av}$  – доступний частотний діапазон,  $P_{av}$  – найбільша можлива споживана потужність засобів ЦГА зв'язку.

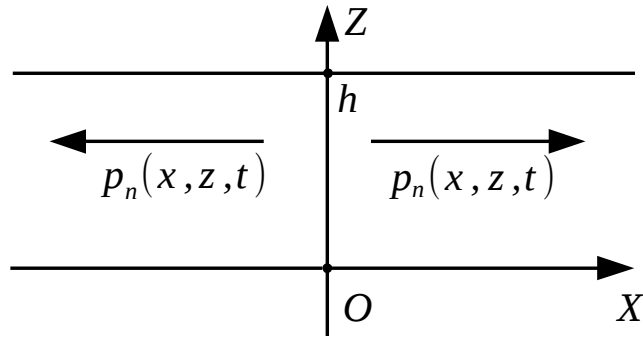


Рис. 1: Плоско-паралельний хвилевід

В першому розділі розглянуто методи кодування інформації в ЦГА зв'язку, проведено порівняльний аналіз амплітудної, частотної, фазової модуляції на основі критерію продуктивності. За результатами аналізу відомих експериментальних даних обрано, як найбільш продуктивний метод подвійної фазової маніпуляції (ПФМ). ПФМ – це окремий випадок фазової модуляції, відноситься до методів кодування з розширенням спектру. В роботі розглядається розширення спектру на основі неперервних функцій.

**Другий розділ** присвячено розгляду особливості розповсюдження імпульсного акустичного сигналу в хвилеводі. Хвилевід описується за допомогою спрощеної моделі хвилеводу Пікеріса. Така модель враховує наявність двох обмежуючих поверхонь:

- поверхня вода-повітря;
- поверхня вода-ґрунт;

Дно характеризується, як нескінченний однорідний простір. Геометрія хвилеводу – плоско-паралельний об'єм. Середовище вважається ізотропним, однорідним, ідеально стискуваним з швидкістю звуку  $c$  і густиною  $\rho$ , що не залежать від координат  $z, x$ . Акустичний тиск в хвилеводі в обраній моделі задається розподілом коливальної швидкості на осі  $OZ$  Рис. 1. Граничні умови моделі описують поверхню вода-повітря як абсолютно м'яку, а поверхню вода-ґрунт – абсолютно жорстку:

$$\begin{cases} \phi(x, z)|_{z=h} = 0 \\ \left. \frac{\partial \phi(x, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Джерело створює акустичне поле, що описується рівнянням Гельмгольца для потенціалу  $\phi$  і звукового тиску  $p$ :

$$\begin{cases} \Delta \Phi + k^2 \Phi = 0 \\ \Delta p + k^2 p = 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Phi &= \Phi(x, z)e^{-i\omega t} \Big|_{z=0}, \\ p &= p(x, z)e^{-i\omega t} \Big|_{z=0} \end{cases} \quad (5)$$

Знаходячи потенціал поля акустичного тиску і акустичний тиск (5) через оператор Лапласа і використовуючи граничні умови (3) знайдемо розв'язок диференційного рівняння за методом Фур'є. Після ряду перетворень отримаємо наступне рівняння:

$$\phi(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos\left(\frac{\pi(1+2n)}{2h}\right) z \cdot e^{i(\omega t - k_n x)} \quad (6)$$

В якості розв'язку дисперсійного рівняння отримаємо:

$$k_n = k_0 \sqrt{1 - \left[\frac{(2n+1)\lambda}{4h}\right]^2} \quad (7)$$

де  $h$  – глибина хвилеводу,  $(x, z)$  – координати в хвилеводі,  $z_0$  – положення випромінювача. З дисперсійного рівняння випливає, що поле в хвилеводі на моді з номером  $n$  має граничну частоту:

$$f_{\text{гр}} = \frac{(2n+1)c}{4h} \quad (8)$$

З (7) випливають фільтраційні властивості хвилеводу, що детально розглянуті в третьому розділі.

Коефіцієнт  $B_n$  з (6) визначається характеристиками джерела. Потенціал поля акустичного тиску в хвилеводі (6) може бути представленим у вигляді:

$$\phi(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n u_{n+1} \cdot e^{i(\omega t - k_n x)} \quad (9)$$

де  $u_{n+1}$  – власні функції, що відповідають задачі Штурма-Ліувілля для рівняння Гельмгольца. Задамо розподіл коливальної швидкості в площині  $x = 0$ , що задається джерелом:

$$\phi_{\text{source}}(0, z, t) = \phi_{\text{source}}(z) e^{i(\omega t - k_n x)} \quad (10)$$

Вважаємо тиск в хвилеводі в площині  $x = 0$  рівним тиску, що створюється джерелом в цій площині, тоді:

$$\phi_{\text{source}}(z) = \sum_{n=0}^{\infty} b_{n+1} u_{n+1} \cdot e^{i\omega t} \quad (11)$$

де  $b_{n+1}$  – коефіцієнти ряду власних функцій джерела  $\phi_{\text{source}}(z)$ , що відповідають задачі Штурма-Ліувілля. Використаємо функцію Дірака і ортонормованість

власних функцій і перемножимо частини рівняння (11) на  $u_{m+1}zdz$  та інтегруючи в межах від 0 до  $h$  отримаємо рівняння, що описує потенціал поля:

$$\phi(x, z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos\left(\frac{\pi(1+2n)}{2h}z\right) \cdot e^{i(\omega t - k_n x)} \quad (12)$$

З потенціалу поля знайдемо константу, що визначає роботу джерела:

$$B_n = \frac{2}{h} \int_{n=0}^{\infty} \psi_{source}(z) \sin\left(\frac{\pi(1+2n)}{2h}z\right) dz \quad (13)$$

Якщо джерело вважати точкою, то потенціал поля акустичного тиску знаходиться у вигляді:

$$\phi_n = \frac{i\nu_0}{2h} \sum_{n=\epsilon}^{\infty} H_0^{(1)}(k_n x) \cos\left[\frac{\pi(2n+1)}{2h}z_0\right] \cos\left[\frac{\pi(2n+1)}{2h}z\right] e^{-i\omega t} \quad (14)$$

де  $H_0^{(1)}$  – функція Ганкеля першого роду, нульового порядку,  $\nu_0$  – коливальна швидкість поверхні джерела,  $\epsilon$  – деяке додатне ненульове число близьке до 0,  $k_n$  – хвильове число, знаходиться у вигляді (7). Використовуючи приведені рівняння акустичного поля в хвилеводі в роботі побудовано чисельну комп'ютерну модель хвилеводу. Використовуючи цю модель було досліджено вплив хвилевідного розповсюдження на акустичні сигнали. До основних факторів впливу віднесено:

- частотно залежну затримку розповсюдження акустичного сигналу;
- спотворення форми акустичного сигналу;
- втрату низькочастотних складових спектру потужності акустичного сигналу;
- інтерференція різночастотних акустичних імпульсів.

Також в цьому розділі приводиться методика оцінки надлишкової затримки сигналу і методика визначення швидкості перенесення енергії акустичним імпульсом за допомогою кореляційного фільтра.

Оцінку деформації акустичних імпульсів проводимо в роботі за допомогою функції ступеню схожості сигналів:

$$\rho = \frac{1}{E_b} \int_0^T p_1(t) \cdot p_2(t) dt \quad (15)$$

Функція (15) буде тим більша, чим більш повно співпадають акустичні сигнали  $p_1(t)$  і  $p_2(t)$ . Тут енергія одного символу:

$$E_b = \int_0^T p^2(t) dt \quad (16)$$

В умовах ізотропного шуму імовірність похибки можна визначити:

$$P_b = Q \left( \sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{N_0}} \right) \quad (17)$$

де додаткова функція помилки Гауса визначається, як:

$$Q(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2) dt \quad (18)$$

аргументом (18) виступає:

$$x = \sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{N_0}} \quad (19)$$

Вираз (15) є функцією взаємної кореляції з коефіцієнтом  $\rho(\tau)$ , для якої величина  $\tau$  визначається тривалістю деформованого імпульсу повідомлення.

Необхідність оцінки швидкості перенесення енергії акустичним імпульсом ставить питання про фізичну модель процесу розповсюдження і взаємодії різночастотних компонент в хвилеводі. Скориставшись моделлю хвиль Бріллюєна для випадку двох частот отримаємо вираз, що описує сумарну інтенсивність, як суму трьох компонент:

$$I_{x\Sigma} = \langle W_{xn}^I \rangle + \langle W_{xn}^{II} \rangle + \langle \Delta W_{xn}^{(I,II)} \rangle. \quad (20)$$

Де  $W_{xn}^I$ ,  $W_{xn}^{II}$ ,  $W_{xn}^{(I,II)}$  – потоки потужності акустичної хвилі через переріз хвилеводу від хвиль з частотами  $\omega_I$ ,  $\omega_{II}$  і результату їх взаємодії відповідно. Задавшись деяким періодом спостереження  $T_0$ , що є шириною зони високої кореляції сигналів з частотами  $\omega_I$  і  $\omega_{II}$  в околі точки спостереження нескладно отримати вираз для огинаючої сигналу:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \cos(\omega_I t - k_n^I x) \cos(\omega_{II} t - k_n^{II} x) dt = \\ & = \frac{\sin([\omega_I - \omega_{II}] T_0 - [k_n^I - k_n^{II}] x)}{2([\omega_I - \omega_{II}] T_0 - [k_n^I - k_n^{II}] x)}. \end{aligned} \quad (21)$$

Права частина (21) може бути спрощена введенням умови  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_I - \omega_{II}}$ :

$$\begin{aligned} & \frac{\sin([\omega_I - \omega_{II}] T_0 - [k_n^I - k_n^{II}] x)}{2([\omega_I - \omega_{II}] T_0 - [k_n^I - k_n^{II}] x)} = \\ & = -\frac{\sin(k_n^I - k_n^{II} x)}{2(2\pi - (k_n^I - k_n^{II}) x)}. \end{aligned} \quad (22)$$

В силу властивості функції  $\sin(\dots)$  чисельник приймає значення:

$$\begin{cases} 0, & x = \frac{p\pi}{k_n^I - k_n^{II}}, \\ 1, & x = \frac{\pi/2 + 2p\pi}{k_n^I - k_n^{II}}, \\ -1, & x = \frac{3\pi/2 + 2p\pi}{k_n^I - k_n^{II}} \end{cases} \quad (23)$$

Таким чином, було доведено наявність існування знакозмінного доданку потоку потужності акустичної енергії в хвилеводі з умови взаємодії декількох різночастотних складових. Це призводить до появи в хвилеводі зон високої кореляції і акустичних вихорів. Перше з цих явищ можна проілюструвати з використанням хвиль Бріллюена:

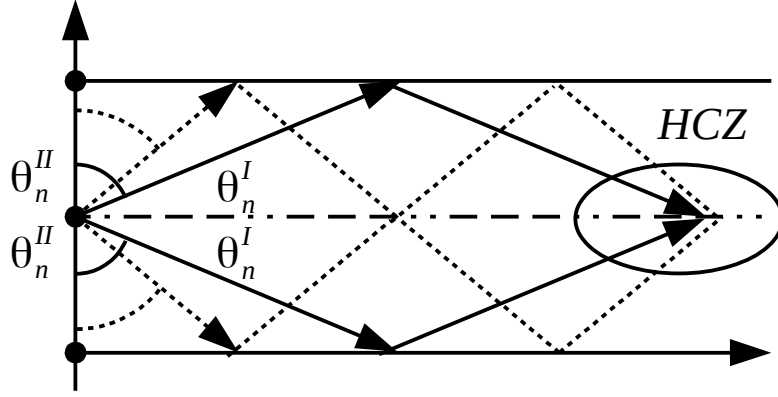


Рис. 2: Формування зон високої кореляції хвиль Бріллюена.

Розглянемо більш детально векторне акустичне поле в хвилеводі. Для гармонічних коливань виконується рівність:

$$I = 0.5pV \cos(\Delta\phi_{pv}) \quad (24)$$

де  $\Delta\phi_{pv}$  – фазовий зсув між функціями тиску  $p$  і вектору коливальної швидкості  $V$ . Для визначення інтенсивності необхідно визначити тиск і компоненти коливальної швидкості:

$$\begin{cases} p &= \rho_0 \frac{d\phi_n}{dt} \\ V_i &= -\frac{d\phi_n}{di} \end{cases} \quad (25)$$

Знаючи потенціал поля (14) підставимо його в вираз (25) і опустимо залежність від  $e^{-i\omega t}$ . Після ряду перетворень отримаємо:

$$\begin{cases} I_i &= \Re p \Re V_i + \Im p \Im V_i; \\ I_x &= AB \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} C1_n(z, z_0) k_m C1_m(z, z_0) J_0^1(k_n x) N_1^1(k_m x) - \\ &- AB \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} C1_n(z, z_0) k_m C1_m(z, z_0) N_0^1(k_n x) J_1^1(k_m x); \\ I_z &= AB \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} C1_n(z, z_0) k_m C2_m(z, z_0) J_0^1(k_n x) N_1^0(k_m x) - \\ &- AB \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} C1_n(z, z_0) k_m C2_m(z, z_0) N_0^1(k_n x) J_0^1(k_m x); \end{cases} \quad (26)$$

З (26) випливають умови рівності інтенсивності нулю:

$$\begin{cases} \Re V_x(x_0, z_0) = \Im V_x(x_0, z_0) = 0, \\ \Re V_z(x_0, z_0) = \Im V_z(x_0, z_0) = 0 \end{cases} \quad (27)$$

$$\Re p(x_0, z_0) = \Im p(x_0, z_0) = 0 \quad (28)$$

$$\begin{cases} \phi(p(x_0, z_0)) - \phi(V_x(x_0, z_0)) = n\frac{\pi}{2}, \\ \phi(p(x_0, z_0)) - \phi(V_z(x_0, z_0)) = n\frac{\pi}{2}, \\ n = 1, 3, 5, \dots \end{cases} \quad (29)$$

Також поле інтенсивності буде рівним нулю у випадках комбінації умов (27, 28, 29).

В **третьому розділі** представлено результати моделювання впливу хвилевідного розповсюдження на акустичні імпульси. Розглядаються імпульси з тональним заповненням і частотно-модульовані із зростаючою частотою і спадною. Форма імпульсу в ідеальному хвилеводі з жорсткими стінками проілюстровано на Рис. 3. На Рис. 3 показано імпульси з амплітудними і фазовими спектрами:

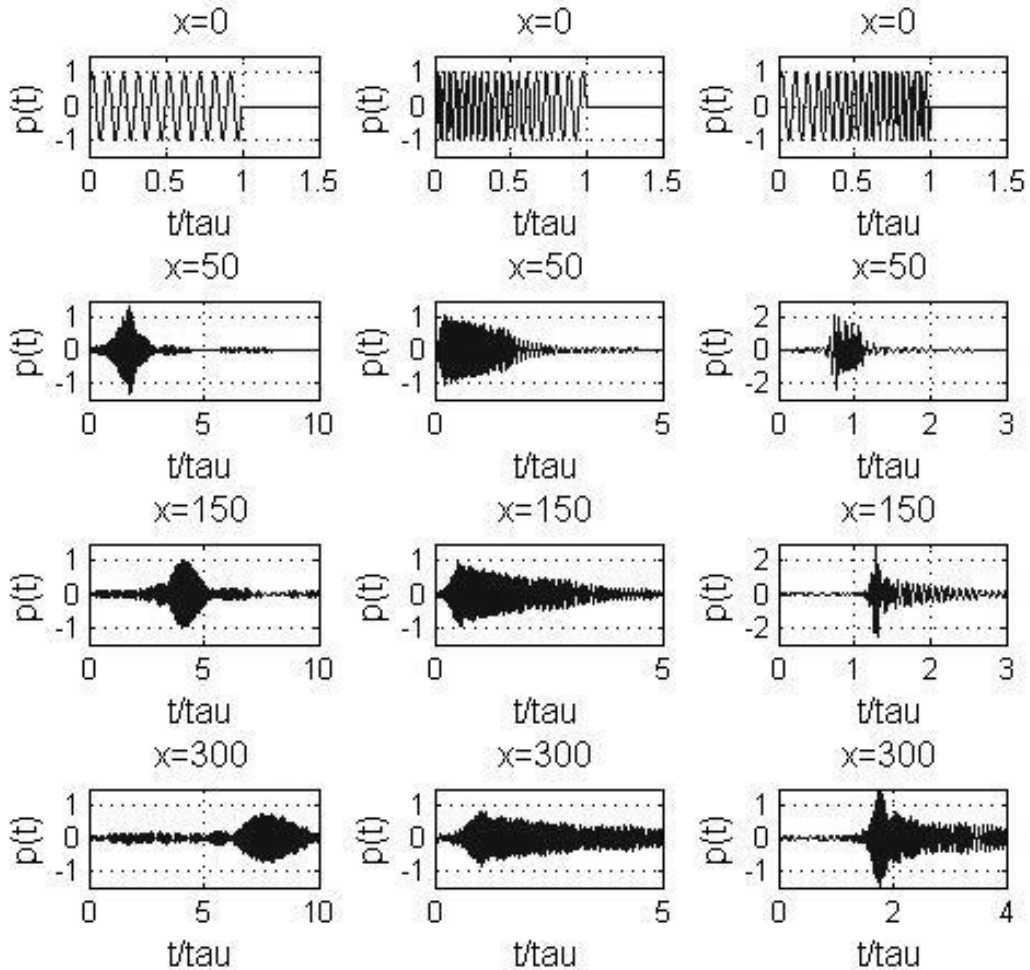


Рис. 3: Деформація акустичних імпульсів в хвилеводі

Дисперсія при розповсюдженні акустичного імпульсу в хвилеводі викликає

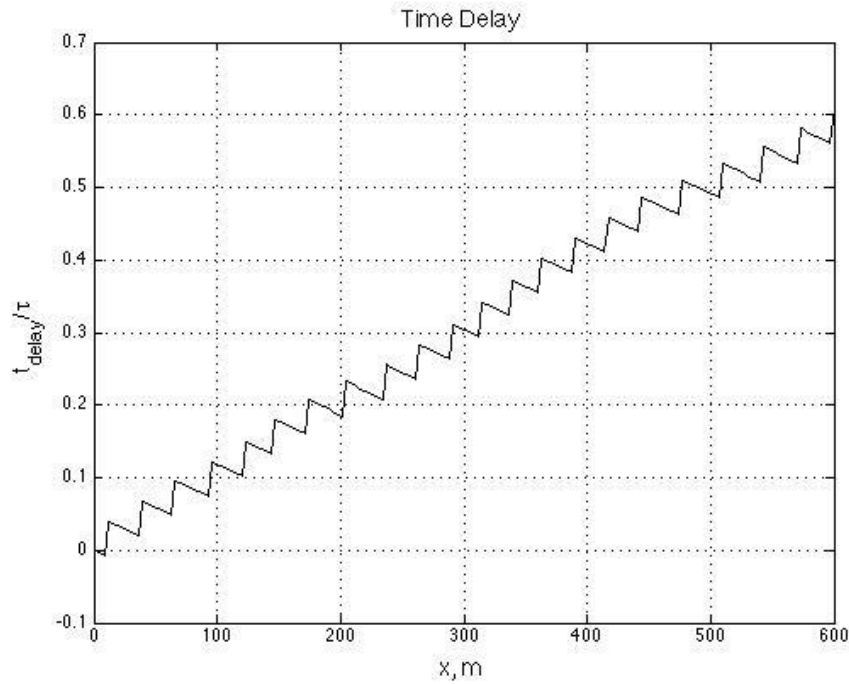


Рис. 4: Характеристики швидкості розповсюдження акустичного імпульсу в хвилеводі.

надлишкову затримку (Рис. 4). З Рис. 4 видно «ступінчасту» форму вказаної залежності. Така поведінка кривої пов'язана з особливостями розповсюдження імпульсних сигналів в умовах ГА каналів.

Надлишкова затримка є не тільки просторово залежною, а і частотнозалежною (Рис. 5). З Рис. 5 видно невідповідність швидкості переносу енергії груповій

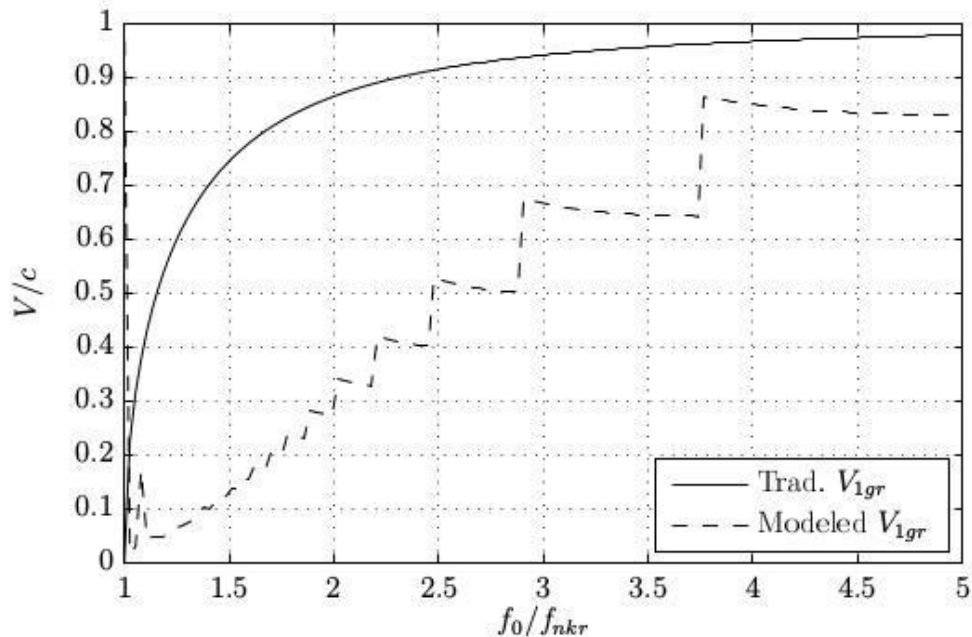
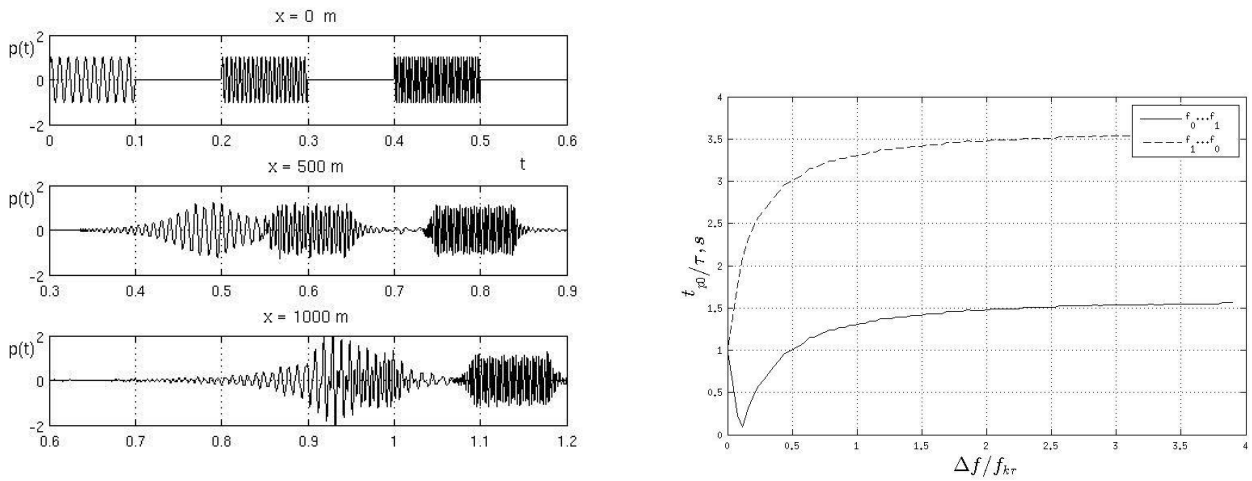


Рис. 5: Швидкість переносу енергії акустичним імпульсом в хвилеводі.

швидкості. Для різночастотного коду така особливість розповсюдження акусти-

чних імпульсів може вилитись у повну деформацію передаваної послідовності в наслідок «інтерференції» різночастотних сигналів. Покажемо на прикладі трьох-частотного коду (Рис. 6).



(а) Деформація трьох-частотного коду,  $f_0 < f_1 < f_2$ . (б) Інтервал між різночастотними імпульсами в ГА каналі.

Рис. 6: Деформація міжімпульсного інтервалу.

В загальному випадку тривалість паузи між двома імпульсами відносно її початкового значення для точки  $x = 474$  м для імпульсів з частотами  $f_1 = 2f_0$  покажемо на Рис. 7. На графіку показано 2 ситуації:

- $f_1 = 2f_0$ ;
- $f_0 = 2f_1$ .

Всі ці фактори впливають на продуктивність ЦГА зв'язку, що виливається у збільшенні імовірності бітової помилки (Рис. 8). Найгіршою є ситуація  $x = 474$ м, коли імпульси в значній мірі інтерферують один з одним.

Моделювання векторного поля в хвилеводі (Рис. 9(а), Рис. 9(б)) показує існування «вихорів» потоку акустичної енергії в сідлових точках обумовлених (27, 28, 29). Наявні «вихори» є однією з причин частотних «завмирань» в каналі. Їх присутність створює зони де абоненти зв'язку не можуть встановити контакт, періодичність цих зон і їх протяжність обумовлюють необхідність враховувати цю особливість ГА каналу і вживати заходів по управлінню частотним діапазоном каналу зв'язку.

**Четвертий розділ** присвячено результатам експериментальних досліджень. В роботі було проведено 3 групи експериментів:

1. Експериментальне підтвердження вихрової природи інтенсивності в хвилеводі.
2. Вимірювання продуктивності зв'язку на основі диференціального 4-х позиційного фазового кодування сигналу з розширенням спектру.

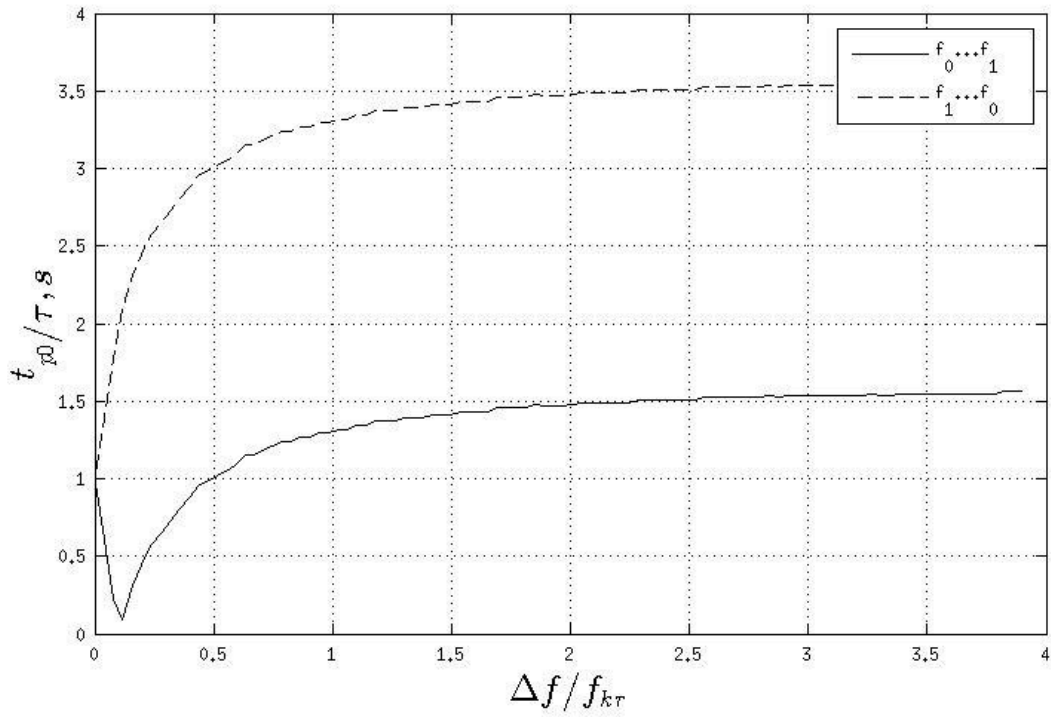


Рис. 7: Інтервал між різночастотними імпульсами в ГА каналі.

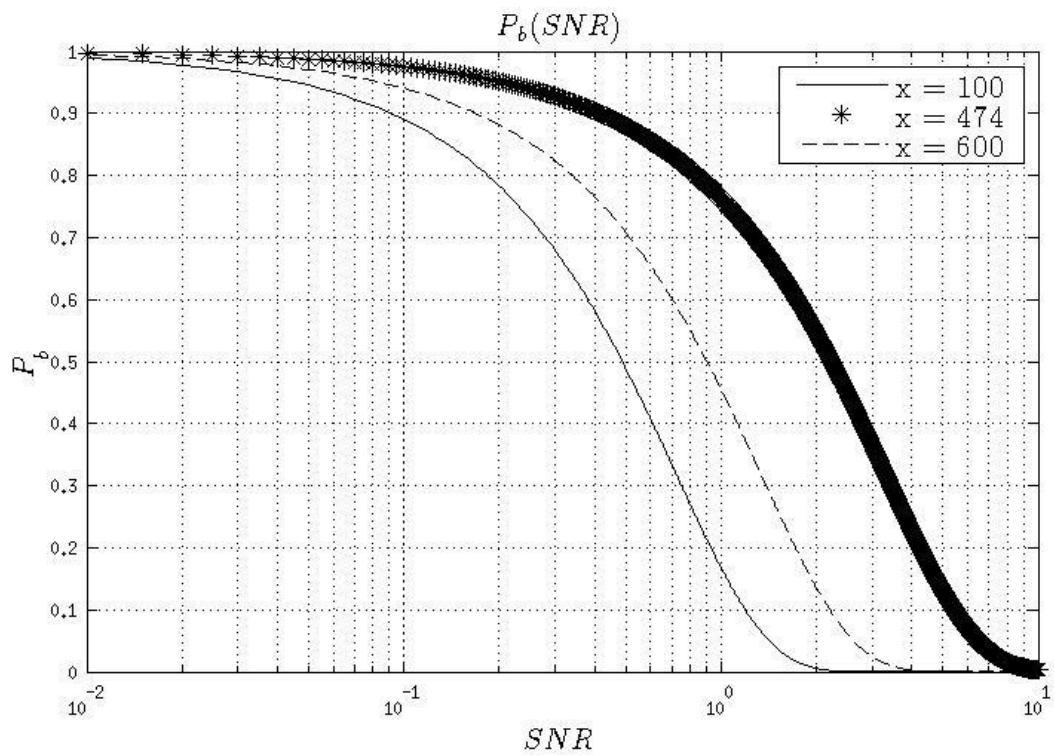


Рис. 8: Імовірність похибки.

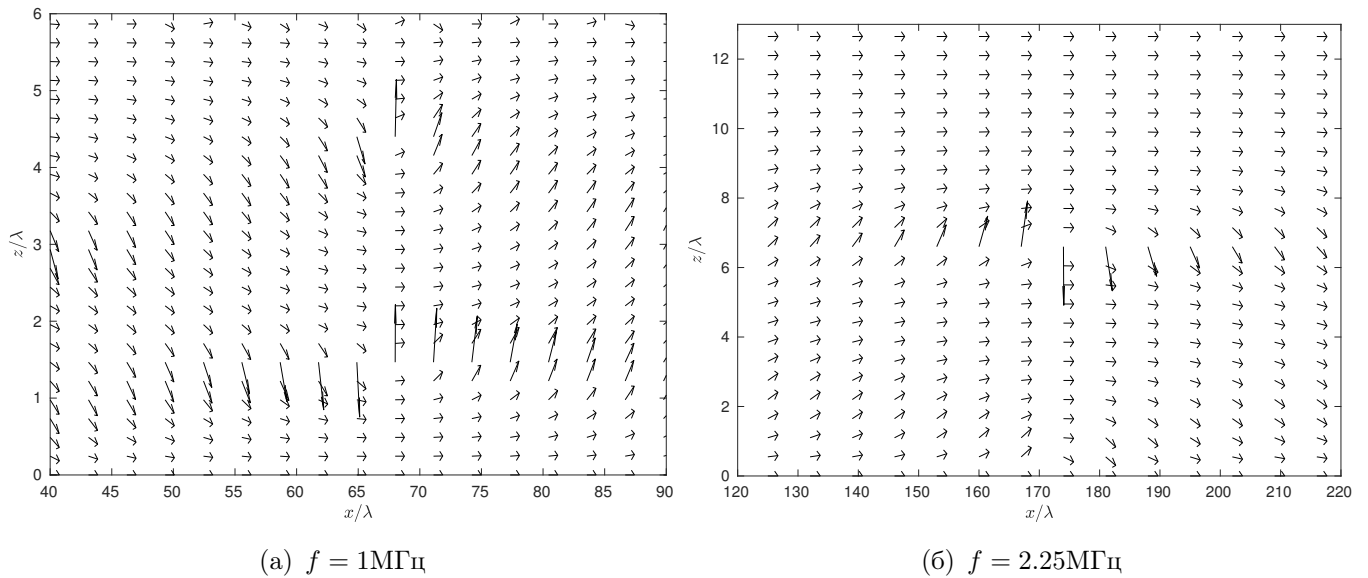


Рис. 9: Векторне поле інтенсивності

3. Вимірювання продуктивності зв'язку на основі часового кодування сигналу з розширенням спектру і алгоритмом адаптації.

### Експериментальне підтвердження вихрової природи інтенсивності в хвилеводі

Приведені в другому розділі умови для виникнення зон з нульовим рівнем інтенсивності акустичного поля надають строге пояснення виникненню зон «частотних завмирань каналу». Для підтвердження справедливості висунутих в першому розділі спрощень і припущень, а також для підтвердження отриманих результатів моделювання акустичного поля в ГА каналі було проведено групу експериментів по отриманню характеристик акустичного поля в хвилеводі експериментальним шляхом.

Також в цій групі експериментів було отримано експериментальне підтвердження результатам моделювання швидкості переносу енергії, що були отримані в третьому розділі.

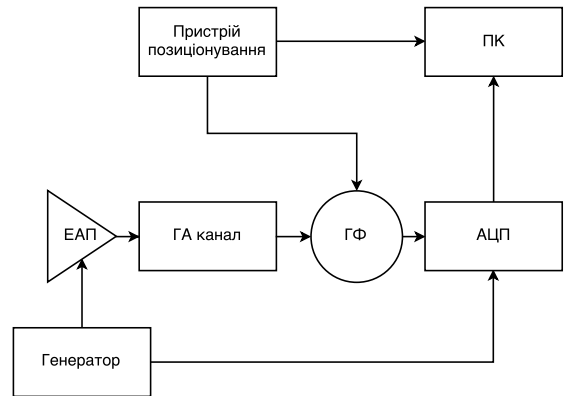
**Мета експерименту** – експериментально отримати векторні характеристики акустичного поля в хвилеводі і порівняти їх з фізичною і комп'ютерними моделями. Практичний інтерес являло собою дослідження перенесення енергії акустичних коливань в хвилеводі першими модами в частотному діапазоні близькому до критичної частоти хвилеводу. Вимірювальна камера розташована в Лабораторії Акустики Університету Ле-Ману і показано на Рис. 10(а).

Фізичним параметром, що вимірювався безпосередньо був акустичний тиск в різних точках хвилеводу. Схема вимірювального стенду представлена на Рис. 10(б). На схемі відсутній підсилювач потужності і вхідний підсилювач. На таких невеликих відстанях в даному обладнанні не було потреби і отримані сигнали не містять

таким чином спотворень, що спричинені підсилювачами.



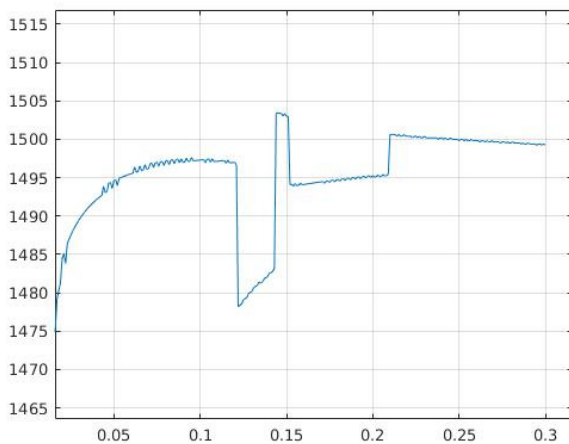
(а) Вимірювальний об'єм



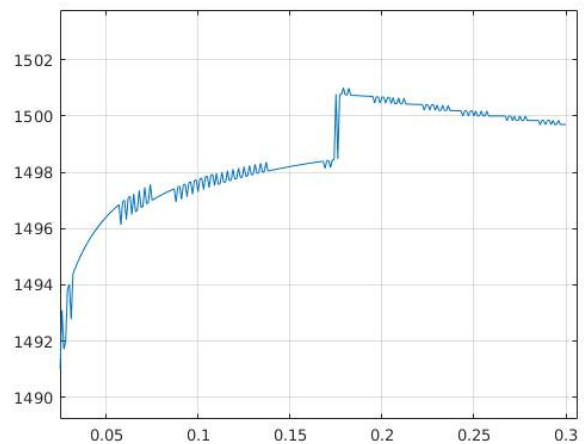
(б) Схема експериментальної установки.

Рис. 10: Експериментальна установка.

На Рис. 10(б) схему проведення експерименту. На Рис. 11 показано результати моделювання залежності швидкості розповсюдження акустичного імпульсу в хвилеводі для акустичного імпульсу на частотах 1 МГц і 2.25 МГц. На Рис. 12



(а) 1М Гц



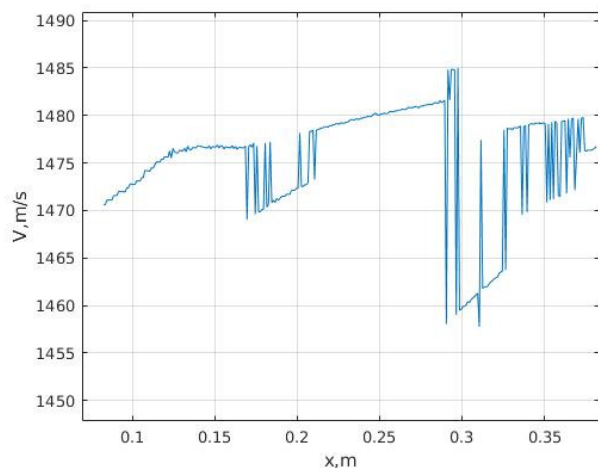
(б) 2.25 МГц

Рис. 11: Швидкість розповсюдження акустичного імпульсу в хвилеводі.

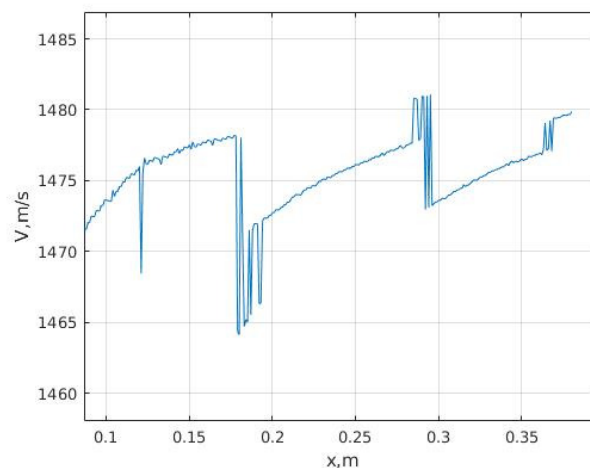
показано результат виміряних в результаті експерименту залежностей швидкості розповсюдження акустичного імпульсу в хвилеводі для акустичного імпульсу на частотах 1 МГц і 2.25 МГц. По осі ординт відкладено швидкість розповсюдження сигналу в точку прийому в м/с.

На Рис. 13 показано результат вимірювання акустичного тиску в хвилеводі вздовж осі у порівнянні з комп'ютерною моделлю.

Вихори інтенсивності отримані в результаті моделювання на Рис. 9 наявні в



(a) 1 МГц



(б) 2.25 МГц

Рис. 12: Швидкість розповсюдження акустичного імпульсу в хвилеводі.

тих же точках, що і в отриманих під час експерименту кривих, що видно з Рис. 13. Це підтверджує висунуті припущення і вказує на правильність обраної моделі.

В результаті цієї групи експериментів було отримано «ступінчасту» залежність швидкості розповсюдження акустичного імпульсу в каналі, що було передбачено під час фізичного і комп'ютерного моделювання (Рис. 12). Також було отримано експериментальне підтвердження наявності «вихорів» інтенсивності акустичного поля в хвилеводі, що з'являються в наслідок взаємодії декількох мод хвилеводу, що переносять широкополосний імпульсний сигнал.

### Вимірювання продуктивності зв'язку на основі диференціального 4-х позиційного фазового кодування сигналу з розширенням спектру

Для підтвердження розрахованого в першому розділі значення продуктивності було проведено порівняння отриманих експериментальним і розрахунковим шляхами значень продуктивності ЦГА зв'язку на основі ПФМ.

**Мета експерименту** – визначення продуктивності системи ЦГА зв'язку заснованої на методі ПФМ з розширенням спектру в експериментальних умовах, отримання ймовірнісних характеристик розподілення фази акустичного сигналу при роботі з парою широкополосних оборотних ЕАП, експериментальне визначення BER в умовах сильної реверберації.

Експеримент проводився в басейні (Рис. 14(а)). Об'єм басейну можна назвати ревербераційною камерою, оскільки його стінки виконано із оргскла і вони добре відбивають акустичні хвилі. Габаритні розміри вимірювального простору: 4 м в довжину, 2 м – ширина, 2.5 м – висота.

Для передачі даних використовувалася пара електроакустичних перетворювачів, що працюють на частотах 25-65 кГц. В обраній смузі частот формується акустичний сигнал з подвійною фазовою маніпуляцією. В результаті проведеного

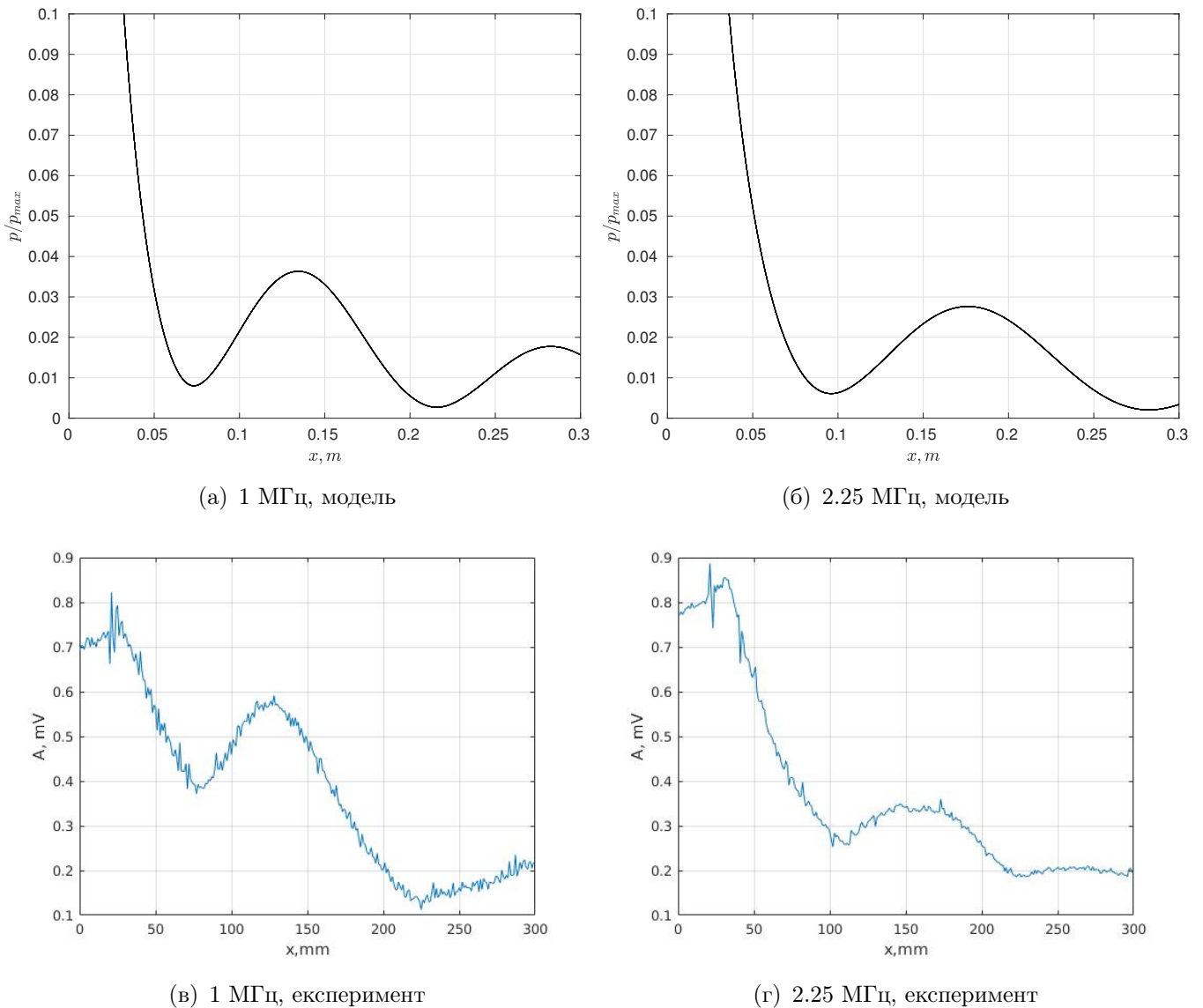
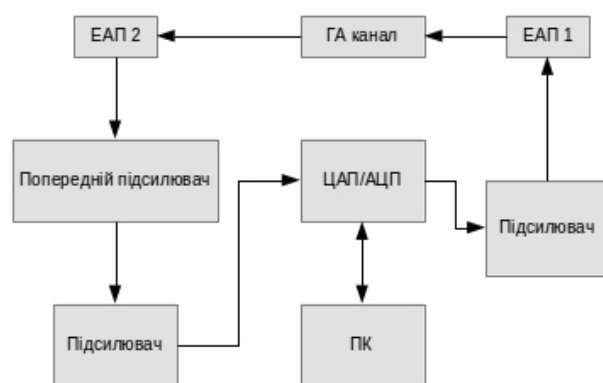


Рис. 13: Акустичний тиск в хвилеводі.

експерименту було отримано розподілення фази прийнятого сигналу. Для зручності сприйняття результатів представимо фазове розподілення у вигляді графіку, де по осі абсцис відкладається компонент  $R_c$ , що є пропорційним реальній частині вхідного сигналу, по осі ординат –  $R_s$ , що пропорційно уявній частині. На графіку осі позначено, як синфазну і квадратурну відповідно. З рисунків видно, що з ростом швидкості переачі зони зосередження детектованих фазових зсувів розширюються. Аномальним чином на швидкості 8 кбіт/с фазові зсуви розташовані більш щільно, ніж для 4 кбіт/с, що пояснюється особливістю профілю багатопроменевості в каналі. В результаті цієї групи експериментів було підтверджено ефективність роботи системи гідроакустичного зв'язку на основі подвійної фазової маніпуляції в умовах гідроакустичних каналів, що характеризуються високим рівнем ревербераційних завад. Загалом система демонструє високий рівень щільності детектованих фазових зсувів, обраний метод модуляції забезпечує високий рівень правильного декодування що означає надійну роботу з  $BER < 10^{-6}$ .



(а) Вимірювальний об'єм



(б) Схема експериментальної установки.

Рис. 14: Експериментальна установка.

### Вимірювання продуктивності зв'язку на основі часового кодування сигналу з розширенням спектру і алгоритмом адаптації

Для оцінки ефективності розробленого в третьому розділі алгоритму автоматичної адаптації до умов зв'язку було проведено наступну групу експериментів. Вже на фізичному рівні OSI виникає питання стосовно вибору довжини одного символу даних і визначення робочого частотного діапазону. На канальному ж рівні OSI слід визначитися з розміром кодового алфавіту. Вибір зазначених параметрів слід робити з точки зору максимізації продуктивності. Для цього в ході вимірювань отримано криві залежності швидкості передачі даних від розміру кодового алфавіту, верхньої частоти доступного частотного діапазону, нижньої частоти доступного частотного діапазону, тривалості одного символу даних.

**Мета експерименту** – апробація алгоритму автоматичного визначення залежності швидкості передачі даних від розміру кодового алфавіту, верхньої частоти доступного частотного діапазону, нижньої частоти доступного частотного діапазону, тривалості одного символу даних.

Вимірювання проводилися в заглушеній камері на кафедрі Акустики та Акустоелектроніки НТУУ «КПІ» ім. І.Сікорського. Для експерименту використовувалася високошвидкісна 12-бітна аудіокарта, мікрофон і електроакустичний перетворювач. Відстань між випромінювачем і приймачем складала 2 метри.

Схема експерименту представлена на Рис. 16. На вході вимірювального стенду передається відоме повідомлення з деякої рівномірно-розподіленої послідовності символів кодового алфавіту. Для зменшення впливу міжсимвольної інтерференції в роботі використовуються сигнали з різними видами модуляції несучої частоти (розширенням спектру) [4,8]. Послідовність таких сигналів в пакеті даних завжди є незмінною. Таким чином, за сигналом з модуляцією «А» завжди слідує сигнал з модуляцією «Б» і т.д.. В роботі використовувалися 3 типи модуляції:

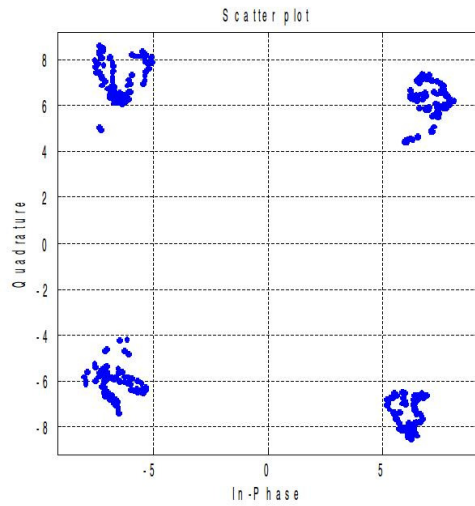
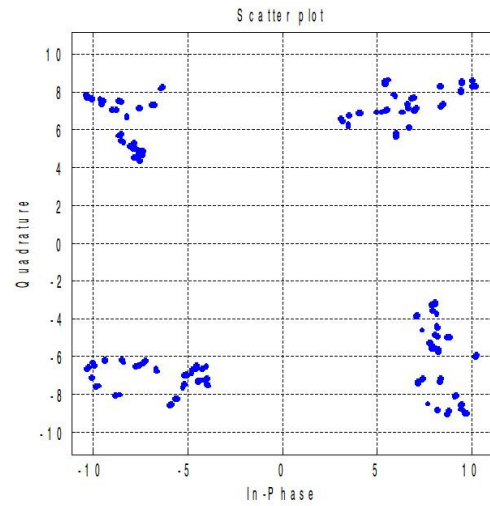
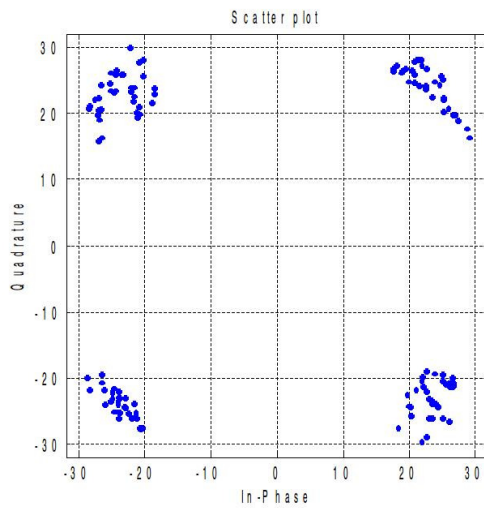
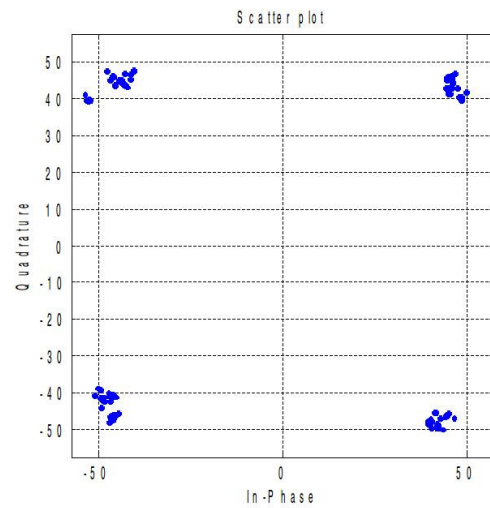
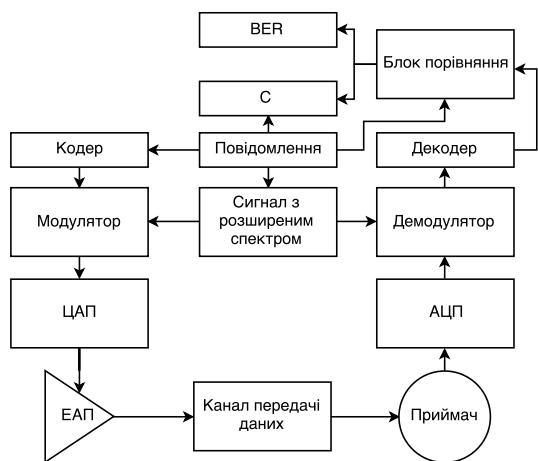
(a)  $C = 8$  кбіт/с(б)  $C = 4$  кбіт/с(в)  $C = 2$  кбіт/с(г)  $C = 1$  кбіт/с

Рис. 15: Розподілення фази

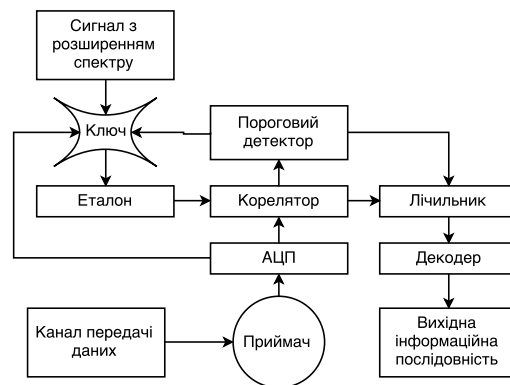
- лінійна модуляція;
- модуляція за квадратичним законом;
- модуляція за логарифмічним законом.

Якщо «тривалість» імпульсної характеристики ГА каналу менша за  $3\tau$ , несинхронні компоненти будуть відфільтровані.

З приведених графіків (Рис.19, 18, 17) видно значну перевагу методу з адаптацією (в 1.5...2 рази), також видно, що в умовах стаціонарного каналу алгоритм адаптації забезпечує близький до теоретично максимального рівень швидкості передачі даних при прийнятному рівні бітової помилки ( $10^{-3}$ ). Таке підвищення якості пояснюється зменшенням впливу найбільш значущого джерела завад – реверберації за рахунок використання сигналів з різними законами модуляції. З



(a) Схема вимірювального стенду.



(б) Алгоритм адаптації.

Рис. 16: Випробування ефективності алгоритму адаптації

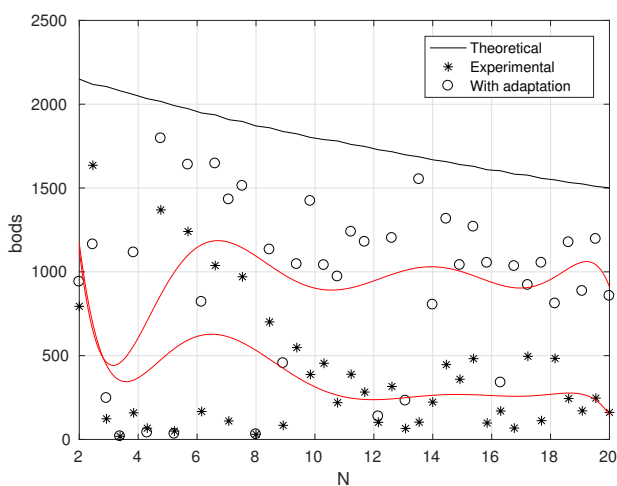
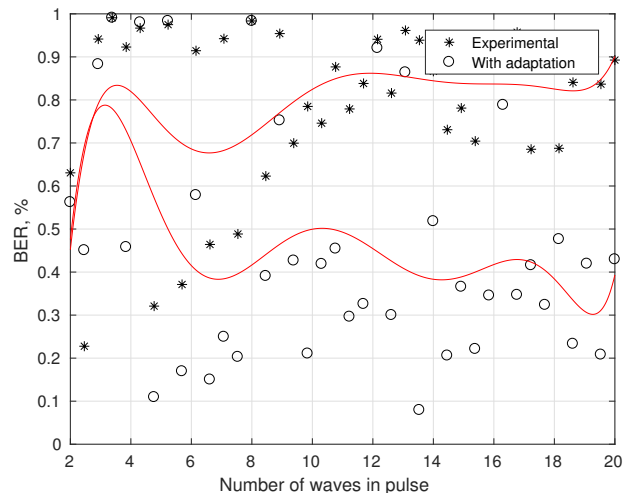
(a)  $C(\tau \cdot f_0)$ (б)  $BER(\tau \cdot f_0)$ 

Рис. 17: Залежність швидкості передачі даних і імовірності бітової помилки в каналі зв'язку від довжини одного імпульсу

Рис. 17 видно, що збільшення кількості біт на один імпульс призводить до збільшення кодового алфавіту за законом  $2^x$ . Це, в свою чергу, викликає збільшення міжсимвольного інтервалу і зменшення пропускну здатності каналу. Отже, в каналі існує оптимальне значення розміру символьного алфавіту в експерименті – 8 символів, 3 біти на імпульс (Рис. 17). Висновки на основі частотних залежностей можна узагальнити:

- Чим вище розташовано робочий частотний діапазон, тим вищої пропускну здатності каналу зв'язку можливо досягти.
- Чим ширша смуга робочих частот, тим краще детектується сигнал на фоні завад викликаних реверберацією.
- Робочу смугу частот слід обирати виходячи з приведених рекомендацій, умов

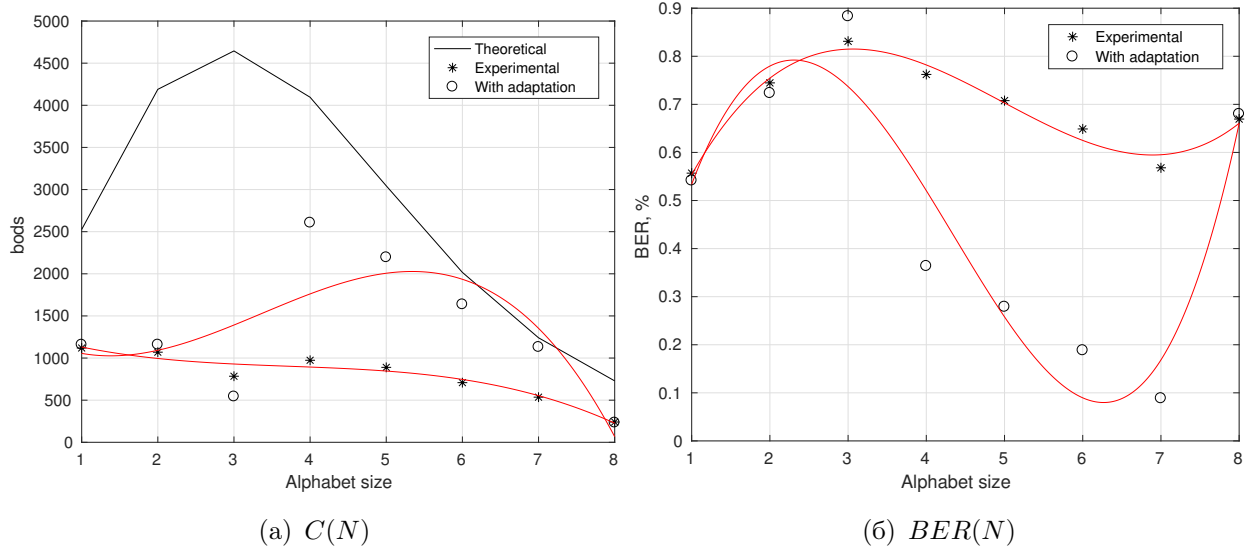


Рис. 18: Залежність швидкості передачі даних і імовірності бітової помилки в каналі зв'язку від кількості біт на символ

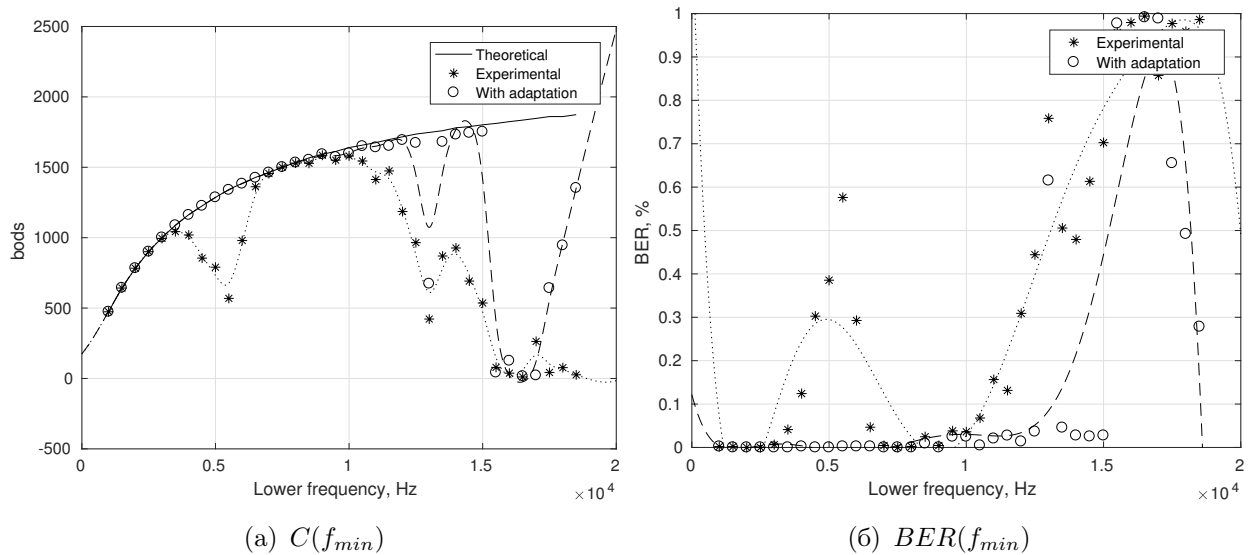


Рис. 19: Залежність швидкості передачі даних і імовірності бітової помилки в каналі зв'язку від нижньої частоти частотного діапазону.

задачі по забезпеченню енергетичної дальності і частотних характеристик електроакустичних перетворювачів. Особливу увагу слід приділяти забезпеченню лінійності фазочастотної характеристики в обраній смузі частот.

## ВИСНОВКИ

Основні результати дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. В роботі вперше розроблено теоретичні основи, що дозволяють змоделювати і надати рекомендації для проектування і реалізації систем кодового гідроакустичного зв'язку з урахуванням особливостей розповсюдження акустичних

імпульсів в акустичних хвилеводах. Розроблена модель гідроакустичного каналу дозволяє прогнозувати ефективність обраної реалізації системи кодового звукопідводного зв'язу з урахуванням спотворень коротких широкосмугових акустичних сигналів спричинених дисперсією і міжсимвольною інтерференцією під час хвилевідного поширення.

2. В роботі вперше розглянуто поширення «пачки» акустичних радіоімпульсів з амплітудною і фазовою модуляцією в плоско-паралельному гідроакустичному каналі з урахуванням дисперсії. Детально розглянутий вплив дисперсії на форму акустичного імпульсу є основою для вибору функції на основі якої проводиться розширенням спектру сигналу і є базисом для розробленого в роботі методу адаптації до умов каналу.
3. Проведено оцінку швидкості поширення акустичної енергії пачки імпульсів в хвилеводі, з врахуванням областей сингулярності для різних глибин розташування абонентів. Аналіз областей сингулярності в хвилеводі дозволяє рекомендувати використання сигналів з розширенням спектру, що зменшить вплив частотних завмирань в каналі і дозволить збільшити надійність системи цифрового звукопідводного зв'язку
4. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень вперше показано зв'язок швидкості передачі даних з розрядністю використовуваного коду, шириною робочої смуги частот, тривалістю акустичного імпульсу для кодового гідроакустичного зв'язку в мілкому морі. Отримані в роботі криві, що відображають цей зв'язок є основою для моделювання ефективності систем цифрового звукопідводного зв'язку
5. Розроблено метод динамічної адаптації до умов каналу, що знижує вплив інтерференції і дисперсії на основі сигналів з модуляцією несучої частоти неперервною функцією. Цей метод дозволяє значно підвищити продуктивність цифрового звукопідводного зв'язку.
6. Вперше встановлено і досліджено теоретично та експериментально наявність в ГА каналі вихорів потоку акустичної енергії внаслідок каналного розповсюдження і взаємодії акустичних мод. Розглянуте явище суттєво впливає на форму акустичних сигналів в хвилеводі, служить основою для моделювання акустичних полів в хвилеводі, що створюються широкосмуговими джерелами акустичних коливань.
7. Отримані розрахунковим шляхом результати підтверджено експериментально, що свідчить про адекватність обраних розрахункових моделей.
8. Розроблені в ході роботи методики експериментального вимірювання кривих залежності швидкості передачі даних з розрядністю використовуваного коду, шириною робочої смуги частот, тривалістю акустичного імпульсу стали

основою для методу динамічної адаптації системи цифрового звукопідводного зв'язку до умов каналу.

9. Експериментально підтверджено наявність в ГА каналі вихорів потоку акустичної енергії внаслідок канального розповсюдження і взаємодії акустичних мод, що надає строге пояснення явища частотних завмирань в каналі, є важливим фактором для моделювання цифрового звукопідводного зв'язку в мілкому морі.
10. Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:
  - створені можливості пошуку найбільш оптимальних методів модуляції, кодування, ширини і положення частотної смуги під час проектування засобів цифрового гідроакустичного зв'язку в залежності від вимог по забезпеченню дальності, швидкості передачі даних, частотної смуги, споживаній потужності, що висуваються до розроблюваних засобів;
  - визначені умови за яких виникають вихори потоку акустичної енергії внаслідок канального розповсюдження і взаємодії акустичних мод, що дозволить розробнику засобів цифрового звукопідводного зв'язку уникнути частотних і просторових завмирань в гідроакустичних каналах;
  - використання розробленого алгоритму адаптації дозволить значно підвищити надійність і достовірність зв'язку розроблюваних засобів і систем такого зв'язку і розширить ареал їх використання.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в Державному підприємстві «Київський науково-дослідний інститут гідропріладів», що підтверджується відповідним актом впровадження.

### Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Коржик А. В., Дидковский В. С., Гладких Н. Д., «Распространение звукового импульсного информационного сообщения в плоскопараллельном волноводе с идеальными границами.», Электроника и Связь. 2016. Т. 21, № 3(92). С. 82–96. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків, комп'ютерному моделюванні і аналізі отриманих моделей акустичних імпульсів в хвилеводі (Index Copernicus)*
2. Дидковский В. С., Гладких Н. Д., Коржик А. В. «Распространение двухимпульсного информационного сообщения в плоскопараллельном волноводе с идеальными границами.», Българско списание за инженерно проектиране, С.78-84, Январь 2017. *Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі, проведенні розрахунків акустичних полів та їх аналізі (Болгарія, Технічний університет Софії)*

3. Лейко А.Г., Гладких Н.Д., Нижник А.И. [и др.], «Электрические свойства цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с окружной поляризацией.», *Электроника и связь*. 2014. Т. 19, № 3(80). С. 62–72. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні комп'ютерного моделюванні і аналізі отриманих моделей акустичних імпульсів в хвилеводі (Index Copernicus).*
4. Гладких Н.Д., «Оценка влияния доплеровского расширения полосы частот на ошибку оценки фазы гидроакустического (ГА) сигнала», *Электроника и Связь*. 2012. Т. 17, № 6. С. 85–92.
5. Гладкіх Н.Д. «Експериментальна реалізація цифрового гідроакустичного зв'язку (частина 1)», *Електроніка і зв'язок*. 2014. Т. 19, № 1(79). С. 95–101.
6. Гладкіх Н.Д. «Експериментальна реалізація цифрового гідроакустичного зв'язку (частина 2).», *Електроніка і зв'язок*. 2014. Т. 19, № 2(79). С. 94–100.
7. Патент України на корисну модель №100428 МПК (2006) G01S 7/52. Активно-пасивна система «Гідроакустична станція – надводний корабель» / Д.А. Дерєпа, О.Г. Лейко, І.М. Фалєєв, О.І. Старовойт, О.І. Нижник, З.Т. Гусак., Н.Д. Гладкіх – № 201500944 ; заявл. 06.02.2015 ; опубл. 27.07.2015, бюл. № 14. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні патентних досліджень та розробці опису винаходу*
8. Дідковський В.С., Гладкіх Н.Д., Коржик О.В., «Особенности разповсюдження акустичних імпульсів у підводному звуковому каналі.», *Акустичний симпозиум “КОНСОНАНС-2015”*. С. 78-83, Київ, 2015. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні комп'ютерного моделюванні і аналізі отриманих моделей акустичних імпульсів в хвилеводі.*
9. Н.Д. Гладкіх, Д.С. Маслов, З.Т. Гусак, О.І. Нижник, Я.І. Старовойт, А.О. Святенко, «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки.» Тези доповідей на VI науково-технічній конференції, «Станція пошуку плавців-диверсантів», С. 406-407, Київ, 2015. *Внесок здобувача полягає в проведенні математичного моделювання і розробці концепції приладу*
10. До питання про деформування різночастотного імпульсно-кодового акустичного сигналу в підводному звуковому каналі., А.О. Безручко, В.С. Дідковський, Н.Д. Гладкіх, О.В. Коржик, *Системи обробки інформації*. 2015. *Особистий внесок полягає в проведенні математичних розрахунків форми акустичних імпульсів у підводному звуковому каналі.*

## АНОТАЦІЯ

**Гладкіх Н.Д. Цифровий підводний акустичний зв'язок в мілкому морі.**  
– На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.08 – прикладна акустика та звукотехніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2018. Дисертація присвячена розробці теоретичних засад принципів проектування і розробки гідроакустичного зв'язку адаптованого до умов мілкого моря.

В дисертаційній роботі розроблено модель гідроакустичного каналу, що дозволяють змоделювати і надати рекомендації для проектування систем кодового гідроакустичного зв'язку. Надає можливість прогнозувати ефективність обраної реалізації системи кодового звукопідводного зв'язку з урахуванням спотворень коротких широкосмугових акустичних сигналів спричинених дисперсією і міжсимвольною інтерференцією під час хвилевідного поширення.

В дисертаційній роботі розроблено метод динамічної адаптації до умов каналу, що знижує вплив інтерференції і дисперсії на основі сигналів з модуляцією несучої частоти неперервною функцією. Цей метод дозволяє значно підвищити продуктивність цифрового звукопідводного зв'язку.

В дисертаційній встановлено і досліджено теоретично та експериментально наявність в ГА каналі вихорів потоку акустичної енергії. Розглянуте явище суттєво впливає на форму акустичних сигналів в хвилеводі, служить основою для моделювання акустичних полів в хвилеводі.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в Державному підприємстві «Київський науково-дослідний інститут гідроапаратури», що підтверджується відповідним актом впровадження.

**Ключові слова:** *гідроакустичний зв'язок, розширення спектру, подвійна фазова маніпуляція, дисперсія, векторне поле інтенсивності, хвилевідне розповсюдження.*

## АННОТАЦИЯ

**Гладких Н.Д. Цифровая подводная акустическая связь в мелком море.**  
– На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.08 – прикладная акустика и звукотехника. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» Министерства образования и науки Украины, Киев, 2018.

Диссертационная работа посвящена разработке теоретических основ принци-

пов организации и разработки гидроакустической связи адаптированной к условиям мелкого моря.

В диссертационной работе разработана модель гидроакустического канала. Модель позволяет смоделировать и дать рекомендации для проектирования и разработки систем кодовой гидроакустической связи, озвоняет прогнозировать эффективность выбранной реализации системы кодовой гидроакустической связи с учетом искажений коротких широкополосных акустических сигналов вызванных дисперсией и межсимвольной интерференцией возникающей в следствие волноводного распространения.

В диссертационной работе разработан метод динамической адаптации к условиям канала который снижает влияние интерференции и дисперсии на основе сигналов с модуляцией несущей частоты непрерывной функцией. Этот метод позволяет значительно повысить производительность цифровой гидроакустической связи.

В диссертационной работе установлено и исследовано теоретически, и экспериментально наличие в гидроакустическом канале вихрей потока акустической энергии. Рассматриваемое явление существенно влияет на форму акустических сигналов в волноводе, служит основой для моделирования акустических полей в волноводе.

**Ключевые слова:** гидроакустическая связь, расширение спектра, двойная фазовая манипуляция, дисперсия, векторное поле интенсивности, волноводное распространение.

## SUMMARY

**Gladkikh N.D. Digital underwater acoustic communication in the shallow sea.** – Manuscript.

Dissertation for the PhD degree, specialty 05.09.08 - Applied acoustics and sound engineering. - National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky" Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to the theoretical and practical principles of the digital hydroacoustic communication system development which is adapted to the conditions of the shallow sea.

In the dissertation work a theoretical bases and a model which allow to simulate and give recommendations for design and realization of a coded hydroacoustic communication system are developed. The model takes into account peculiarities of acoustic impulses in acoustic waveguides propagation. The developed model of the hydroacoustic channel allows to predict the efficiency of the selected implementation of the coded hydroacoustic communication system, taking into account short broadband acoustic signals distortions caused by dispersion and inter-symbol interference during waveguide propagation.

It is considered the propagation of acoustic radio pulses with amplitude and phase

modulation «packets» in a plane-parallel hydroacoustic channel with allowance of dispersion. The influence of the dispersion on the shape of the acoustic pulse is considered in detail. The given in the thesis model is the basis for choosing the spread spectrum function and is the basis for the developed adaptation method.

In the dissertation an estimation of the packet of pulses energy propagation velocity in the waveguide, taking into account the singularity regions for different depths of the subscribers' location is given. The analysis of the singularity regions in the waveguide allows to give certain recommendations the use of signals with spread spectrum, which will reduce the effect of frequency fading in the channel and will increase the reliability of the digital hydroacoustic communication system.

As a result of theoretical and experimental studies, the connection between data rate and coding table size, between spectrum width and duration of the acoustic pulse for the digital hydroacoustic communication system in the shallow sea is given. Provided curves representing this connection obtained in the dissertation and serve as the basis for the efficiency of digital hydroacoustic communication system modeling.

It is developed a method of dynamic adaptation to the channel conditions in the dissertation. This method reduces the effect of interference and dispersion and it is based on the spread spectrum signals with modulation of carrier frequency by a continuous function. The use of the developed method of will significantly increase the reliability of the digital hydroacoustic communication system and expand the range of its use.

In the dissertation thesis it is theoretically and experimentally proved the presence of the acoustic energy vortices in the channel. It was first established and investigated such vortices as a result of channel propagation and interaction of acoustic modes. This phenomenon significantly influences on the shape of acoustic signals in the waveguide, serves as the basis for acoustic fields created by broadband sources simulating in the waveguide.

The results obtained by calculation are confirmed experimentally, which testifies to the adequacy of the selected calculation models. Theoretically obtained results of the structure of the acoustic intensity vector field are experimentally confirmed. The expediency of introducing the acoustic momentum energy transfer velocity concept is shown, which is separate from the group velocity concept.

The presence of acoustic energy flow vortices in the channel due to propagation and interaction of acoustic modes has been experimentally confirmed, providing a rigorous explanation of the phenomenon of frequency fading in the channel. This is an important factor for the simulation of the acoustic energy propagation in the shallow sea.

The results of the dissertation work provide the toolkit for finding the most optimal methods of modulation, coding, choosing width of the frequency band.

The practical value of the results obtained are as follows:

- it is created the instrument for the effective searching of modulation methods, coding table size, frequency bandwidth during the design of digital hydroacoustic communication systems, which depends on the range, data transfer rate, frequency band, power consumption requirements;

- there are defined conditions which cause eddies of the acoustic energy flow due to the channel propagation and interaction of acoustic mods, which allows the developer to avoid frequency and space fading in hydroacoustic channels;
- the developed adaptation algorithm significantly increases the reliability of the hydroacoustic communication system and expands its use range.

The results of the dissertation thesis are implemented at the State Enterprise "Kyiv Scientific Research Institute of Hydrodevices which is confirmed by the relevant act of implementation.

**Keywords:** *hydroacoustic bond, spectrum expansion, double phase manipulation, dispersion, vector field of intensity, wave propagation.*