

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
КІБЕРБЕЗПЕКИ ТА ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ
КАФЕДРА ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ КІБЕРЗАХИСТУ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Захист технічного каналу передачі акустичної інформації
сигналами зі складним спектром»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 125 Кібербезпека та захист інформації»
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Технічні системи інформаційного та кібернетичного
захисту

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

_____ Михайло ВЕТОХА

Виконав: здобувач вищої освіти групи СЗДМ 61
Михайло ВЕТОХА

Керівник: Юрій ПЕПА
к.т.н., доцент (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент: _____
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Київ 2025

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
КІБЕРБЕЗПЕКИ ТА ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ**

Кафедра Технічних систем кіберзахисту
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність Кібербезпека та захист інформації
 Освітньо-професійна програма Технічні системи інформаційного та кібернетичного захисту

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТСКБ

Олександр ТУРОВСЬКИЙ

« » 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Ветохі Михайлу Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Технологія захисту інформації від витоку матеріально-речовим каналом»

керівник кваліфікаційної роботи Юрій ПЕПА к.т.н., доцент

(Ім'я, ПРИЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій
 від «15» жовтня 2024 р. № 320

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 20.12.2024 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

Інформаційна безпека матеріально-речового каналу

Технічні засоби охорони як інструмент протидії витоку інформації матеріально-речовим каналом

Захист інформації від витоку матеріально-речовим каналом

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Методи шумозаглушення у мікрофонних системах

2. Алгоритми шумозаглушення для подвійної мікрофонної системи.

3. Технологія моделювання сигналів зі складним спектром

5. Перелік графічного матеріалу: Презентаційний матеріал на 14 слайдах

6. Дата видачі завдання 20.10.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір науково-технічної літератури		
2	Написання першого розділу роботи		
3	Написання другого розділу роботи		
4	Написання третього розділу роботи		
5	Написання висновків по роботі		
6	Підготовка презентаційних матеріалів		
7	Підготовка доповіді		

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Михайло ВЕТОХА

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис)

Юрій ПЕПА

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить вступ, чотири розділи, висновки та перелік посилань. Орієнтовний обсяг роботи становить 57 сторінок. У роботі розглянуто методи шумозаглушення у мікрофонних системах, алгоритми шумозаглушення для подвійної мікрофонної системи, основні адаптивні алгоритми обробки сигналів та результати моделювання сигналів зі складним спектром.

Метою дипломної роботи є дослідження можливостей зменшення шуму та луни у вхідному мовному сигналі без втрати якості корисного сигналу, а також розробка рекомендацій щодо захисту мовної інформації в технічних системах обробки інформації.

У роботі проаналізовано шумоподібні сигнали, фонові, імпульсні, кольорові, адитивні та неадитивні шуми, що впливають на якість мовного сигналу. Розглянуто методи покращення мовного сигналу із застосуванням одного та декількох мікрофонів. Досліджено принципи побудови подвійної мікрофонної системи, структуру адаптивного шумопоглинача та особливості застосування основного й еталонного мікрофонів.

За результатами дослідження сформовано рекомендації щодо використання алгоритмів шумозаглушення в технічних системах передавання та обробки мовної інформації.

Апробація:

К.В. Суровікін, М.С. Ветоха Актуальні проблеми безпеки інформаційно-телекомунікаційних систем. *Всеукраїнської науково-практичної конференція: Актуальні проблеми безпеки інформаційно-телекомунікаційних систем.* м. Київ, 03 листопада 2024 року, Київ: РВЦ ДУІКТ. – 024. С.62 - 63.
https://duikt.edu.ua/uploads/p_2661_93669247.pdf.

Ключові слова: АКУСТИЧНА ІНФОРМАЦІЯ, ТЕХНІЧНИЙ КАНАЛ ПЕРЕДАЧІ, ШУМОЗАГЛУШЕННЯ, МОВНИЙ СИГНАЛ, ПОДВІЙНА МІКРОФОННА СИСТЕМА.

ABSTRACT

The diploma thesis contains an introduction, four chapters, conclusions and a list of references. The approximate volume of the work is 57 pages. The work considers noise suppression methods in microphone systems, noise reduction algorithms for a dual microphone system, basic adaptive signal processing algorithms and the results of modeling signals with a complex spectrum.

The purpose of the diploma thesis is to study the possibilities of reducing noise and echo in the input speech signal without losing the quality of the useful signal, as well as to develop recommendations for protecting speech information in technical information processing systems.

The work analyzes noise-like signals, background, impulse, colored, additive and non-additive noises that affect the quality of the speech signal. Methods for improving the speech signal using one and several microphones are considered. The principles of building a dual microphone system, the structure of an adaptive noise canceller and the features of using the main and reference microphones are investigated. Special attention is paid to adaptive LMS, NLMS, LLMS and RLMS algorithms, their functional capabilities and the feasibility of their application to improve the quality of speech signal filtering.

In the practical part of the work, modeling of signals with a complex spectrum was performed, the quality of filtering was evaluated, and the features of using adaptive algorithms for protecting acoustic information were determined. Based on the research results, recommendations were developed for the use of noise suppression algorithms in technical systems for transmitting and processing speech information.

Keywords: ACOUSTIC INFORMATION, TECHNICAL TRANSMISSION CHANNEL, NOISE SUPPRESSION, SPEECH SIGNAL, DUAL MICROPHONE SYSTEM, ADAPTIVE FILTER, LMS, NLMS, SIGNALS WITH A COMPLEX SPECTRUM.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 МЕТОДИ ШУМОЗАГЛУШЕННЯ У МІКРОФОННИХ СИСТЕМАХ	11
1.1 Шумоподібні сигнали	11
1.2 Покращення мовного сигналу	13
1.3 Покращення мовного сигналу за рахунок одного мікрофона	13
1.4 Покращення мовного сигналу за рахунок декількох мікрофонів	14
1.5 Адаптивна фільтрація	15
2 АЛГОРИТМИ ШУМОЗАГЛУШЕННЯ ДЛЯ ПОДВІЙНОЇ МІКРОФОННОЇ СИСТЕМИ	19
2.1 Подвійна мікрофонна система	19
2.2 Структура DMS-системи	19
3 ОСНОВНІ АЛГОРИТМИ ШУМОЗАГЛУШЕННЯ	24
3.1 Типовий алгоритм «Адаптивний фільтр»	25
3.2 Різновиди адаптивних алгоритмів	27
3.2.1 LMS-алгоритм	27
3.2.2 NLMS-алгоритм	29
3.2.3 LLMS-алгоритм	30
3.2.4 RLMS-алгоритм	30
3.2.5 Порівняння NLMS та LMS	31
4 МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛІВ ЗІ СКЛАДНИМ СПЕКТРОМ	33
4.1 Структурна схема подвійної мікрофонної системи для моделювання	33
4.2 Оцінка якості фільтрації	35
4.3 Програмне середовище для моделювання	37
4.4 Основні налаштування	38
4.5 Тестові вхідні сигнали	41
4.6 Результати моделювання	43

	10
4.7 Рекомендації щодо використання алгоритмів для захисту інформації	54
ВИСНОВКИ	56
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	57

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ANC – Adaptive Noise Canceller

DMS – Dual Microphone System

FIR – Finite impulse response

IIR – Infinite impulse response

LMS – Least Mean Square

LLMS – Leaky Least Mean Square

NLMS – Normalized Least Mean Square

RLMS – Recursive Least Mean Square

SNR – Signal Noise Ratio

SNRI – Signal Noise Ratio Improvement

СКП – середньо-квадратична похибка

ВСТУП

У теперішній час комунікаційні технології та системи є одним із найважливіших секторів у сучасному світі. Однією із головних завдань подібних систем є використання, передача та обробка мовної інформації. Системи мобільного зв'язку, системи телеконференцій, розпізнавання мови, інтелектуальні засоби захисту органів слуху, системи прослуховування та системи аутентифікації (процедури перевірки автентичності) потребують якісного мовного сигналу, в якому відсутні завади, які викликані впливом шумових перешкод.

Видалення шуму, коли користувачі перебувають у галасливому середовищі, є важливим завданням. Доступні різні типи систем, система типу «подвійний мікрофон» (Dual Microphone System (DMS)) – одна з них.

Система подвійного мікрофона стала популярним методом спрямованого захоплення звуку та зменшення шуму для системи мобільного зв'язку [1]. DMS, порівняно з односпрямованим мікрофоном, має більшу гнучкість і вище відношення сигнал/шум (Signal Noise Ratio (SNR)). Продуктивність DMS в основному залежить від відстані між джерелом звуку та мікрофонами [2].

Точне відновлення мови у системах голосової аутентифікації, мобільного зв'язку та ін., є найважливішим завданням, коли мова порушується шумом, наприклад мовний шум та інші шумові джерела. Дана дипломна робота включає дослідження системи DMS, що реалізована за допомогою двох все спрямованих мікрофонів. В роботі порівнюється вихідний SNR та поліпшення SNRI (SNR Improvement) для алгоритмів LMS (Least Mean Square) та NLMS (Normalized Least Mean Square) в DMS. В роботі порівнюється якість вихідного сигналу (Output SNR і SNRI) для різної відстані між двома мікрофонами., для різного ослаблення сигналів з різною відстанню між мікрофонами, а також порівнюється, які алгоритми кращі для цієї системи, LMS або NLMS.

Метою роботи є дослідження можливостей зменшення шуму (луни) в вхідному сигналі (мова та луна або шум) без втрати якості корисного сигналу, а також розробка рекомендацій щодо захисту мовної інформації в технічних системах обробки інформації.

1 МЕТОДИ ШУМОЗАГЛУШЕННЯ У МІКРОФОННИХ СИСТЕМАХ

У реальному середовищі наявність адитивних шумів завжди погіршує ефективність розпізнавання мови [3, 4]. Існування шуму є загальним явищем у реальному застосуванні обробки мовлення [4]. Поліпшення мовного сигналу, що був пошкоджений цим додатковим шумом, є однією з найбільш активних дослідницьких областей в системі зв'язку [5]. Використання адитивних фільтрів з різною обробкою мовного сигналу, дозволяє знизити вплив цих шумів та покращити відношення сигнал/шум мовного сигналу.

1.1 Шумоподібні сигнали

При обробці мовного сигналу найважливішою роботою є знання характеристик шуму, до того ж вони можуть змінюватися з часом [4]. Продуктивність обробки мовного сигналу залежить від характеристик шуму. Один метод, який працює ефективніше з одним типом шуму, може бути гіршим з іншим. Отже, для вирішення задачі зниження шуму дуже важливо вивчити характеристики шуму. Короткі описи деяких шумів наведені нижче.

Фоновий шум. Фоновий шум надходить від усіх інших джерел, які в основному не корелюються з голосом. Це небажані сигнали, що виробляються від дорожнього руху, натовпу, електричного та механічного обладнання, промисловості, навіть від атмосфери. Більшість шумів можна моделювати як акустичний фоновий шум [6].

Лепет. Одне з найскладніших завдань – це усунення шумів від кількох джерел або лепет [7]. Коли група людей розмовляє разом, тоді створюється лепет. Це складно через свою надзвичайно нестаціонарну структуру та подібність до мови. Залежно від навколишнього середовища, лепет може бути різним, наприклад, наближеним та реальним. Якщо в групі є 5 людей, які один

з одним розмовляють на одну тему, що називається справжнім лепетом. Якщо 5 людей розмовляють разом одночасно, це називається наближенням. Існують деякі суттєві відмінності між наближенням та реальним лепетом [7].

Імпульсний шум. Імпульсний шум – це майже миттєвий різкий шум [8]. Це може бути спричинено електромагнітними перешкодами, подряпинами записаного диска або неналежним чином синхронізовано у зв'язку. Для усунення імпульсних шумів можна використовувати медіанний фільтр.

Різнокольорові шуми. Сигнал називається білим, якщо автокореляція цього сигналу дуже мала для всіх ненульових значень [9]. Вектор автокореляції білого шуму виглядає як дельта-функція [9, 10]. Білий шум – це просто некорельований шум. Спектральна щільність потужності ідеального рожевого шуму обернено пропорційна до частоти $\frac{1}{f}$ [11]. Незвично безпосередньо знайти рожевий шум, він завжди виявляється змішаним з іншим шумом. Спектральна щільність потужності коричневого або червоного шуму обернено пропорційна до f^2 , у нього зменшується щільність потужності зі збільшенням частоти [9]. Синій шум має зростаючу щільність потужності зі збільшенням частоти [9]. Фіолетовий шум має зростаючу щільність потужності з квадратом зростаючої частоти [9]. Також так багато неофіційних кольорових шумів.

Адитивний та неадитивний шум. Адитивний шум – це лінійне додавання шуму, яке створює просту математичну модель [12]. Неадитивний шум – це нелінійне додавання шуму, яке виникає внаслідок нелінійної поведінки джерела та приймача [12].

1.2 Покращення мовного сигналу

Відновлення мови з галасливого середовища називається посиленням мовлення, яке набуває великого значення протягом останніх десятиліть [13]. Спотворення мови та залишковий шум не можна одночасно мінімізувати [13].

Адитивний шум також негативно впливає на якість мовлення [4]. Існує багато способів відновити мовлення або покращити мовлення. Системи посилення мови щодо оцінки шуму, як правило, діляться на дві категорії. Один полягає у використанні одного мікрофона одного каналу для оцінки шуму від мови, а інший – у використанні масиву мікрофонів для оцінки шуму [14]. Нижче наведено методи покращення мовлення.

1.3 Покращення мовного сигналу за рахунок одного мікрофона

Покращення мовлення з використанням одного мікрофона – це відновлена мова з галасливого мовного сигналу за допомогою одного мікрофона. Існує безліч підходів до зменшення шуму, які можуть працювати на одному каналі галасливої мови. Методами покращення мовлення з використанням одним мікрофоном є:

- фільтрація по Вінеру [15],
- динамічна фільтрація гребінця [16],
- спектральне віднімання [17],
- мінімальна середньоквадратична помилка [18],
- короткочасні методи модифікації спектра [15].

Переваги: методи з використанням одного мікрофона мають меншу вартість і меншу складність обчислень. Вони можуть працювати в ситуації, коли попередні знання про шум відсутні.

Обмеження: методи з використанням одного мікрофона мають деякі обмеження в реальному середовищі, такі як викликання музичного шуму та спотворення мови [13]. Є деякі інші обмеження:

- Важко видалити фонову мову,
- Неможливо ідеально розпізнати мову.

1.4 Покращення мовного сигналу за рахунок декількох мікрофонів

Мікрофонні масиви є більш ефективним розвитком напрямку покращення мовлення [5, 13]. Збільшення кількості мікрофонів може дати нам більше зменшення шуму [5]. Підсилення мовлення з використанням кількох мікрофонів може усунути деякі обмеження посилення мовлення одного мікрофона; однак, він також має деякі обмеження. Методами покращення мовлення мікрофонами є:

- Активне шумопоглинання [19];
- Розділення сліпих джерел [4];
- Незалежний компонентний аналіз [20];
- Техніка формування променя [21];
- Скасування бічної мочки [22];
- Методи на основі узгодженості [13].

Активне шумопоглинання – загальноприйнята техніка для оцінки сигналу при адитивних шумах [19]. Первинний мікрофон містить пошкоджений сигнал, а опорний мікрофон – шум, який корелює з шумом у первинному мікрофоні, та мовний сигнал. Шум віднімається від пошкодженого сигналу.

Метод розділення сліпого джерела називається сліпим, оскільки воно не потребує жодного опорного сигналу. Характеристику шуму знаходять за допомогою обробки мовного сигналу з використанням режекторного фільтру.

[4]. Частота придушення та пропускна здатність регулюється режекторним фільтром.

Методи формування променя можуть створювати матрицю формування променя для кожної з вузькосмугових частот на основі даних широкосмугового масиву, і матриці формування променя виконують одну і ту ж операцію для пошуку фокусуючої матриці [21].

Методи когерентності - це підклас методів з використанням подвійного мікрофона, які показали хороші результати, коли шум є некорельованим. І продуктивність знижується, якщо шуми корелюють [13].

Покращення мовного сигналу з використанням кількох мікрофонів є компромісом між продуктивністю та реалізацією. Ці методи забезпечують кращу продуктивність для усунення фонового шуму та перехресних перешкод. Крім того, вони корисні для виявлення мови та її розпізнавання.

1.5 Адаптивна фільтрація

Фільтрація – це набір методів обробки сигналів, мета яких це отримання корисної інформації, яка потрібна користувачу, наприклад, сигналів, що мають певні характеристики. Властивості фільтра з фіксованими параметрами зазвичай визначаються необхідної передавальної функцією. Передавальна функція визначає структуру фільтра і його обчислювальну складність. Якщо вимоги до передавальної функції фільтра неможливо сформулювати заздалегідь або специфікація може змінюватися в процесі роботи фільтру, то замість фільтрів з фіксованими параметрами доцільно використовувати фільтри із змінними параметрами, наприклад адаптивні фільтри. Здатність адаптуватися під потреби користувача робить адаптивний фільтр потужним пристроєм для обробки сигналів [23]. Алгоритми для реалізації адаптивних фільтрів можна вибрати, дотримуючись наступних факторів [23]:

- Швидкість конвергенції;

- Невідповідність;
- Відстеження;
- Надійність;
- Обчислювальні вимоги;
- Структури;
- Числові властивості.

Адаптивні фільтри з успіхом застосовуються у зв'язку, обробці сигналів, радіолокації, біомедичній інженерії та ін.. Застосування адаптивних фільтрів можна класифікувати за чотирма основними класами [23]:

- Ідентифікація;
- Зворотне моделювання;
- Прогнозування;
- Придушення перешкод.

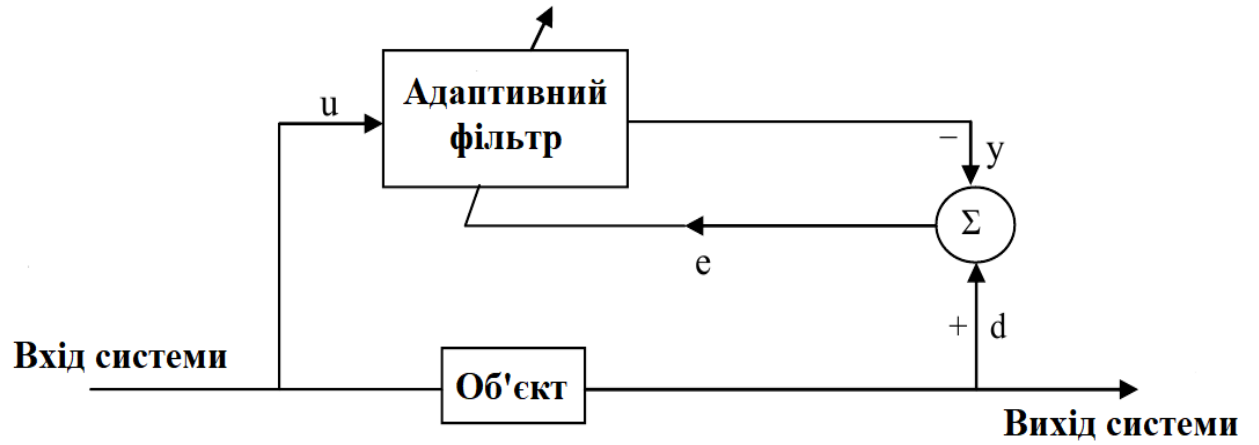
Ідентифікація: лінійна модель адаптивного фільтра для ідентифікації, що найкраще відповідає невідомому об'єкту. Вихід об'єкта це є вхід адаптивного фільтру.

Зворотне моделювання: зворотна модель адаптивного фільтра при зворотному моделюванні представляє найкращу відповідність невідомого об'єкта. Вихід об'єкта - це вхід адаптивного фільтра.

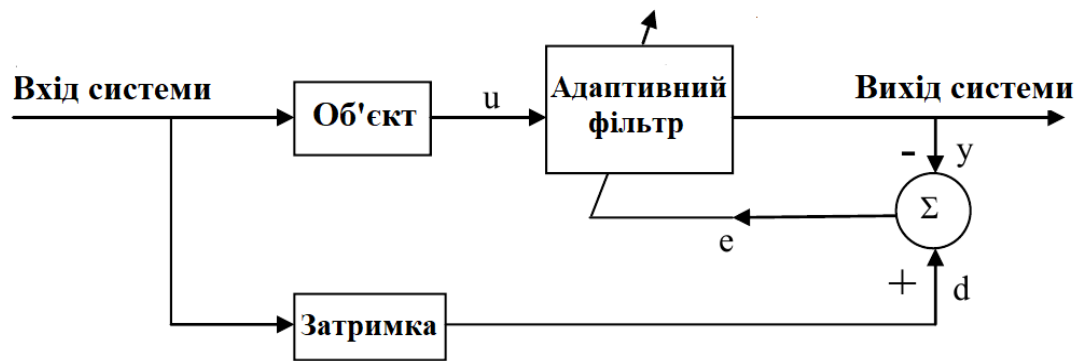
Прогнозування: вхід адаптивного фільтра для прогнозування - це затримана версія вхідного сигналу.

Придушення перешкод: адаптивний фільтр придушив невідомі перешкоди в первинному сигналі. На вхід адаптивного фільтра подається опорний сигнал.

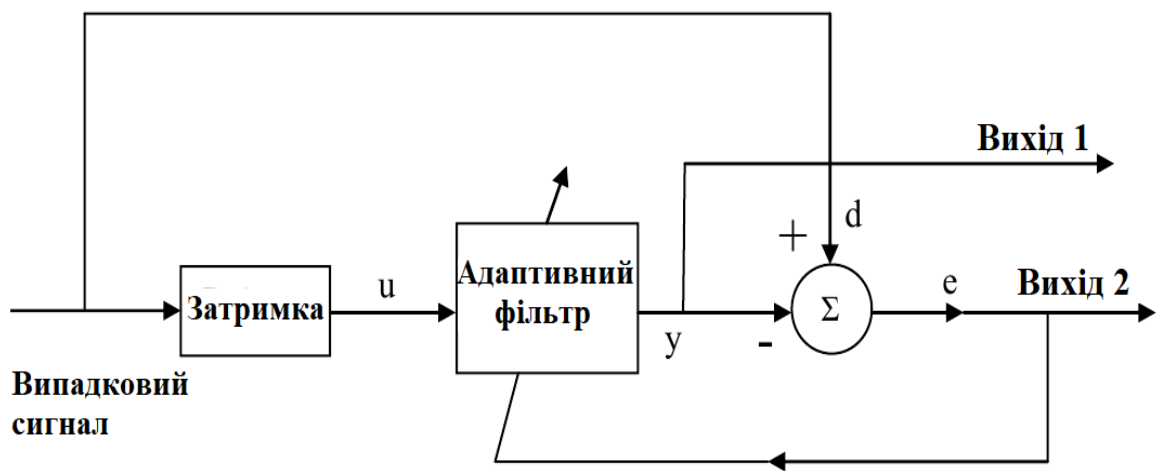
Чотири типи застосування адаптивних фільтрів наведено на рис. 1.1.



а)



б)



в)

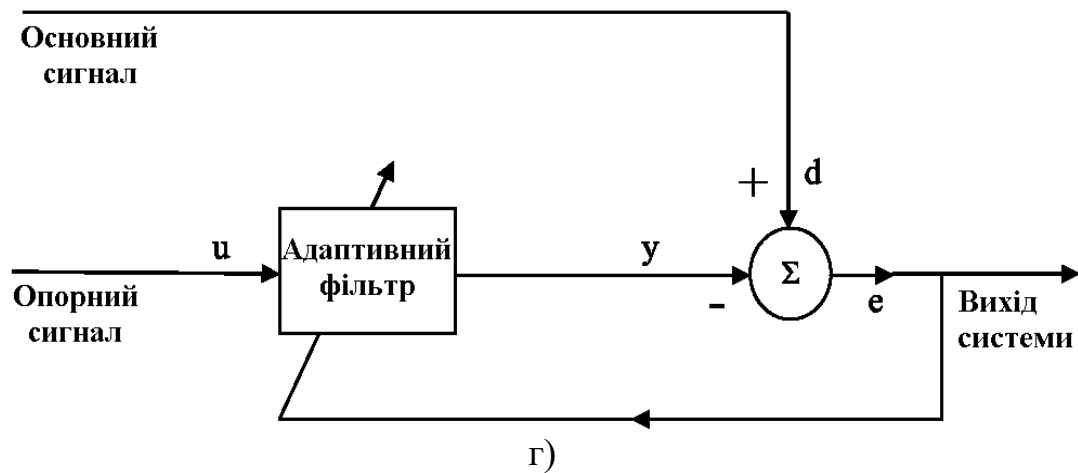


Рисунок 1.1 – Чотири типи застосування адаптивного фільтра: (а) ідентифікація; (б) зворотне моделювання; (в) прогнозування; (г) придушення перешкод

Із вищезазначених чотирьох типів адаптивного фільтра «Ідентифікація», «Зворотне моделювання» та «Прогнозування» можуть бути використані для посилення мовлення з використанням одного мікрофону, а «Придушення перешкод» – для покращення мовлення з використанням декількох мікрофонів [23].

2 АЛГОРИТМИ ШУМОЗАГЛУШЕННЯ ДЛЯ ПОДВІЙНОЇ МІКРОФОННОЇ СИСТЕМИ

2.1. Подвійна мікрофонна система

В останні роки подвійні мікрофонні системи (Dual Microphone System (DMS)) стали популярним рішенням. Збільшення кількості мікрофонів у системі посилення мовлення збільшує подальше зменшення шуму [5]. Але через обмеження (оскільки розмір апаратного забезпечення, відстань між мікрофонами, обчислювальна швидкість, вартість та ін.), у більшості систем покращення мовлення використовуються лише два всеспрямовані мікрофони [24].

DMS системи використовуються для різних експериментів з покращення мови та зменшення шуму, для оцінки SNR без припущення статистики шуму [5], придушення гучного нелінійного відлуння [25], зменшення кореляційного шуму за допомогою спектрального віднімання [26] та контролю залишкового шуму [13]. У цьому розділі описана структура DMS та алгоритми, які використовуються із системою.

2.2 Структура DMS-системи

Структуру DMS може бути варіативною у різних додатках, але ядро системи побудовано як адаптивний шумопоглинач (Adaptive Noise Canceller (ANC)) [2] [25] [27] [28]. ANC є найбільш корисною структурою для подвійних мікрофонних систем, де один мікрофон є основним, а інший – еталонним.

Адаптивний шумопоглинач базується на методі віднімання шуму від опорного сигналу, який пошкоджений додатковим шумом. Це метод шумозаглушення. ANC має два входи, один є основним, а інший - еталонний.

Основний вхід приймає як бажаний сигнал, наприклад, мовлення, так і додатковий шум, тоді як еталонний вхід приймає лише шум, який проходить через адаптивний фільтр.

На рис. 2.1 показана структура адаптивного шумопоглинача (ANC). Шум, що проходить через адаптивний фільтр, віднімається від первинного входу, і сигнал помилки поступає на вихід. Весь процес буде повторюватися до тих пір, поки не буде знайдений бажаний безшумний сигнал. Шум, який віднімається і створюється адаптивним фільтром, змінюється залежно від сигналу помилки. Вагові коефіцієнти адаптивного фільтру будуть змінюватися, поки фільтр не перейде в оптимальне положення.

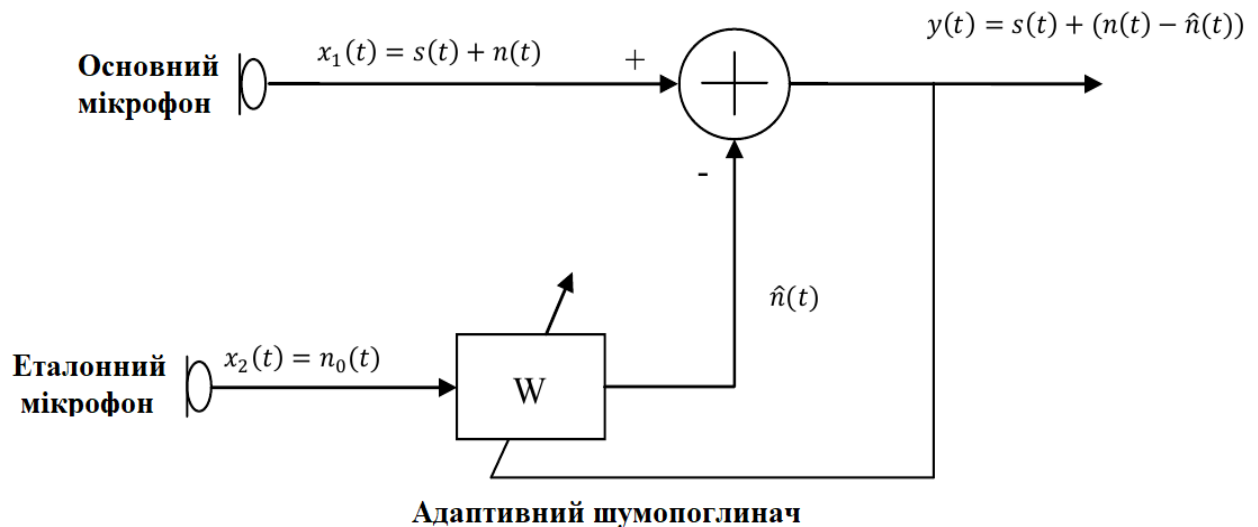


Рисунок 2.1 - Загальна структура адаптивного шумопоглинача (ANC)

Обидва мікрофони використовуються як всеспрямовані, оскільки максимальна спрямованість близько розташованих всеспрямованих мікрофонів дорівнює квадрату числа мікрофонів [24]. Якщо використовуються спрямовані мікрофони, спрямованість може змінюватися залежно від напрямку мікрофонів. Спрямованість може бути нульовою, коли обидва напрямки мікрофонів протилежні. У системах голосової аутентифікації краще використовувати всеспрямовані мікрофони через надійність. Зараз для користувачів надійність є головною частиною будь-якого нового дослідження або експерименту.

На рис. 2.2 показана структура подвійної мікрофонної системи для мобільних систем та систем аутентифікації. Мікрофон №1 є основним мікрофоном, а мікрофон №2 – еталонним мікрофоном. Мікрофон №1 розташовано внизу і всередині мобільного телефону, а мікрофон №2 – вгорі та зовні мобільного телефону. Мікрофон №2 розташовано далеко від динаміка та ближче до джерела шуму порівняно з мікрофоном №1.

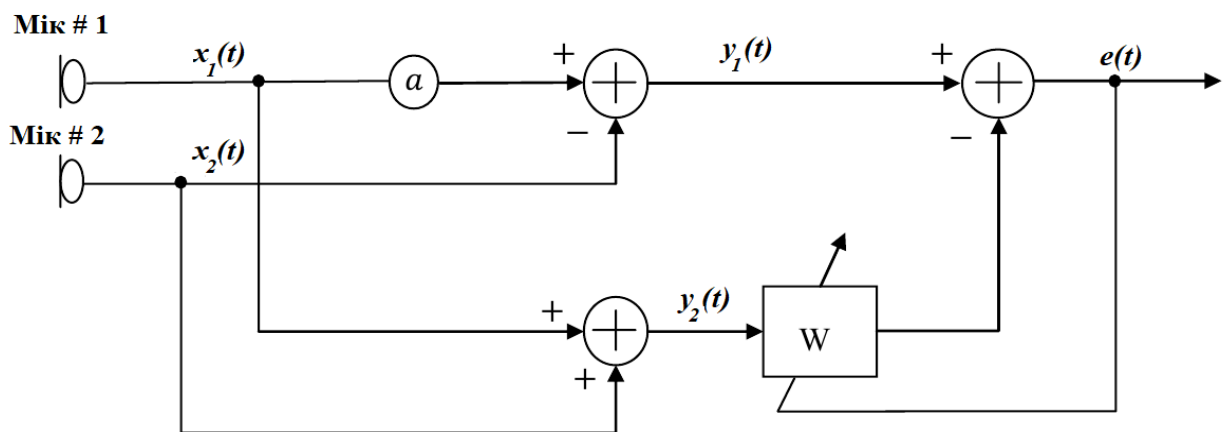


Рисунок 2.2 - Структура подвійної мікрофонної системи мобільного телефону

На рис. 2.3 показано DMS у мобільному телефоні, а також показана робота системи в людному місці. Голосовий сигнал близький до мікрофона №1 (всередині мікрофона). З іншого боку, мікрофон №2 отримує перехресний переговорний шум, який *ослаблений* порівняно з мікрофоном №1.



Рисунок 2.3 – DMS у мобільному телефоні та її робота в людному місці

Після прийому сигналів в обидва мікрофони сигнали обробляються. Основний мікрофон приймає сигнали, що називаються $x_1(t)$, де $x_1(t)$ це первинний голосовий сигнал, а також затримка версії шуму перехресних розмов. З іншого боку, опорний мікрофон приймає сигнали, що називаються $x_2(t)$, які включають у себе перехресний шум, а також ослаблений голосовий сигнал. Сигнал $x_1(t)$ посилюється, а сигнал $x_2(t)$ віднімається від $x_1(t)$, таким чином отримуємо сигнал $y_1(t)$. Паралельно обидва сигнали складаються $x_1(t)$ і $x_2(t)$ разом і отримуємо сигнал $y_2(t)$. Потім сигнал $y_2(t)$ проходить через адаптивний фільтр і віднімається від $y_1(t)$. Метою цієї системи є стиснення перехресного переговорного шуму та отримання безшумного сигналу з мікрофона №1.

Адаптивний фільтр системи DMS на початок процесу обробки має одиничні вагові коефіцієнти. Після першої ітерації, коли помилка отримана, вагові коефіцієнти адаптивного фільтра змінюється порівняно з сигналом помилки і $y_2(t)$ сигнал фільтрується з новими ваговими коефіцієнтами. Таким чином, ітерації продовжуватимуться до тих пір, доки адаптивний фільтр не потрапить в оптимальне положення. Використовуються деякі критерії

мінімізації, яких можна досягти шляхом оновлення коефіцієнтів адаптивного фільтра. Це залежить від алгоритму, що використовується в системі [4], наприклад LMS, NLMS, RLS, LLMS. Алгоритми, що використовуються в подібних системах, описані нижче.

DMS застосовується в гарнітурах, системах голосової аутентифікації, веб-камерах, стільникових та бездротових телефонах та ін.. Для різних типів шумозаглушення система DMS є дуже ефективною. Ця система використовується практично у різних відомих компаніях у всьому світі. В якості інформації в Інтернеті ІТ-компанія США з назвою «Texas Instruments» використовує систему DMS для чудового шумопоглинання, попередження та захисту від шуму від вітру, наднизького споживання енергії та багатьох інших.

3 ОСНОВНІ АЛГОРИТМИ ШУМОЗАГЛУШЕННЯ

Цифрова фільтрація є невід’ємною частиною сучасних підходів до обробки сигналів та зображень [29]. Для обробки сигналів використовуються різні типи фільтрів, залежно від того, які типи сигналів будуть оброблятися. Основна різниця між адаптивною фільтрацією та іншими, наприклад лінійною фільтрацією полягає в тому, що адаптивна фільтрація використовується для нестационарної обробки сигналів. На жаль, сигнали, які виникають майже в кожному додатку, є нестационарними і змінюються в часі чи просторі. Тому в цих додатках використовується адаптивний фільтр. Адаптивний фільтр здатний регулювати свої коефіцієнти за допомогою адаптивних алгоритмів. Основним критерієм адаптивного фільтра є мінімізація середньоквадратичної помилки [31]. Інша відмінність між адаптивною та лінійною фільтрацією полягає в тому, що походить від принципу дії [29]. Попередня ідентифікація джерела не потрібна для адаптивного фільтрування, але потрібен навчальний сигнал.

Фільтри можна класифікувати різними способами, наприклад лінійні або нелінійні, дискретні або безперервні, аналогові або цифрові, FIR або IIR та багато інших. Цифровий фільтр є одним із найбільш застосовних підходів до обробки сигналів та зображень [29]. Класифікація деяких фільтрів коротко наведено нижче.

Лінійний або нелінійний фільтр: Фільтр, який обробив вхідний сигнал і надав лінійну вихідну функцію – називається лінійним фільтром. Якщо фільтр видає нелінійну вихідну функцію, то фільтр називається нелінійним фільтром [23].

Фільтр FIR або IIR: Кінцева імпульсна характеристика (FIR – Finite impulse response) – це фільтр, імпульсна характеристика якого має кінцеву довжину. З іншого боку, нескінченною імпульсною характеристикою (IIR – infinite impulse response) володіє IIR-фільтр [30].

Цифровий або аналоговий фільтр: Фільтр, який працює з дискретним у часі сигналом, називається цифровим фільтром. Цифровий фільтр має аналого-цифровий перетворювач для дискретизації вхідного сигналу [30].

3.1 Типовий алгоритм «Адаптивний фільтр»

Основною структурою адаптивного фільтра є класичний лінійний цифровий фільтр, і в більшості випадків це FIR -фільтр. Основною причиною використання адаптивної фільтрації є те, що існує багато ситуацій, коли класичний лінійний фільтр не може бути використаний [29]. Адаптивний фільтр має можливість регулювати коефіцієнти, за умов, коли характеристики сигналу та шуму невідомі [31]. Структурна схема адаптивного фільтра показана на рис. 3.1.

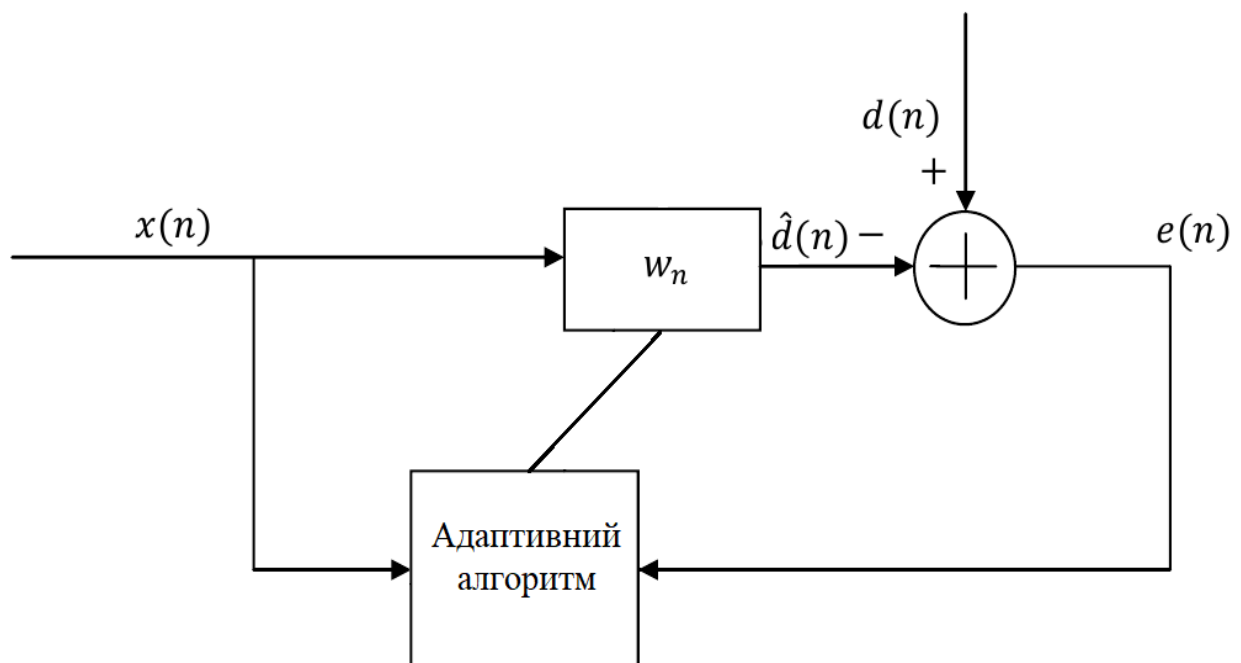


Рисунок 3.1 - Структура адаптивного фільтра

Основною концепцією адаптивного фільтра є мінімізація середньоквадратичної помилки [31]. Якщо бажаний сигнал $d(n)$ і $x(n)$ є

нестационарними, тоді коефіцієнти фільтра, які мінімізують середньоквадратичну помилку $E\{|e(n)|^2\}$ залежать від n . Отже, оцінка виражається як $\hat{d}(n) = w_n^T \cdot x(n)$ і необхідний набір оптимальних коефіцієнтів фільтра. Для вирішення проблеми формула перерахунку коефіцієнтів формується як

$$w_{n+1} = w_n + \Delta w_n,$$

де Δw_n - корекція залежно від сигналу про помилку.

Ця корекція визначається як правила адаптивних алгоритмів. Властивості адаптивного фільтра наведені нижче [31]:

- адаптивний фільтр повинен виробляти поправку так, щоб збігатися з рішенням рівнянь Вінера-Хопфа

$$\lim_{n \rightarrow \infty} w_n = R_x^{-1} \cdot r_{dx},$$

- для обчислення Δw_n не потрібно знати автокореляцію R_x та перехресну кореляцію r_{dx} .
- для нестационарних сигналів фільтр повинен мати можливість адаптувати статистику, що змінюється.

Адаптивний фільтр може бути фільтрами FIR або IIR, але FIR - фільтр є більш популярним. Причин популярності кілька. Здебільшого стабільність можна легко контролювати у FIR-фільтрі, оскільки його коефіцієнти обмежені. По-друге, у FIR-фільтрах алгоритми прості та ефективні для регулювання. Більше того, ці алгоритми добре працюють з точки зору їх збіжності та стабільності.

3.2 Різновиди адаптивних алгоритмів

Основна концепція адаптивного фільтра полягає у пошуку корекції адаптивного фільтра, яка залежить від адаптивних алгоритмів [31]. Залежно від швидкості збіжності, стабільності, надійності та інших, адаптивні алгоритми можна класифікувати. Але найбільш використовуваними та базовими алгоритмами є Least Mean Square (LMS), Normalized Least Mean Square (NLMS), Leaky Least Mean Square (LLMS) та Recursive Least Mean Square (RLMS). Нижче коротко описані загальноновживані алгоритми. Узагальнені властивості та практичні обмеження цих алгоритмів додатково розглянуто у працях [33, 34].

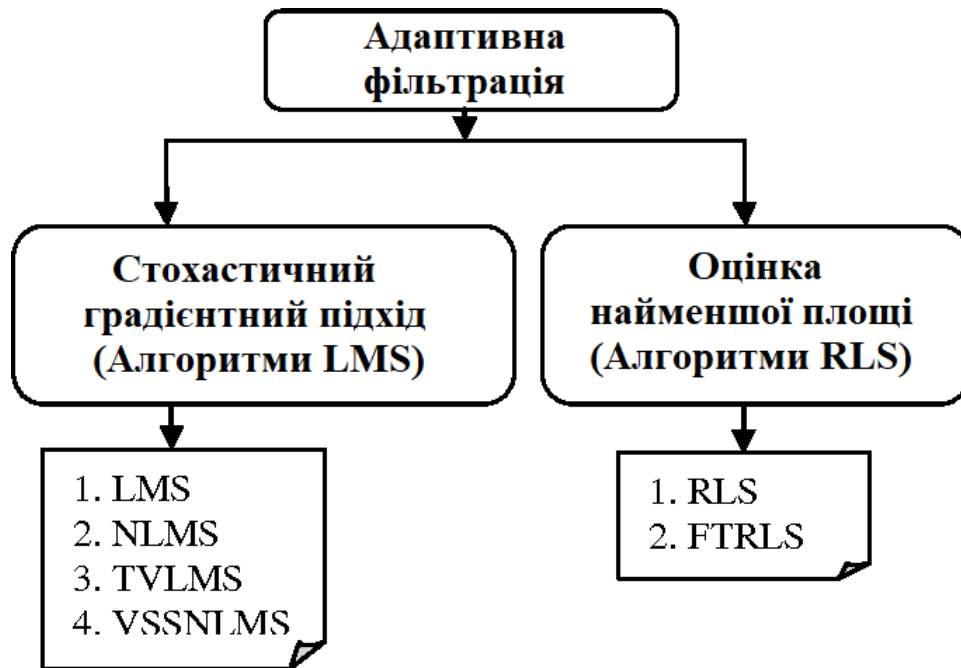


Рисунок 3.2 – Алгоритми адаптивної фільтрації

3.2.1 LMS-алгоритм

Алгоритм LMS вивели у 1959 р. Widrow та Hoff [29] і до цього часу це один з найкращих алгоритмів адаптивного фільтрування. Основними напрямками

використання є режими ідентифікації, придушення луни, зниження рівня шумів, які обумовлені квантуванням каналів та ін.

LMS – це наближення алгоритму найкрутішого спуску, заснованого на теорії фільтра Вінера [29] [31] [32]. Швидкість конвергенції є порівняно повільною, але вона популярна своїми надійними характеристиками, низькою вартістю та простотою.

Концепція найкрутішого спуску адаптивного фільтра полягає у мінімізації середньоквадратичної помилки $\xi(n) = E\{|e(n)|^2\}$ і оцінкою вектора w_n , який мінімізує $\xi(n)$.

Оскільки вектор градієнта вказує у напрямку найкрутішого підйому, найкрутіший пристойний напрямок буде в негативному напрямку градієнта [31]. Отже, оновлені рівняння для найкрутішого спуску

$$w_{n+1} = w_n - \mu \cdot \nabla \xi(n),$$

де μ - це розмір кроку,

$$\nabla \xi(n) = -E\{e(n) \cdot x^*(n)\}.$$

Отже алгоритм має вигляд

$$w_{n+1} = w_n + \mu \cdot E\{e(n) \cdot x^*(n)\}. \quad (3.1)$$

Алгоритм LMS є наближенням алгоритмів найкрутішого спуску, а наближення оцінюється як середнє значення. Якщо використовується одне вибіркове середнє [31], тоді оцінюється $E\{e(n) \cdot x^*(n)\} = e(n) \cdot x^*(n)$ та перетворюється на рівняння (3.2):

$$w_{n+1} = w_n + \mu e(n) \cdot x^*(n) \quad (3.2)$$

Рівняння (3.2) відоме як алгоритм LMS. У LMS $p + 1$ коефіцієнти необхідні для обчислення похибки та добутку $\mu e(n)$, де p порядок фільтрування алгоритму LMS, а μ розмір кроку, обмеження якого

$$0 < \mu < \frac{2}{(p+1) \cdot E\{|x(n)|^2\}} \quad (3.3)$$

Недоліки алгоритму:

1. Повільна швидкість конвергенції (збіжності),
2. Важко підібрати розмір кроку.
3. Якщо значення $x(n)$ велике, LMS створює проблеми з посиленням градієнтного шуму.

3.2.2 NLMS-алгоритм

Одна із складнощів LMS алгоритму – це вибір розміру кроку. Отже, зручним способом усунення цієї проблеми є використання змінного за часом розміру кроку, який можна сформувати як

$$\mu = \frac{\beta}{\|x(n)\|^2}, \quad (3.4)$$

де β - це нормалізований розмір кроку з умовою $0 < \beta < 2$. За допомогою заміни розміру кроку в рівнянні розрахунку коефіцієнтів LMS (3.2) перетворюється на рівняння (3.5)

$$w_{n+1} = w_n + \frac{\beta}{\|x(n)\|^2} \cdot e(n) \cdot x^*(n) \quad (3.5)$$

З нормалізацією розміру кроку в алгоритмі NLMS проблема посилення градієнтного шуму не вирішується, вона зменшується. У NLMS виникає та сама проблема, коли $\|x(n)\|$ стає замалою величиною. Щоб уникнути проблеми, додається невелике позитивне число ϵ [31]. Отже, модифікований алгоритм NLMS виглядає наступним чином:

$$w_{n+1} = w_n + \frac{\beta}{\epsilon + \|x(n)\|^2} \cdot e(n) \cdot x^*(n) \quad (3.6)$$

3.2.3 LLMS-алгоритм

Коли на вході сигнал, автокореляція якого містить нульові власні значення, при роботі алгоритму LMS виникають нестабільні умови роботи алгоритму [31]. Для усунення таких умов вводять коефіцієнт витоку (Leaky) в алгоритм LMS, щоб забезпечити затухання коливальних процесів. Цей коефіцієнт витоку γ вводиться у алгоритм LMS і рівняння стає таким (3.7).

$$w_{n+1} = (1 - \mu\gamma) \cdot w_n + \mu e(n) \cdot x^*(n) \quad (3.7)$$

Цей алгоритм називається Leaky LMS [31], де основною умовою є $0 < \gamma \ll 1$. Вплив коефіцієнта витоку полягає у примусовому прирівнюванні коефіцієнтів фільтра до нуля, якщо $e(n)$ або $x(n)$ дорівнює нулю [31].

3.2.4 RLMS-алгоритм

RLS в основному базується на фільтрації Калмана, де він перебирає вагу кожного сигналу у фільтрі у напрямку сигналу похибки градієнта квадратної амплітуди [29]. Але структура фільтра така ж, як і алгоритм LMS, різниця лише у адаптивному процесі. Рівняння розрахунку коефіцієнтів фільтра уявляє собою наступне:

$$w_n = w_{n-1} + k^H(n) \cdot e(n) \quad (3.8)$$

де k^H вектор посилення, а $e(n)$ - помилка.

3.2.5 Порівняння NLMS та LMS

Порівнюючи нормалізований LMS та стандартний LMS, можна зробити наступні спостереження як

- Розмір кроку β нормалізованого алгоритму LMS є безрозмірним, тоді як розмір кроку μ стандартного алгоритму LMS має розмірність оберненої потужності.
- Розмір кроку NLMS - це не що інше, як розмір кроку LMS із параметром розміру кроку, що змінюється в часі.
- Найголовніше, швидкість збіжності NLMS швидша, ніж у алгоритму LMS, як для корельованих, так і для некорельованих вхідних сигналів.

Результат аналізу джерел [16-31] дозволив скласти порівняльну табл. 3.1 для алгоритмів LMS і NLMS. В якості основних показників виділені середньоквадратична похибка (СКП), складність реалізації (кількість операцій множення, що виконуються за одну ітерацію алгоритму), стабільність, швидкість збіжності (вихід алгоритму на робочий режим).

Таблиця 3.1 – Порівняння алгоритмів LMS і NLMS

Алгоритм	СКП	Складність	Стабільність	Швидкість збіжності
LMS	$1,5 \times 10^{-2}$	$2N+1$	менш стабільний	низька
NLMS	$9,0 \times 10^{-3}$	$3N+1$	стабільний	помірна

4 МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛІВ ЗІ СКЛАДНИМ СПЕКТРОМ

4.1 Структурна схема подвійної мікрофонної системи для моделювання

У цьому розділі наведено результати використання двох адаптивних алгоритмів для подвійних мікрофонних систем. Відстань між двома мікрофонами змінюється і порівнюються результати роботи системи з різними алгоритмами.

На рис. 4.1 показана структура DMS, яка використовує два мікрофони. Обидва мікрофони розміщені на відстані d . Шум приймається обома мікрофонами із затримкою, яка пов'язана з відстанню d між мікрофонами. Оцінюючи відношення сигнал-шум відносно відстані між мікрофонами, можна отримати краще положення для обох мікрофонів.

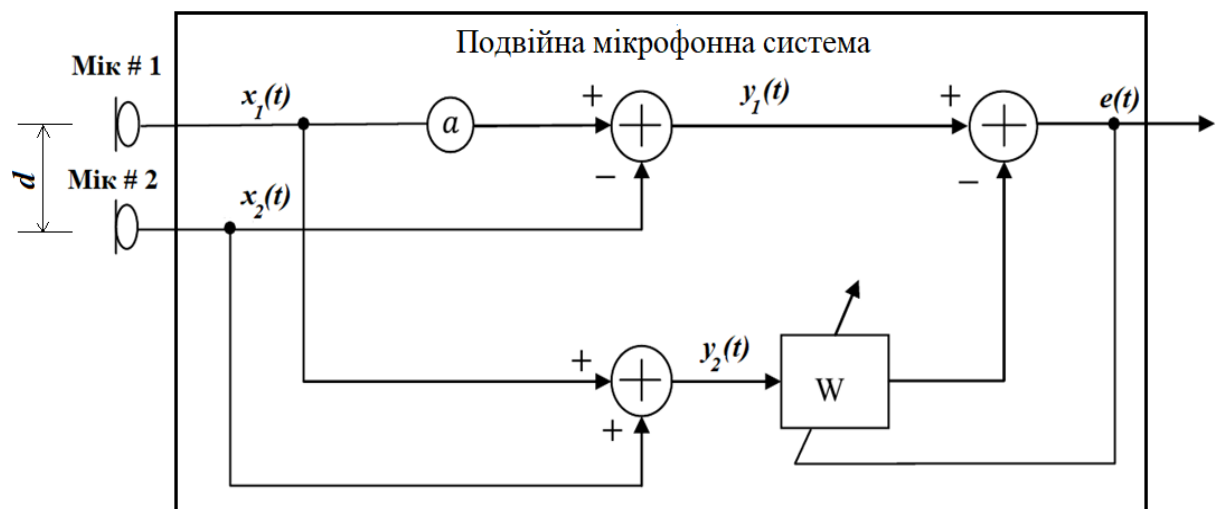


Рисунок 4.1 – Структура подвійної мікрофонної системи для моделювання

Мікрофон #1 знаходиться близько до джерела корисного сигналу, мікрофон #2 також отримує корисний сигнал, однак, із послабленням. Як уже зазначалося, обидва мікрофони є всепрямованими, тому з якого боку шум надходить не

впливає на якість вихідних даних. Припустимо, що на мікрофон #1 приймається мовний або голосовий сигнал $s(t)$ та затримується версія шуму – $p1$. Сигнал на мікрофоні #1 назвемо первинним вхідним сигналом. На мікрофон #2 приймається шум $n(t)$ без затримки та ослаблений голосовий сигнал – $p2$. Приймаючий сигнал на мікрофоні #2 назвемо опорним вхідним сигналом. Отже, вхідні сигнали подаються наступним чином:

$$x1(t) = s(t) + p1, \quad (4.1)$$

$$x2(t) = s(t) + p2 \quad (4.2)$$

Дотримуючись структури, що відображена на рис. 4.1, запишемо наступні рівняння

$$y1(t) = a \cdot x1(t) - x2(t) \quad (4.3)$$

$$y2(t) = x1(t) + x2(t) \quad (4.4)$$

$$e(t) = y1(t) - W(t) \cdot y2(t) \quad (4.5)$$

У цих рівняннях a - постійне значення, яке збільшує сигнал $x1(t)$, а W є адаптивним фільтром. В нашому випадку коефіцієнти фільтра W змінюються за допомогою алгоритмів LMS та NLMS. Розрахунок вагових коефіцієнтів цих алгоритмів показано у рівняннях 3.2 та 3.6. Вагові коефіцієнти фільтра помножується на $y2(t)$, а потім результат множення віднімається від $y1(t)$. Віднімання цих двох компонентів називається сигналом помилки $e(t)$, який використовується для оновлення вагових коефіцієнтів фільтра для наступних ітерацій.

4.2 Оцінка якості фільтрації

Якість залежить від співвідношення сигнал-шум (SNR Signal Noise Ratio). Поліпшення системи залежить від різниці між вхідним SNR та вихідним SNR. Вхідний SNR можна нормально розрахувати за вхідним сигналом та вхідним шумом. Вихідний SNR не може бути розрахований за співвідношенням вихідного сигналу та вихідного шуму через адаптивну систему. Процедура розрахунку вихідного SNR показана на рисунку 4.2. Є ще дві паралельні системи, де лише мовний сигнал є входом для другої системи, а лише шум є входом для третьої системи. Внутрішні адаптивні вагові вектори копіюються у другу та третю систему, що означає, що коефіцієнти фільтрації наступних двох систем такі ж, як і раніше. Результат роботи для другої системи позначається як E_s , а для третьої системи - E_n . Відношення цих коефіцієнтів (4.6) дозволяє отримати вихідний SNR системи

$$SNR_{out} = 10 \cdot \log_{10} \frac{E_s}{E_n} \quad (4.6)$$

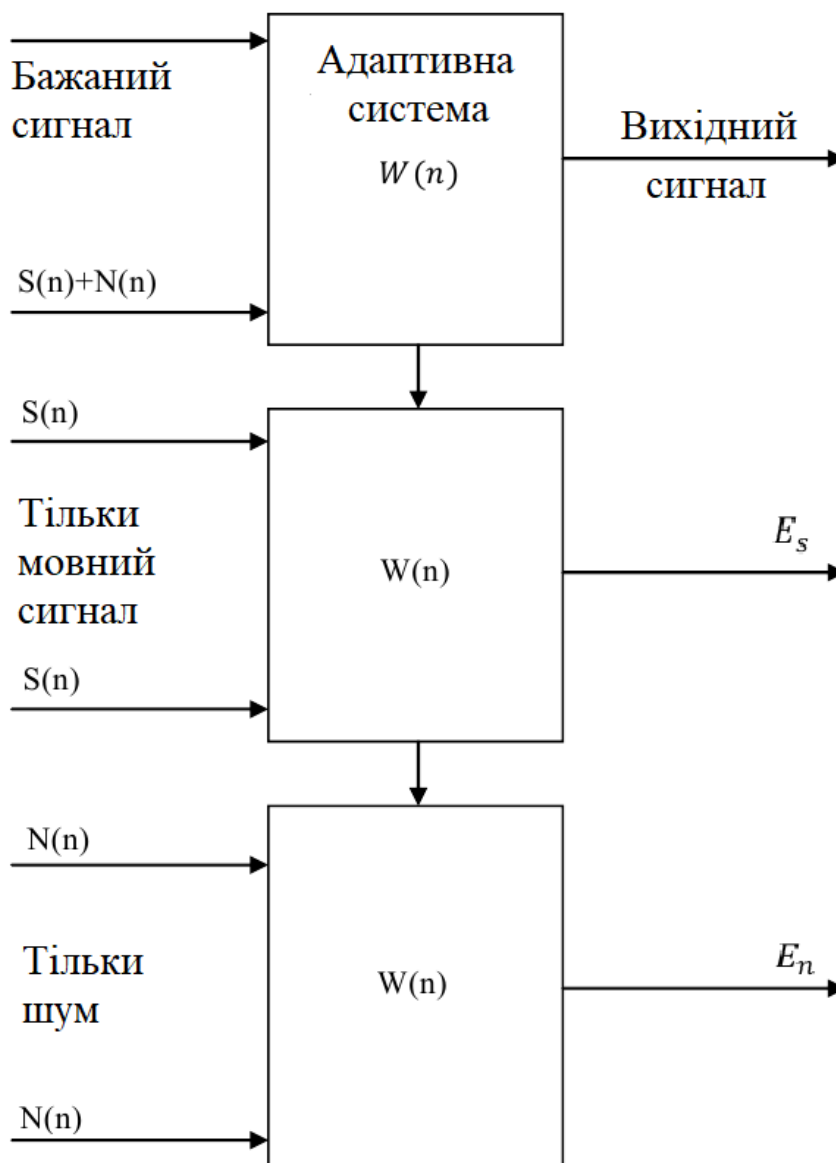


Рисунок 4.2 – Структурний вигляд розрахунку вихідного SNR
в адаптивній системі

Оскільки покращення SNR (SNRI) - це якість системи, ми вважаємо, що більше 12 дБ SNRI - це відмінно, від 9-12 дБ SNRI - це добре, менш 9 дБ SNRI – незадовільно. Використовуючи цю шкалу, ми можемо розглянути кращі позиції двох мікрофонів.

4.3 Програмне середовище для моделювання

В якості середовища для моделювання алгоритмів LMS та NLMS вибрано MATLAB.

MATLAB – це числове обчислювальне середовище, яке особливо ефективно для обчислення та моделювання технічних проблем [33, 34]. Ця мова програмування дуже потужна, дозволяє маніпулювати матрицями, складати графіки функцій та даних, реалізувати алгоритми, створювати користувальницькі інтерфейси та взаємодіяти з іншими мовами програмування (C, C++ та Java).

Однією з найбільш корисних функцій є графічна візуалізація, яка допомагає мати впевненість у результатах шляхом моніторингу та аналізу результуючих графіків.

Крім того, до складу MATLAB входить SIMULINK, модельний пакет програм, моделює та аналізує динамічні системи. Це дозволяє нам поставити запитання про систему, змоделювати систему і подивитися, що відбувається.

Для нашої моделі моделювання MATLAB насправді є необхідним та ефективним програмним забезпеченням для досягнення переконливих результатів з таких причин:

- можливість запису аудіосигналів. Ці дані є необхідними для моделювання;
- можливість всебічного контролю вихідного результату: графічний контроль, відтворення аудіо - та відеосигналів;
- наявність широкого набору функцій (Toolboxes) для цифрової обробки сигналів.

4.4 Основні налаштування

Для формування уявлення про алгоритми та їх реалізацію в коді в табл. 4.1- 4.2 наведено короткий зміст алгоритмів (LMS, NLMS) та сегментів MATLAB коду.

Таблиця 4.1 – Алгоритм побудови обробника для алгоритмів LMS та NLMS

	Алгоритм LMS	Алгоритм NLMS
Початкові умови	$0 < \mu < 1$ Довжина адаптивного фільтру: L Вхідний вектор: $x_{L,I} = [0,0, \dots, 0]^T$ Вектор коефіцієнтів: $w_{L,I} = [0,0, \dots, 0]^T$	$0 < \alpha < 1$, c – незначна константа Довжина адаптивного фільтру: L Вхідний вектор: $x_{L,I} = [0,0, \dots, 0]^T$ Вектор коефіцієнтів: $w_{L,I} = [0,0, \dots, 0]^T$
Для кожного моменту часу, $n = 1, 2, \dots$, обчислити:		
Вихідний сигнал	$y(n) = w^T(n) \cdot x(n)$	
Розрахунок помилки	$e(n) = d(n) - y(n)$	
Адаптація з урахуванням $w(n)$	$w(n+1) = w(n) + 2 \cdot \mu \cdot x(n) \cdot e(n)$	$w(n+1) = w(n) + \frac{2 \cdot \alpha}{c + x^T(n) \cdot x(n)} \cdot x(n) \cdot e(n)$

Таблиця 4.2 – MATLAB код для алгоритмів LMS та NLMS

	Алгоритм LMS	Алгоритм NLMS
Початкові умови	$\mu=0.014$; % приклад $L=\text{length}(h)$; % Довжина адаптивного фільтру $x_{in}=\text{zeros}(L,1)$; % Вхідний вектор $w=\text{zeros}(L,1)$; % Вектор коефіцієнтів	$\alpha=0.42$; % приклад $c = 0.1$; % приклад $L=\text{length}(h)$; % Довжина адаптивного фільтру $x_{in}=\text{zeros}(L,1)$; % Вхідний вектор $w=\text{zeros}(L,1)$; % Вектор коефіцієнтів
Для кожного моменту часу, $n = 1, 2, \dots$, обчислити:		
Вихідний сигнал	$y(i)=w' \cdot x_{in}$;	
Розрахунок помилки	$\text{error} = d(i) - y(i)$;	
Адаптація з урахуванням $w(n)$	$w_{\text{temp}} = w + 2 \cdot \mu \cdot \text{error} \cdot x_{in}$;	$\mu = \alpha / (c + x_{in}' \cdot x_{in})$; $w_{\text{temp}} = w + 2 \cdot \mu \cdot \text{error} \cdot x_{in}$;

4.5 Тестові вхідні сигнали

В якості вхідних сигналів був використаний голосовий сигнал тривалістю 5 секунд з частотою вибірки 8 кГц. Голосові сигнали для обох мікрофонів побудовані на рис. 4.3 – 4.4 із загасанням 15 дБ і 30 дБ. З Шум приймається на мікрофоні #2, а відстрочена версія - на мікрофоні #1. На рисунку 4.5 зображені сторонні шуми. Шуми в обох мікрофонах відображаються із затримкою в 1 біт. Використовуючи різне положення двох мікрофонів, за рахунок затримки сигналу, розраховується вихідний SNR і з'ясовується поліпшення SNR (SNRI).

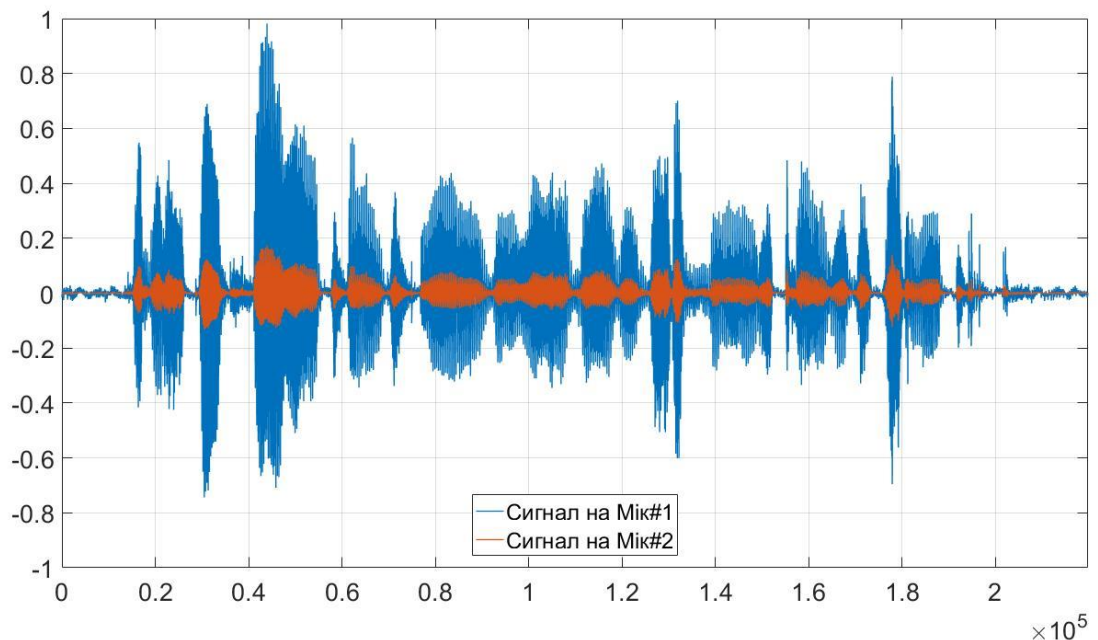


Рисунок 4.3 – Вхідні голосові сигнали в мікрофон #1 та мікрофон #2,
що послаблений із затуханням 15 дБ

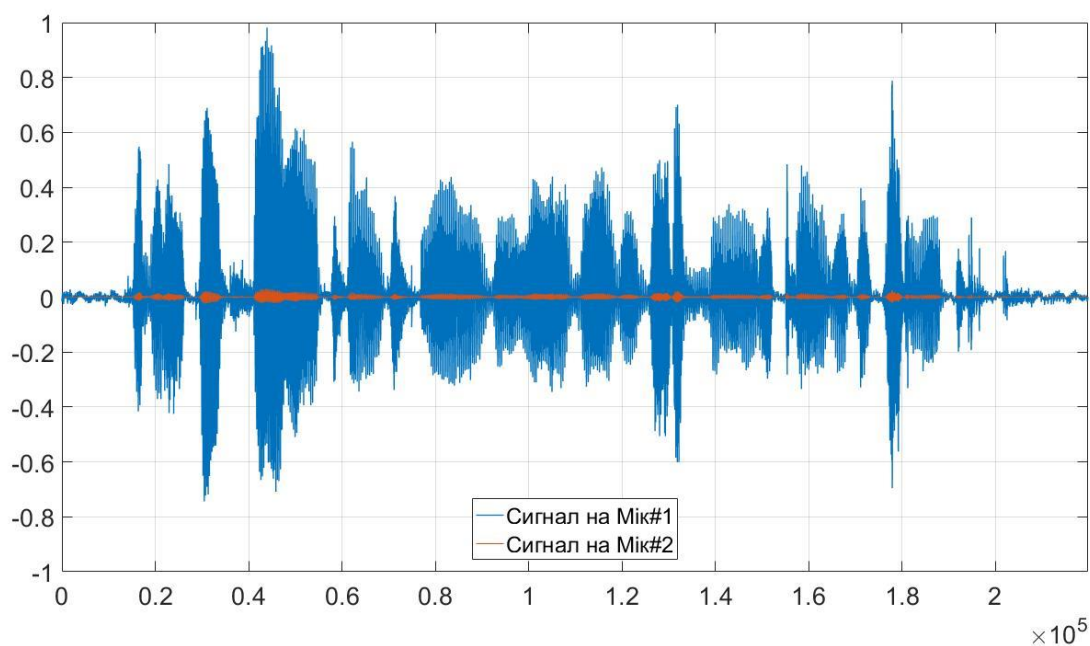


Рисунок 4.4 – Вхідні голосові сигнали в мікрофон #1 та мікрофон #2, що послаблений із затуханням 30 дБ

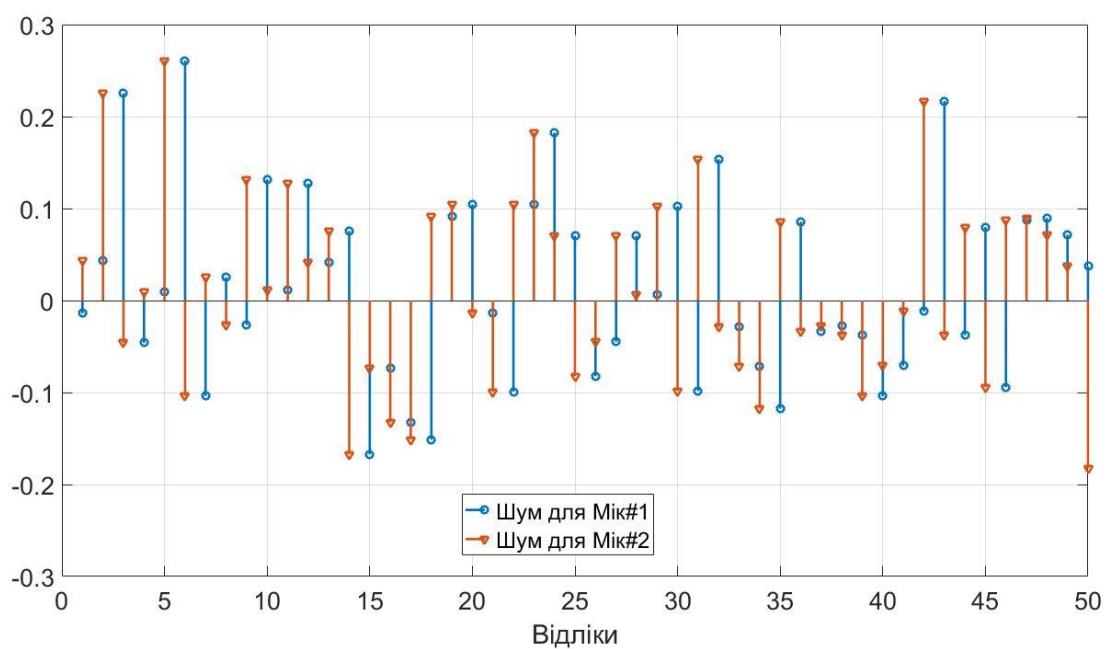


Рисунок 4.5 – Сторонні шуми в обох мікрофонах. Мікрофон #1 приймає шум, що затриманий на 1 біт

4.6 Результати моделювання

Для порівняння вихідного SNR та SNRI з відстанню між двома мікрофонами був створений MATLAB-скрипт, у якому налаштовувалися довжина фільтра, ослаблення голосу на мікрофоні #2 (15 дБ або 30 дБ), а вхідний SNR змінювався у діапазоні від 0 до 25 дБ. Результати наведені в таблиці 4.3 - 4.14. У таблицях 4.3 і 4.9 наведено SNRI з використанням алгоритмів LMS і NLMS, коли відстань між двома мікрофонами дорівнює 0 см, у таблиці 4.4 і 4.10 - коли відстань становить 2 см, у таблиці 4.5 і 4.11 - коли відстань становить 4 см, у таблиці 4.6 і 4.12 - коли відстань становить 6 см, а в таблиці 4.7 і 4.13 - коли відстань становить 8 см.

У таблицях 4.8 і 4.14 показано середні SNRI за відстанню для алгоритмів LMS та NLMS. Аналіз цих цифр дозволяє краще спостерігатися відмінності між алгоритмом LMS і NLMS. Середній SNRI як для LMS, так і для NLMS зменшується із збільшенням відстані між двома мікрофонами, але винятком є випадки, коли відстань дорівнює нулю за допомогою алгоритму LMS.

На рис. 4.6 – 4.8 зображені зміни SNRI для алгоритмів LMS та NLMS відносно вхідного SNR та відстані між мікрофонами за умови ослаблення голосу на мікрофоні #2 – 15 дБ, а на рис. 4.9 – 4.11 – для ослаблення 30 дБ. SNRI є кращим, коли загасання для мікрофона #2 вище.

На рис. 4.12 наведено середні значення SNRI за всіма вибірками для алгоритмів LMS та NLMS. Аналіз рис. 4.12 показує, що максимальний SNRI виявляється, коли відстань становить 2 см. Для кращого результату в цій системі рекомендована відстань до 4 см. З таблиць та рисунків можна зробити висновок, що алгоритм LMS дає кращі вдосконалення, але через повільне зближення алгоритм NLMS краще використовувати в цій системі. Порівнюючи результати фільтрації з використанням алгоритмів LMS та NLMS, що показані на рис. 4.13 - 4.15, NLMS дає кращий результат у порівнянні із LMS.

Таблиця 4.3 – Результати моделювання при умові: $d = 0$ см, загасання 15 дБ

SNR_{input}	SNR_{out_LMS}	SNR_{out_NLMS}	$SNRI_{LMS}$	$SNRI_{NLMS}$
0	14,15	15,94	14,15	15,94
5	19,27	20,97	14,27	15,97
10	24,24	25,97	14,24	15,97
15	29,22	30,96	14,22	15,96
20	34,26	35,97	14,26	15,97
25	39,15	40,94	14,15	15,94

Таблиця 4.4 – Результати моделювання при умові: $d = 2$ см, загасання 15 дБ

SNR_{input}	SNR_{out_LMS}	SNR_{out_NLMS}	$SNRI_{LMS}$	$SNRI_{NLMS}$
0	14,75	13,85	14,75	13,84
5	19,71	18,82	14,71	13,82
10	24,76	23,85	14,76	13,85
15	29,69	28,81	14,69	13,81
20	34,68	33,80	14,68	13,80
25	39,72	38,83	14,72	13,83

Таблиця 4.5 – Результати моделювання при умові: $d = 4$ см, загасання 15 дБ

SNR_{input}	SNR_{out_LMS}	SNR_{out_NLMS}	$SNRI_{LMS}$	$SNRI_{NLMS}$
0	9,97	8,82	9,97	8,82
5	15,01	13,85	10,01	8,85
10	20,00	18,85	10,00	8,85
15	24,90	23,76	9,90	8,76
20	29,98	28,83	9,98	8,83
25	35,02	33,86	10,02	8,86

Таблиця 4.6 – Результати моделювання при умові: $d = 6$ см, загасання 15 дБ

SNR_{input}	SNR_{out_LMS}	SNR_{out_NLMS}	$SNRI_{LMS}$	$SNRI_{NLMS}$
0	6,83	6,13	6,83	6,13
5	11,83	11,12	6,83	6,12
10	16,94	16,22	6,94	6,22
15	21,82	21,11	6,82	6,11
20	26,89	26,17	6,89	6,17
25	31,89	31,18	6,89	6,18

Таблиця 4.7 – Результати моделювання при умові: $d = 8$ см, загасання 15 дБ

SNR_{input}	SNR_{out_LMS}	SNR_{out_NLMS}	$SNRI_{LMS}$	$SNRI_{NLMS}$
0	4,90	4,66	4,90	4,66
5	9,87	9,64	4,87	4,64
10	14,95	14,70	4,95	4,70
15	19,99	19,73	4,99	4,73
20	24,91	24,67	4,91	4,67
25	29,87	29,64	4,87	4,64

Таблиця 4.8 – Середні значення SNRI, загасання 15 дБ

Відстань між мікрофонами (см)	Середній $SNRI_{LMS}$	Середній $SNRI_{NLMS}$	Шкала якості
0	14,22	15,96	Відмінно
2	14,72	13,83	Відмінно
4	9,98	8,83	Добре
6	6,87	6,16	Незадовільно
8	4,92	4,67	Незадовільно

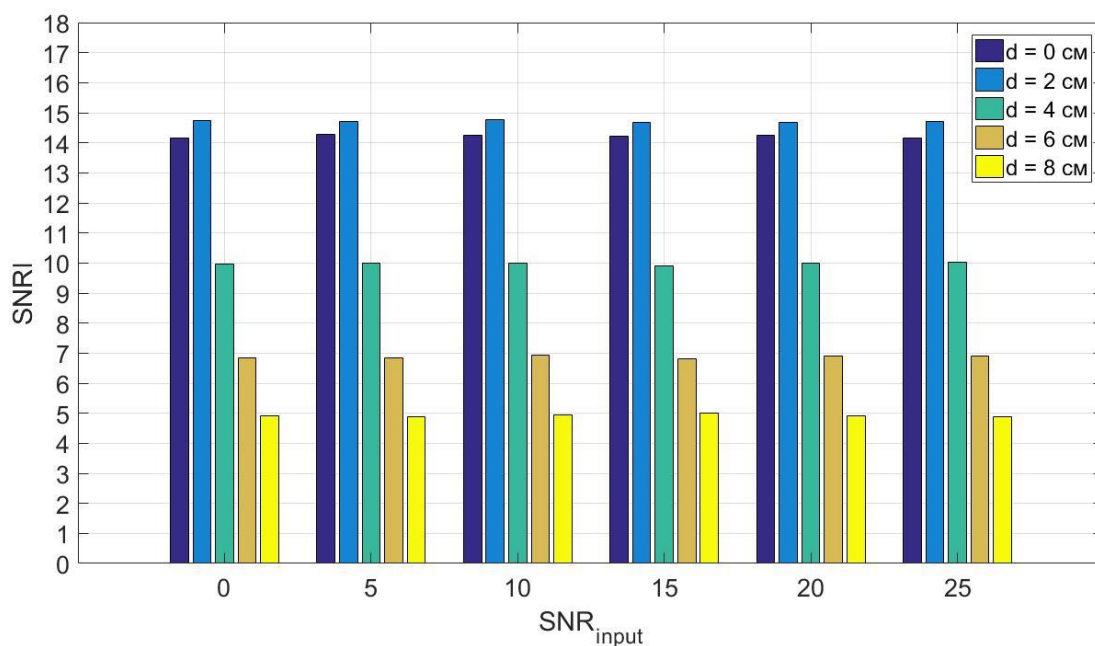


Рисунок 4.6 – Зміна SNRI відносно вхідного SNR та відстані між мікрофонами з використанням LMS (ослаблення 15 дБ)

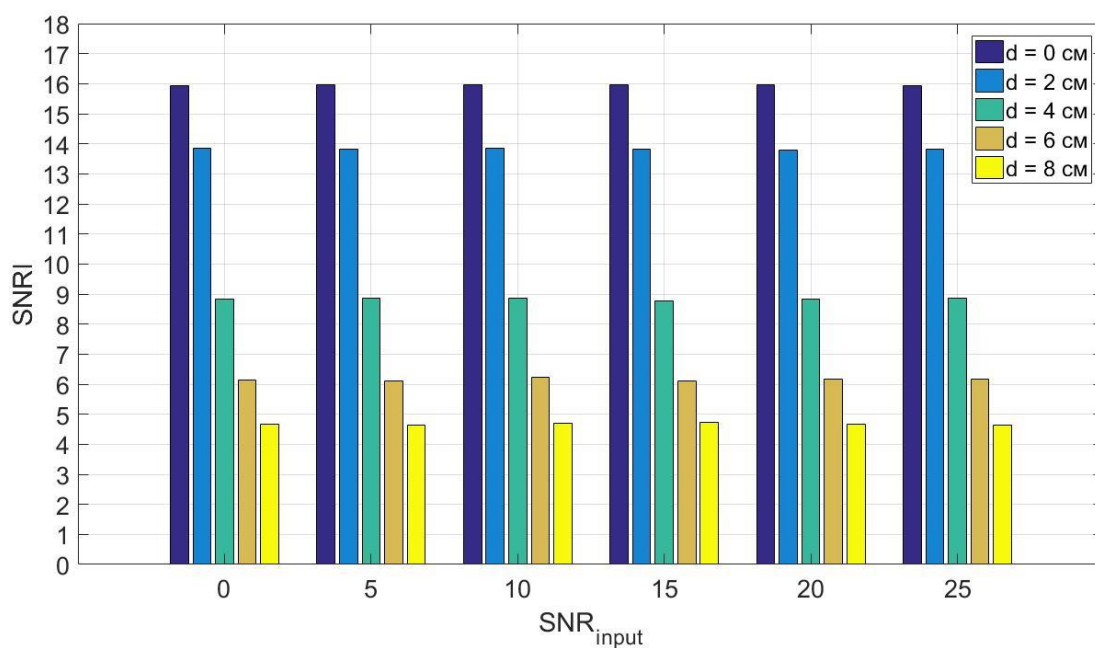


Рисунок 4.7 – Зміна SNRI відносно вхідного SNR та відстані між мікрофонами з використанням NLMS (ослаблення 15 дБ)

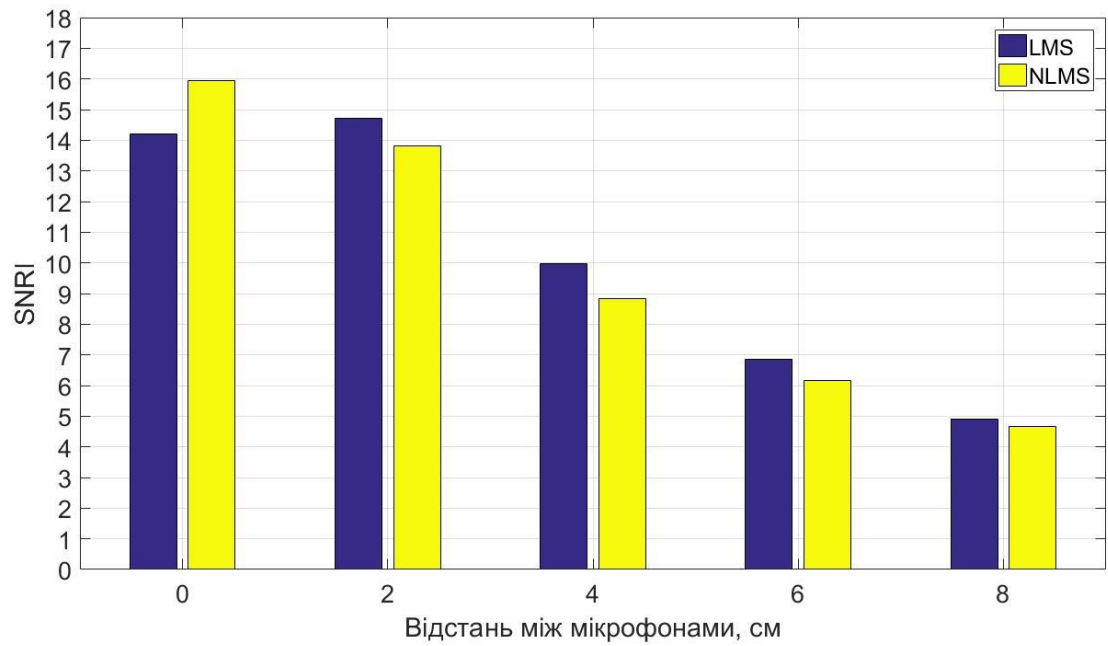


Рисунок 4.8 – Середні значення SNRI для алгоритмів LMS та NLMS відносно відстані між мікрофонами (ослаблення 15 дБ)

Таблиця 4.9 – Результати моделювання при умовах: $d = 0$ см, загасання 30 дБ

SNR_{input}	SNR_{out_LMS}	SNR_{out_NLMS}	$SNRI_{LMS}$	$SNRI_{NLMS}$
0	15,87	16,50	15,87	16,50
5	20,86	21,50	15,86	16,50
10	25,87	26,51	15,87	16,51
15	30,86	31,50	15,86	16,50
20	35,86	36,50	15,86	16,50
25	40,88	41,51	15,88	16,51

Таблиця 4.10 – Результати моделювання при умовах: $d = 2$ см,
загасання 30 дБ

SNR_{input}	SNR_{out_LMS}	SNR_{out_NLMS}	$SNRI_{LMS}$	$SNRI_{NLMS}$
0	16,58	14,93	16,58	14,93
5	21,55	19,91	16,55	14,91
10	26,55	24,91	16,55	14,91
15	31,56	29,91	16,56	14,91
20	36,57	34,92	16,57	14,92
25	41,57	39,92	16,57	14,92

Таблиця 4.11 – Результати моделювання при умовах: $d = 4$ см,
загасання 30 дБ

SNR_{input}	SNR_{out_LMS}	SNR_{out_NLMS}	$SNRI_{LMS}$	$SNRI_{NLMS}$
0	12,00	10,56	12,00	10,56
5	17,02	15,58	12,02	10,58
10	22,03	20,59	12,03	10,59
15	27,02	25,58	12,02	10,58
20	32,01	30,57	12,01	10,57
25	37,00	35,56	12,00	10,56

Таблиця 4.12 – Результати моделювання при умовах: $d = 6$ см,
загасання 30 дБ

SNR_{input}	SNR_{out_LMS}	SNR_{out_NLMS}	$SNRI_{LMS}$	$SNRI_{NLMS}$
0	8,97	8,01	8,97	8,01
5	13,98	13,01	8,98	8,01
10	18,97	18,01	8,97	8,01
15	23,94	22,98	8,94	7,98
20	28,97	28,00	8,97	8,00
25	33,96	33,00	8,96	8,00

Таблиця 4.13 – Результати моделювання при умовах: $d = 8$ см,
загасання 30 дБ

SNR_{input}	SNR_{out_LMS}	SNR_{out_NLMS}	$SNRI_{LMS}$	$SNRI_{NLMS}$
0	6,98	6,42	6,98	6,42
5	11,98	11,42	6,98	6,42
10	16,96	16,40	6,96	6,40
15	21,98	21,42	6,98	6,42
20	26,97	26,41	6,97	6,41
25	31,98	31,42	6,98	6,42

Таблиця 4.14 – Середні значення SNRI при умові загасання 30 дБ

Відстань між мікрофонами (см)	Середній $SNRI_{LMS}$	Середній $SNRI_{NLMS}$	Шкала якості
0	15,87	16,50	Відмінно
2	16,56	14,92	Відмінно
4	12,01	10,57	Добре
6	8,97	8,00	Незадовільно
8	6,98	6,42	Незадовільно

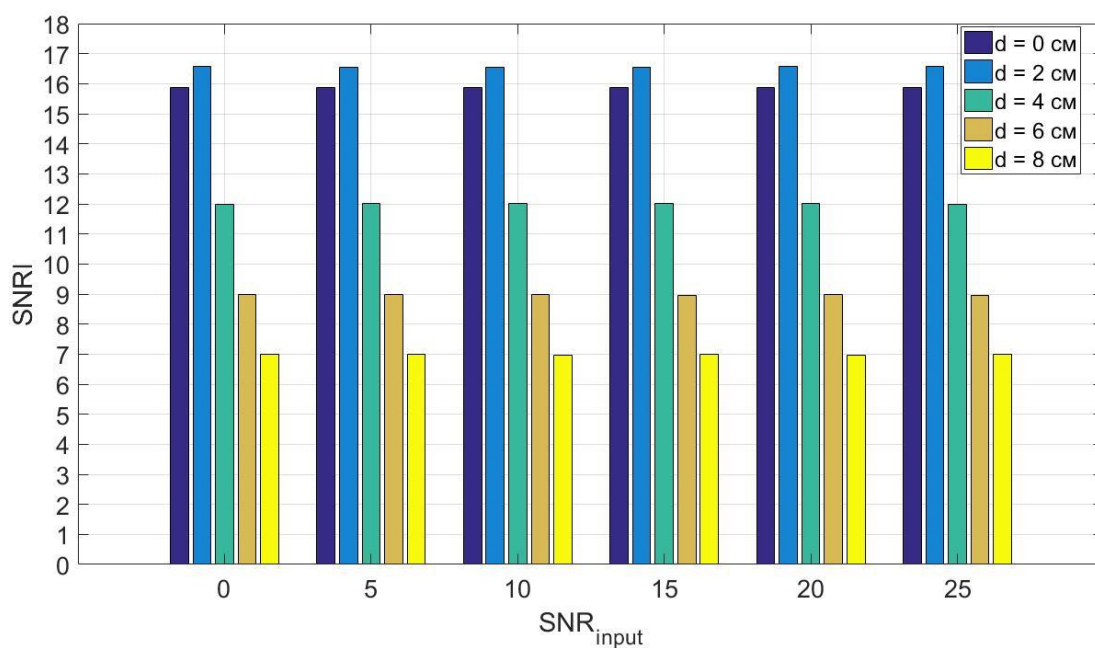


Рисунок 4.9 – Зміна SNRI відносно вхідного SNR та відстані між мікрофонами з використанням LMS (ослаблення 30 дБ)

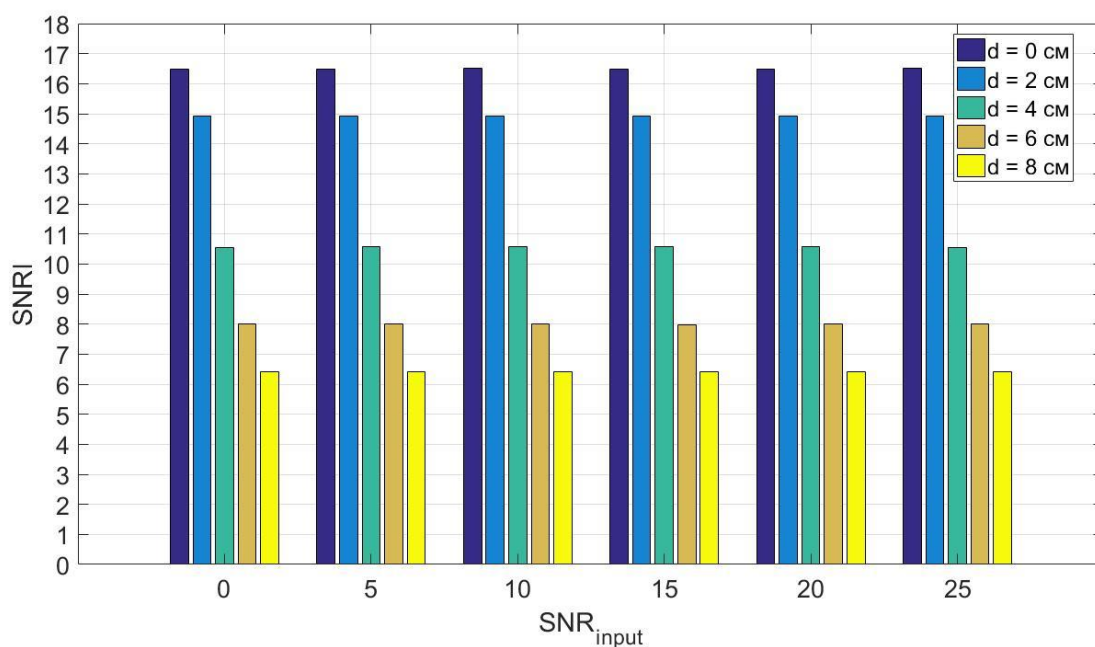


Рисунок 4.10 – Зміна SNRI відносно вхідного SNR та відстані між мікрофонами з використанням NLMS (ослаблення 30 дБ)

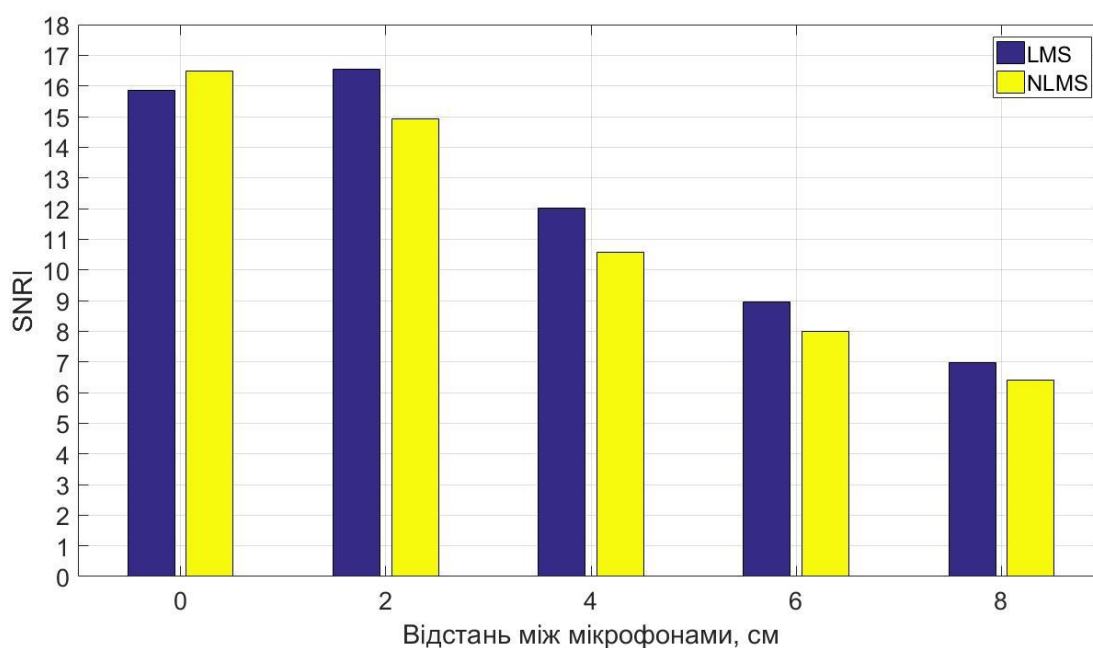


Рисунок 4.11 – Середні значення SNRI для алгоритмів LMS та NLMS відносно відстані між мікрофонами (ослаблення 30 дБ)

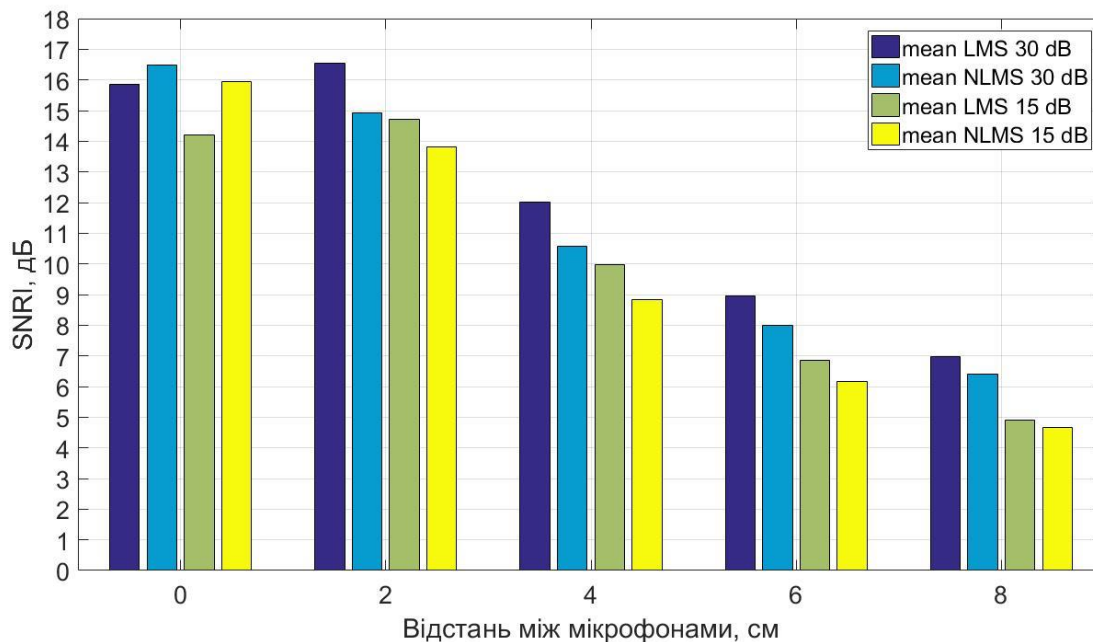


Рисунок 4.12 – Середні значення SNRI для алгоритмів LMS та NLMS за всіма вибірками

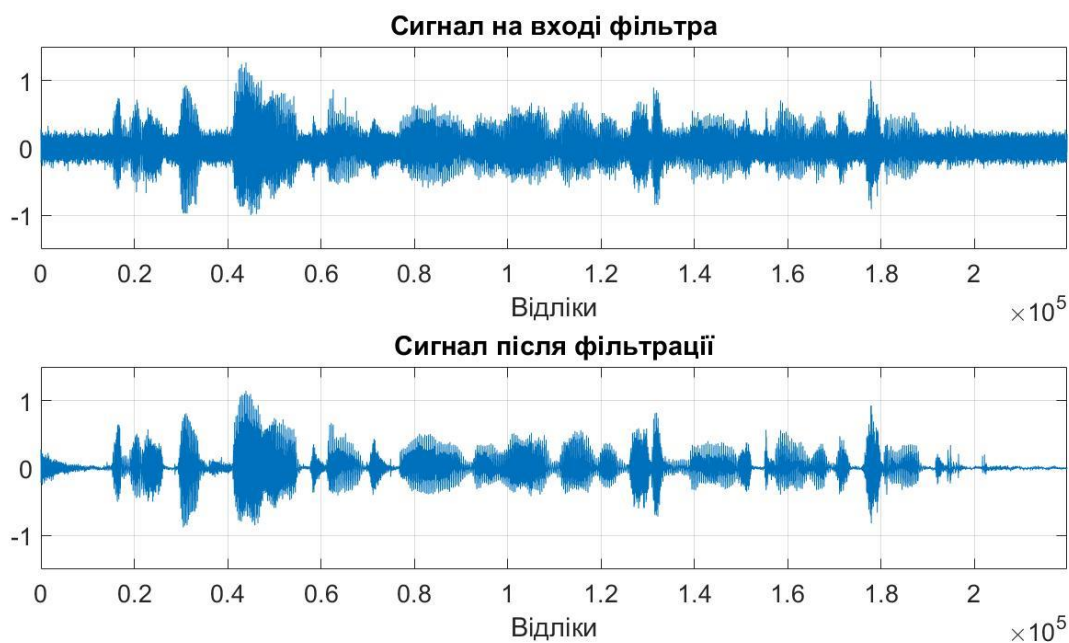


Рисунок 4.13 – Вхідний/Вихідний сигнали з використанням алгоритму LMS

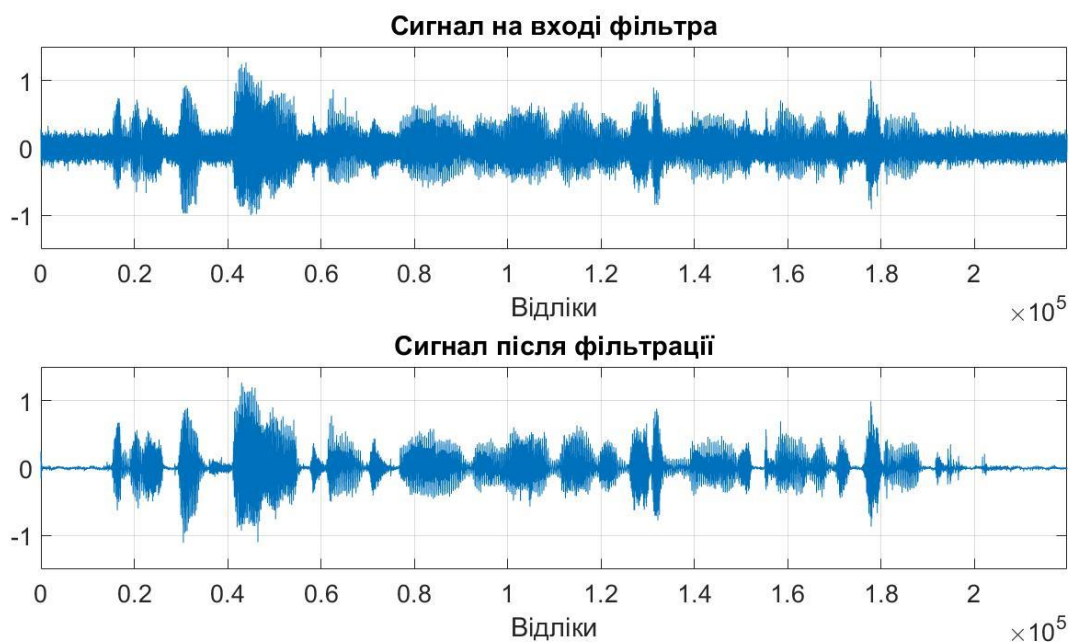
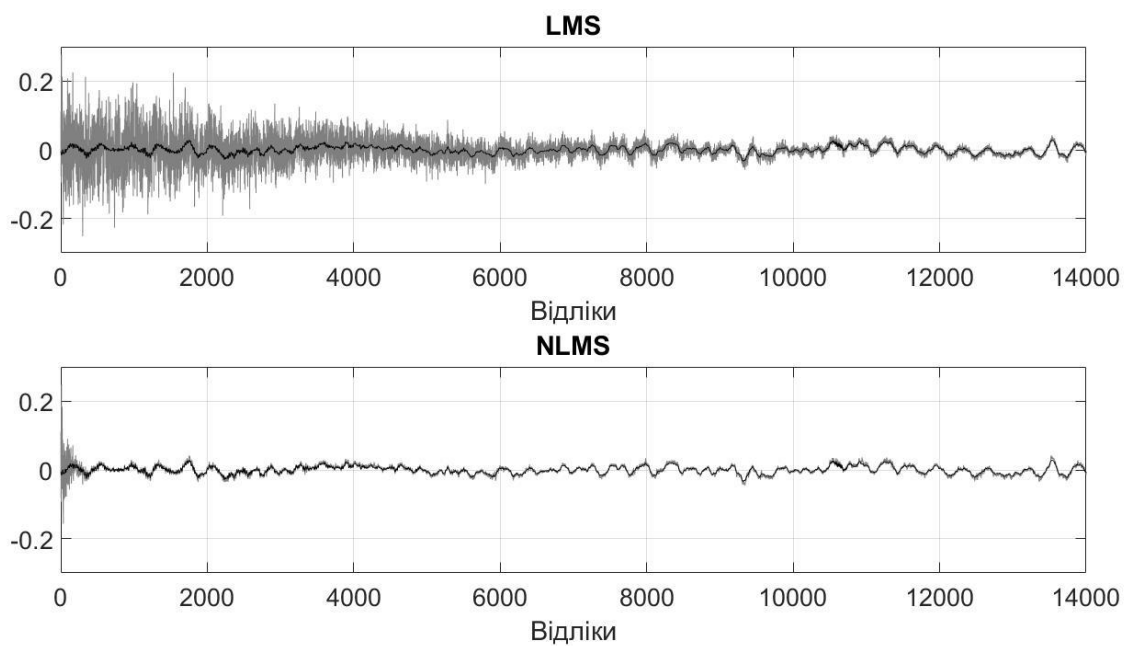
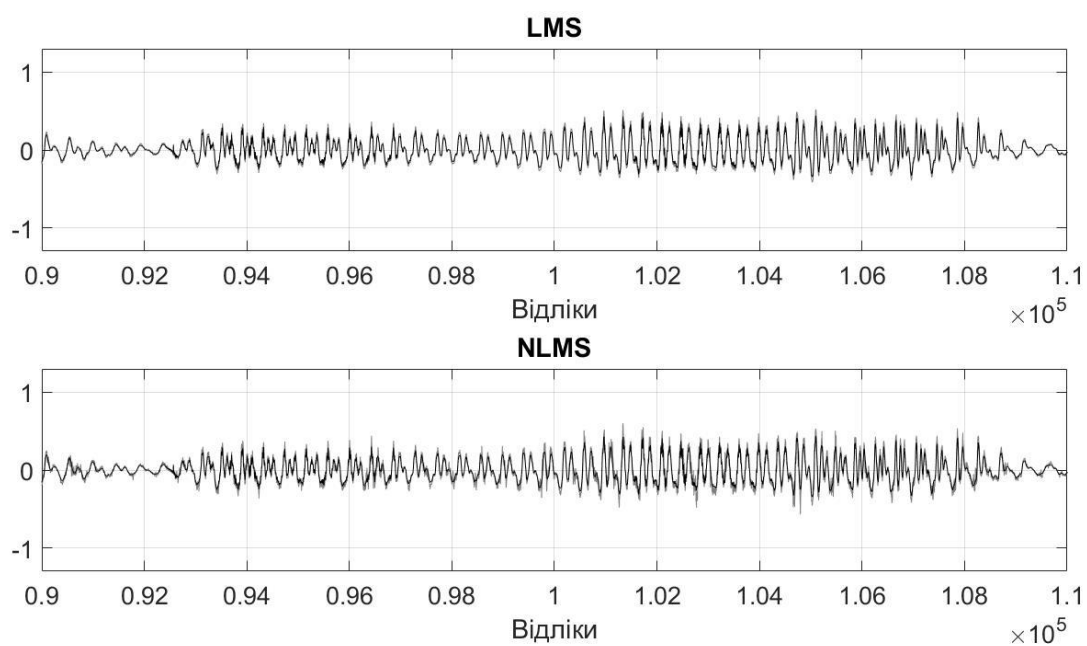


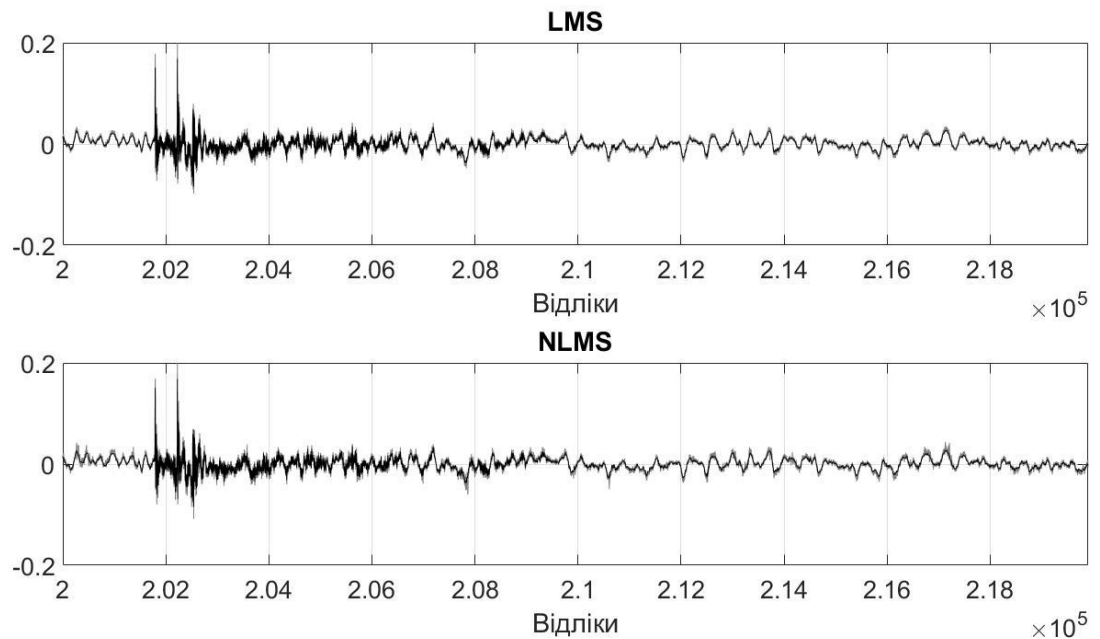
Рисунок 4.14 – Вхідний/Вихідний сигнали з використанням алгоритму NLMS



a)



б)



в)

Рисунок 4.15 – Еталонний вихідний сигнали з використанням алгоритмів LMS та NLMS (а – початок сигналу, б – середина сигналу, в – кінцева частина сигналу)

4.7 Рекомендації щодо використання алгоритмів для захисту інформації

Аналіз результатів роботи алгоритмів LMS та NLMS для задач зниження сторонніх шумів мовних сигналів дозволяє сформулювати наступні рекомендації щодо використання даних алгоритмів.

1. Алгоритми LMS та NLMS дозволяють отримати відмінні результати щодо шумозаглушення в діапазоні відстаней між мікрофонами 2 – 4 см.
2. Якщо вимоги до апаратної частини потребують мінімальні затрати на об'єм пам'яті і швидкість обробки, то пріоритет необхідно віддати LMS алгоритму, оскільки він потребує менш операцій, ніж NLMS.

3. Результируючі сигнали помилок після обробки з використанням NLMS алгоритму є більш переконливими, ніж сигнали після LMS обробки.
4. Аналіз літератури показує, що існуючі луна-детектори показують кращі результати при використанні NLMS алгоритму.
5. При розробці стаціонарних систем боротьби з луною та шумом (аутентифікація у приміщеннях) необхідно отримати імпульсну характеристику конкретного приміщення. Оскільки акустична характеристика різних приміщень неоднакова, вона характеризується спектральним спадом, реверберацією. Характеристики приміщення необхідно враховувати при настройці фільтру.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто роботу подвійної мікрофонної системи (DMS) для голосової аутентифікації при умовах зміни відстані між двома мікрофонами. Для більшої гнучкості та надійності використовуємо два всеспрямовані мікрофони. Для видалення шуму використовуємо адаптивний фільтр з двома адаптивними алгоритмами LMS та NLMS.

Алгоритми вибрані з врахуванням продуктивності: найменших затрат на обчислювальні потужності. Порівняння алгоритмів відбувалось при умовах зміни відстані між мікрофонами. При цьому оцінювалося покращення відношення сигнал/шум (SNRI).

Аналіз результатів моделювання показав, що середній SNRI як для LMS, так і для NLMS зменшується із збільшенням відстані між двома мікрофонами, але винятком є випадки, коли відстань дорівнює нулю за допомогою алгоритму LMS. Максимальний SNRI виявляється, коли відстань становить 2 см. Для кращого результату в цій системі рекомендована відстань до 4 см. Тобто для отримання відмінних результатів щодо шумозаглушення необхідно вибирати відстань між мікрофона в діапазоні 2 – 4 см. SNRI є кращим, коли загасання для мікрофона #2 вище.

Обидва алгоритми можуть дати нам майже однакове поліпшення мовного сигналу. Отже, на вибір впливає вимоги до витрат, надійності та часу збіжності фільтру.

Побудована модель обробки працює в автономному режимі, але її можна реалізувати в реальному часі. Модель можна розширити за допомогою інших алгоритмів, наприклад, RLS та LLMS з різним шумним середовищем, а також детектором луни з можливістю адаптації під приміщення.

У роботі якість поліпшення мовлення не перевищує 18 дБ, що, також, потребує подальшого вдосконалення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Islam A. Comparing Dual Microphone System with Different Adaptive Algorithms. Karlskrona: Blekinge Institute of Technology, 2013. 53 p.
2. Benesty J., Sondhi M. M., Huang Y. Springer Handbook of Speech Processing. Berlin: Springer, 2008. 1176 p.
3. Rabiner L. R., Schafer R. W. Theory and Applications of Digital Speech Processing. Upper Saddle River: Pearson, 2011. 1056 p.
4. Benesty J., Makino S., Chen J. Speech Enhancement. Berlin: Springer, 2005. 117 p.
5. Brandstein M., Ward D. Microphone Arrays: Signal Processing Techniques and Applications. Berlin: Springer, 2001. 398 p.
6. Vary P., Martin R. Digital Speech Transmission: Enhancement, Coding and Error Concealment. Chichester: Wiley, 2006. 644 p.
7. Haykin S., Chen Z. The cocktail party problem. Neural Computation. 2005. Vol. 17, No. 9. P. 1875–1902.
8. Vaseghi S. V. Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction. 4th ed. Chichester: Wiley, 2008. 544 p.
9. Proakis J. G., Manolakis D. G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications. 4th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2007. 1104 p.
10. Oppenheim A. V., Schafer R. W. Discrete-Time Signal Processing. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson, 2010. 1120 p.
11. Beranek L. L., Mellow T. J. Acoustics: Sound Fields and Transducers. Oxford: Academic Press, 2012. 728 p.
12. Kay S. M. Fundamentals of Statistical Signal Processing. Vol. 1: Estimation Theory. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1993. 595 p.
13. Loizou P. C. Speech Enhancement: Theory and Practice. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. 711 p.
14. Benesty J., Chen J., Huang Y. Microphone Array Signal Processing. Berlin: Springer, 2008. 240 p.

15. Scalart P., Filho J. V. Speech enhancement based on a priori signal to noise estimation. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Atlanta, 1996. P. 629–632.
16. Lim J. S., Oppenheim A. V. Enhancement and bandwidth compression of noisy speech. Proceedings of the IEEE. 1979. Vol. 67, No. 12. P. 1586–1604.
17. Berouti M., Schwartz R., Makhoul J. Enhancement of speech corrupted by acoustic noise. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Washington, 1979. P. 208–211.
18. Ephraim Y., Malah D. Speech enhancement using a minimum mean-square error short-time spectral amplitude estimator. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1984. Vol. 32, No. 6. P. 1109–1121.
19. Elliott S. J., Nelson P. A. Active noise control. IEEE Signal Processing Magazine. 1993. Vol. 10, No. 4. P. 12–35.
20. Hyvärinen A., Karhunen J., Oja E. Independent Component Analysis. New York: Wiley, 2001. 504 p.
21. Van Trees H. L. Optimum Array Processing. Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory. New York: Wiley, 2002. 1470 p.
22. Griffiths L. J., Jim C. W. An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1982. Vol. 30, No. 1. P. 27–34.
23. Haykin S. Adaptive Filter Theory. 5th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2014. 912 p.
24. Elko G. W., Pong A.-T. N. A simple adaptive first-order differential microphone. Proceedings of IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics. New Paltz, 1995. P. 169–172.
25. Benesty J., Morgan D. R., Sondhi M. M. A better understanding and an improved solution to the specific problems of stereophonic acoustic echo cancellation. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing. 1998. Vol. 6, No. 2. P. 156–165.

26. Yousefian N., Loizou P. C. A dual-microphone speech enhancement algorithm based on the coherence function. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*. 2011. Vol. 19, No. 4. P. 1–13.
27. Widrow B., Glover J. R., McCool J. M., Kaunitz J., Williams C. S., Hearn R. H., Zeidler J. R., Dong E., Goodlin R. C. Adaptive noise cancelling: principles and applications. *Proceedings of the IEEE*. 1975. Vol. 63, No. 12. P. 1692–1716.
28. Kuo S. M., Morgan D. R. *Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*. New York: Wiley, 1996. 400 p.
29. Mitra S. K. *Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2011. 940 p.
30. Smith S. W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. San Diego: California Technical Publishing, 1997. 650 p.
31. Sayed A. H. *Adaptive Filters*. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2008. 824 p.
32. Widrow B., Stearns S. D. *Adaptive Signal Processing*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1985. 474 p.
33. Diniz P. S. R. *Adaptive Filtering: Algorithms and Practical Implementation*. 4th ed. New York: Springer, 2013. 652 p.
34. Farhang-Boroujeny B. *Adaptive Filters: Theory and Applications*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2013. 800 p.

ДОДАТКИ

Кваліфікаційна робота здобувача освітнього ступеня «Магістр»

ЗАХИСТ ТЕХНІЧНОГО КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ АКУСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ СИГНАЛАМИ ЗІ СКЛАДНИМ СПЕКТРОМ

Спеціальність: 125 - Кібербезпека та захист інформації

Виконав: Михайло ВЕТОХА

Керівник: к.т.н., доц. Юрій ПЕПА

Київ - 2025

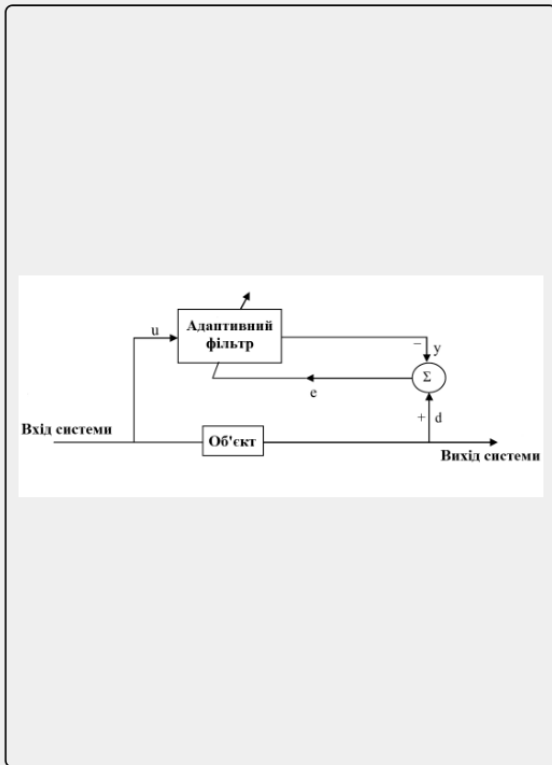
АКТУАЛЬНІСТЬ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

2

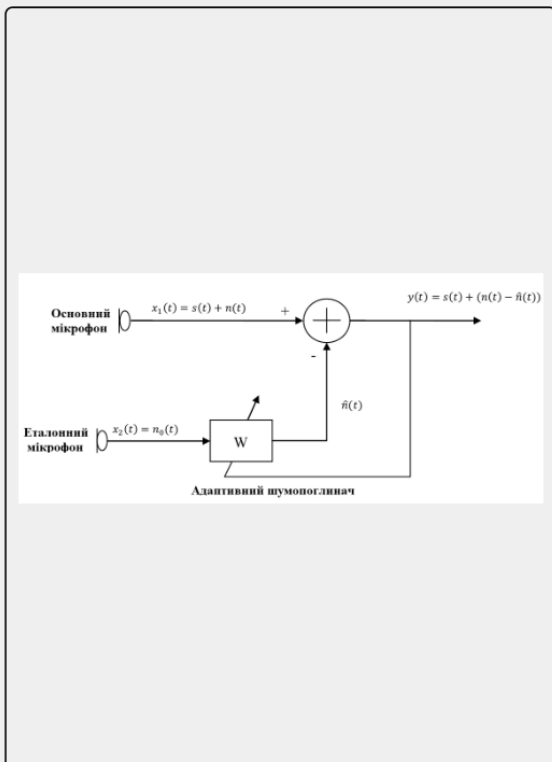
- Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення якості мовного сигналу в технічних системах передавання та обробки акустичної інформації.
- Об'єкт дослідження - технічний канал передачі акустичної інформації та процеси шумозаглушення мовного сигналу.
- Предмет дослідження - методи та алгоритми адаптивної фільтрації у подвійній мікрофонній системі.
- Мета роботи - дослідити можливості зменшення шуму і луни у вхідному мовному сигналі без втрати якості корисного сигналу.
- Завдання: проаналізувати шумоподібні сигнали, дослідити DMS-систему, розглянути LMS/NLMS/LLMS/RLMS та виконати моделювання сигналів зі складним спектром.

- У першому розділі розглянуто методи шумозаглушення у мікрофонних системах та особливості шумоподібних сигналів.
- У другому розділі досліджено алгоритми шумозаглушення для подвійної мікрофонної системи.
- У третьому розділі проаналізовано основні адаптивні алгоритми: LMS, NLMS, LLMS та RLMS.
- У четвертому розділі виконано моделювання сигналів зі складним спектром і оцінено якість фільтрації за SNR та SNRI.
- Практичний результат - рекомендації щодо використання алгоритмів шумозаглушення для захисту мовної інформації.

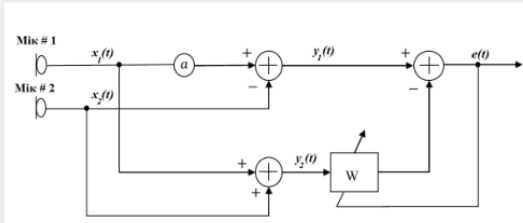
- Фоновий шум формується транспортом, натовпом, обладнанням та атмосферними джерелами і погіршує розбірливість мовлення.
- Лепет є складним типом шуму через подібність до мовного сигналу та нестационарну структуру.
- Імпульсний шум виникає у вигляді коротких різких завад і може бути пов'язаний з електромагнітними впливами або дефектами запису.
- Кольорові шуми мають різний розподіл спектральної щільності потужності та потребують різних методів фільтрації.
- Адитивні та неадитивні шуми по-різному впливають на математичну модель каналу передавання акустичної інформації.



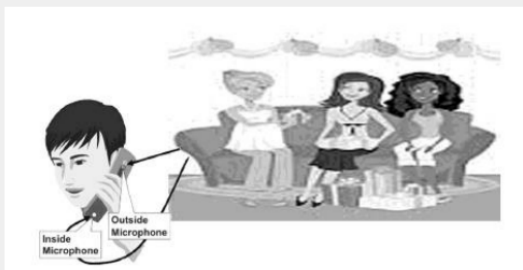
- Адаптивний фільтр змінює свої коефіцієнти відповідно до характеристик сигналу та завади.
- Основні режими застосування: ідентифікація, зворотне моделювання, прогнозування та придушення перешкод.
- Для задачі захисту акустичної інформації найбільш важливим є режим придушення перешкод.



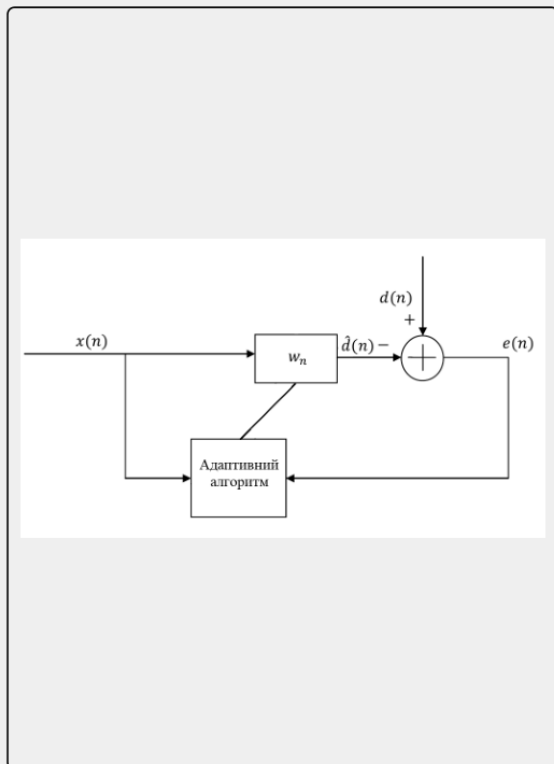
- DMS використовує основний і еталонний мікрофони для відокремлення корисного мовного сигналу від шумової складової.
- Еталонний канал подає шум на адаптивний фільтр, після чого оцінений шум віднімається від основного сигналу.
- Результатом є сигнал помилки, який наближається до очищеного мовного сигналу.



- Мікрофон №1 приймає корисний мовний сигнал разом із шумом.
- Мікрофон №2 використовується як еталонний канал, що містить переважно шумову складову.
- Адаптивний фільтр ітераційно змінює вагові коефіцієнти для мінімізації шуму на виході системи.

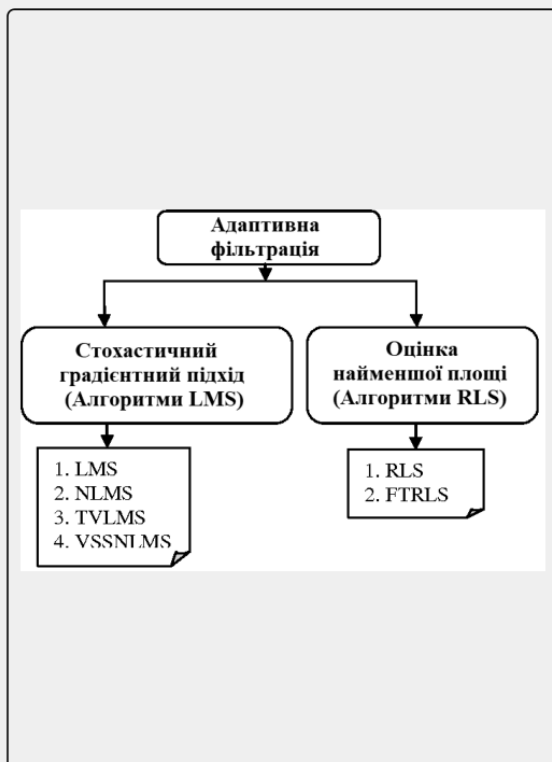


- У реальному середовищі мікрофони приймають різні співвідношення голосового сигналу та перехресного шуму.
- Розташування мікрофонів визначає рівень ослаблення шуму та ефективність фільтрації.
- Система орієнтована на отримання безшумного сигналу з основного мікрофона.

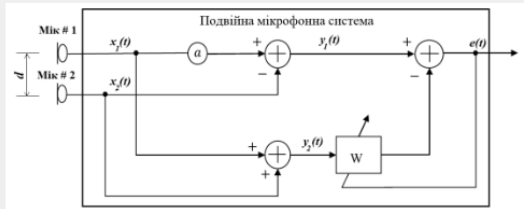


- Адаптивний фільтр порівнює бажаний сигнал із вихідним сигналом фільтра та формує помилку.
- Критерієм роботи є мінімізація середньоквадратичної похибки.
- Найчастіше використовують FIR-структури, оскільки вони простіші, стабільніші та придатні до цифрової реалізації.

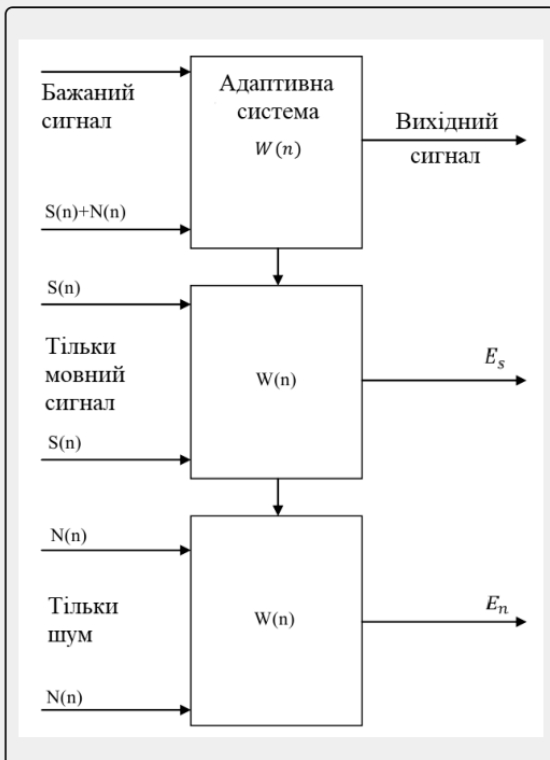
ОСНОВНІ АЛГОРИТМИ АДАПТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ



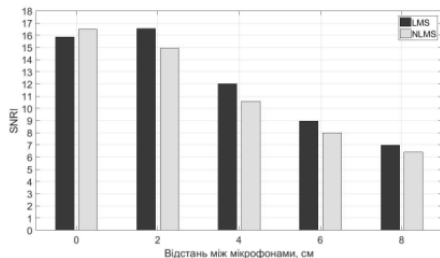
- LMS є базовим алгоритмом із простою реалізацією та невисокою обчислювальною складністю.
- NLMS нормалізує крок адаптації та краще працює при зміні рівня вхідного сигналу.
- LLMS вводить витік коефіцієнтів, а RLMS/RLS забезпечує швидшу збіжність за рахунок більшої складності.



- Моделювання виконується для двох мікрофонів, основного та еталонного каналів.
- У модель вводяться голосовий сигнал, шумова складова, коефіцієнти ослаблення та адаптивний фільтр.
- Метою моделі є кількісна оцінка поліпшення SNR після застосування алгоритмів шумозаглушення.

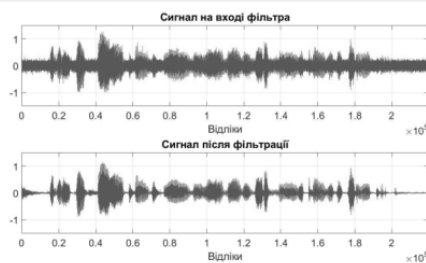


- SNR характеризує співвідношення потужності корисного сигналу до потужності шуму.
- SNRI показує приріст відношення сигнал/шум після фільтрації.
- Порівняння LMS і NLMS виконується для різних відстаней між мікрофонами, рівнів ослаблення та вхідних SNR.



- Графіки моделювання демонструють залежність SNRI від вхідного SNR та відстані між мікрофонами.
- Зі збільшенням відстані між мікрофонами змінюється ефективність віднімання шуму.
- NLMS у низці режимів забезпечує стабільнішу адаптацію, тоді як LMS простіший для реалізації.

ПІДСУМКОВІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАХИСТУ АКУСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ



- Для систем передавання мовної інформації доцільно застосовувати DMS із адаптивною фільтрацією.
- Вибір алгоритму має враховувати необхідну якість фільтрації, обчислювальні ресурси та стабільність збіжності.
- Для практичних систем рекомендовано використовувати NLMS при змінному рівні сигналу та LMS для простих реалізацій.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

Доповідь підготував здобувач вищої освіти Михайло ВЕТОХА
Тема: «Захист технічного каналу передачі акустичної інформації»

Київ - 2025