

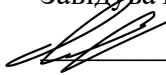
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоінженерії

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Сергій ЛІТВІНЦЕВ

«16» 06 2025 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра за освітньою програмою

«Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Завади, шуми, спотворення та методи компенсації їх впливу на
сприйняття мовлення у голосовому режимі зв'язку»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи PI-11

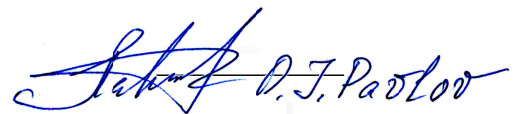
Китайко Максим Віталійович



Керівник:

Старший викладач кафедри радіоінженерії

Павлов Олег Ігорович

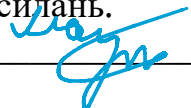


Рецензент:

Старший Викладач кафедри радіотехнічних систем

Товкач Ігор Олегович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) 

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіоінженерії

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Сергій ЛІТВИНЦЕВ

«14» 04 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Китайку Максиму Віталійовичу

1. Тема роботи «Завади, шуми, спотворення та методи компенсації їх впливу на сприйняття мовлення у голосовому режимі зв'язку», керівник роботи Старший викладач Павлов Олег Ігорович затверджені наказом по університету від «29» травня 2025 р. № 1840
2. Термін подання студентом роботи 16 червня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: аудіо сигнал зі частотою 48,16 кГц
SNR 0,10,20,30 , база шумів\завад; середовище розробки MATLAB
4. Зміст роботи: 1. Актуальність, 2. Поставлення задачі, 3. Огляд існуючих алгоритмів адаптивних фільтрів, та їх вибір для дослідження, 4. Огляд існуючих метрик якості голосового сигналу, та їх вибірка для дослідження, 5 Аналіз наявних спотворень від шумів, та завад, 6. Розглянути фільтрацію спотворень шумів та завад, 7. Визначити доцільність використання адаптивних фільтрів у суміші зі впливом шумів\завад, 8. Висновки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) Результати досліджень, Осцилограми, Спектрограми, Діаграми, Таблиці; Додаток А, Додаток Б, Додаток В, Додаток Г, Додаток Д, Додаток Ж, Додаток З, Презентація

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 01 жовтня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Затвердження теми роботи	01.11.2024	Виконано
2	Аналіз задачі, та розробка плану	02.11.2024-15.12.2024	Виконано
3	Додавання адаптивних фільтрів	16.12.2024-31.01.2025	Виконано
4	Підключення алгоритмів оцінювання якості сприйняття мовлення	02.02.2025-09.03.2025	Виконано
5	Програмна розробка керування алгоритмами, та виводу у вигляді таблиці.	10.03.2025-15.04.2025	Виконано
6	Додавання алгоритму створення суміші: опорний сигнал + шум	16.04.2025-18.04.2025	Виконано
7	Додавання нестандартних шумів для дослідження	19.04.2025	Виконано
8	Проведення дослідження	20.04.2025-10.05.2025	Виконано
9	Висновки по дослідженню	11.05.2025-18.05.2025	Виконано
10	Оформлення пояснювальної записки, та презентації	18.05.2025-16.06.2025	

Студент _____ Максим КИТАЙКО

Керівник _____ О.І. ПАРВЛОВ



АНОТАЦІЯ

Дипломна робота «Завади, шуми, спотворення та методи компенсації їх впливу на сприйняття мовлення у голосовому режимі зв'язку» складається з презентації та пояснювальної записки обсягом 52 сторінки, 36 рисунків, 4 таблиці, 7 додатків, та 14 бібліографічних джерел.

Об'єкт дослідження – цифрова обробка голосового сигналу в умовах дії завад та шумів.

Предмет дослідження – адаптивні алгоритми компенсації впливу завад до голосового сигналу.

Метою роботи є аналіз впливу завад, шумів, спотворень у голосовому режимі зв'язку з використанням метрик оцінки сприйняття мовлення PESQ, HASQI, та практичне реалізація методів компенсування впливу завдяки адаптивним фільтрам. Проведення експериментальних дослідів ефективності та покращення, беручи до уваги швидкість компенсації та якості відновленого сигналу та формування висновків на основі алгоритмів фільтрації LMS, RLS, Volterra LMS, Blind Sato, Blind Godart, Kalman.

Ключові слова: Адаптивна обробка сигналів, Покращення мовлення, Алгоритм LMS, Алгоритм RLS, Алгоритм Вольтера LMS, Сліпий алгоритм Сато, Сліпий алгоритм Годарта, Фільтр Калмана, PESQ, HASQI, Оцінка якості мовлення, Шуми, Цифрове відновлення аудіо.

ABSTRACT

The thesis “Interference, noise, distortion, and methods compensating their impact on speech perception in voice communication” consists of the presentation and explanatory note comprising of 52 pages, 36 figures, 4 tables, 7 appendices, and 14 bibliographic references.

Object of the study – digital speech signal processing under the impact of interferences and noise.

Subject of the study – adaptive algorithms for compensating the impact of interferences on the speech signal.

The aim of the thesis is to analyze the influence of interferences, noise, and distortions in voice communication using speech perception metrics such as PESQ and HASQI, and to implement practical compensation methods using adaptive filters. Experimental studies were carried out to evaluate effectiveness and improvement, taking into account the adaptation speed, the quality of the restored signal, and drawing conclusions based on the filtering algorithms: LMS, RLS, Volterra LMS, Blind Sato, Blind Godart, Kalman.

Keywords: Adaptive Signal Processing, Speech Enhancement, LMS Algorithm, RLS Algorithm, Volterra LMS Algorithm, Blind Algorithm Sato, Blind Algorithm Godart, Kalman Filter, PESQ, HASQI, Voice Quality Assessment, Noise, Digital Audio Restoration.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи

на тему: «Завади, шуми, спотворення та методи компенсації їх впливу
на сприйняття мовлення у голосовому режимі зв'язку»

Київ – 2025 року

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ. 1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ФІЛЬТРАЦІЇ МОВЛЕННЯ В УМОВАХ ЗАВАД.....	10
1.1. Адаптивна фільтрація мовлення в умовах завад.....	10
1.2. Адаптивні фільтри.....	11
1.3. Характеристика завад та шумів у голосовому сигналі.....	19
1.4. Метрики оцінювання якості мовлення.....	21
1.5. Висновки до Розділу 1.....	21
РОЗДІЛ. 2 АНАЛІЗ КОМПЕНСАЦІЇ ЗАВАД АДАПТИВНИМИ ФІЛЬТРАМИ.....	22
2.1. Постановка завдання аналізу.....	22
2.2. Параметри адаптивних фільтрів.....	23
2.3. Розгляд послідовності фільтрації.....	24
2.4. Оцінка графічного виводу компенсації.....	29
2.4.1. Аналіз впливу завад на послаблення.....	34
2.4.2. Оцінка швидкодії.....	34
2.5. Висновки до Розділу 2.....	35
РОЗДІЛ 3 Модифікація адаптивних алгоритмів.....	37
3.1. Сегментованість вхідного сигналу.....	37
3.2. Постановка дослідження при сегментації сигналу	38
3.3. Параметри MLS алгоритму.....	39
3.4. Оцінка графічного виводу модифікованого методу компенсування завад.....	39
3.4.1. Оцінка швидкодії модифікації.....	41
3.5. Висновки до Розділу 3.....	41

ВИСНОВКИ.....	42
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	43
Додаток А.....	46
Додаток Б.....	47
Додаток В.....	48
Додаток Г.....	49
Додаток Д.....	50
Додаток Ж.....	51
Додаток З.....	52

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

SNR	Signal-to-Noise Ratio
MSE	Mean Squared Error
PESQ	Perceptual Evaluation of Speech Quality
HASQI	Hearing Aid Speech Quality Index
LMS	Least Mean Squares
RLS	Recursive Least Squares
GPU	Graphics Processing Unit

ВСТУП

У сучасній телекомунікаційній галузі передача голосової інформації займає важливе місце. Можливості застосування мовленнєвих сигналів в системах голосового зв'язку типу «людина – машина», таких, як голосові помічники чи системи керування, та в системах типу «людина – людина», таких, як телефонія, відеозв'язок тощо, на пряму залежать від якості сигналу, який обробляється та передається у складних акустичних умовах. На якість такого сигналу можуть суттєво впливати різні типи шумів, які виникають штучно, або різного походження

Адаптивні фільтри, які розглянуть в цій роботі можуть автоматично підлаштовуватися під зміну шумового середовища, на відмінну від стаціонарних, це робить адаптивну фільтрацію актуальним напрямком для дослідження, особливо при впливі непостійних або складно передбачуваних завад.

У цій роботі розглядається ефективність різних адаптивних алгоритмів фільтрації, таких як LMS, RLS, Volterra LMS, сліпих методів Blind Sato та Blind Godart, та Kalman, у контексті покращення мовлення в умовах різних завад. Алгоритми тестуються в середовищах з різними шумовими профілями та оцінюються за допомогою метрик якості мовлення PESQ та HASQI. Особлива увага приділяється здатності фільтрів швидко адаптуватися до змін середовища, якості пригнічення шуму та загальній стабільності їх роботи, та розгляду рішень їх покращення.

Метою цього дослідження є аналіз впливу акустичних завад на голосовий сигнал, перевірка можливості його відновлення за допомогою адаптивної фільтрації, а також оцінка ефективності використаних підходів.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ФІЛЬТРАЦІЇ МОВЛЕННЯ В УМОВАХ ЗАВАД

У сучасних умовах цифрового зв'язку обробка голосового сигналу стикається з численними викликами, пов'язаними з впливом зовнішніх завад, динамічного фону, акустичних спотворень та змін у характеристиках середовища передачі. У таких ситуаціях важливо забезпечити збереження інформативності, зрозумілості та якості мовлення, що є критично важливим як для людського спілкування, так і для взаємодії з автоматизованими системами.

Адаптивна фільтрація відіграє ключову роль у вирішенні цього завдання. Завдяки здатності підлаштовуватись до змінних умов, такі фільтри є гнучкими інструментами для придушення шумів та компенсації спотворень. Їхня ефективність значною мірою залежить від природи перешкод, алгоритмічної реалізації фільтра та здатності системи оцінити результат.

Цей розділ висвітлює теоретичні основи сучасних підходів до фільтрації мовлення в умовах завад, включаючи адаптивні алгоритми, характеристику основних типів шумів та методи оцінювання якості обробленого сигналу.

1.1. Адаптивна фільтрація мовлення в умовах завад

Одним із найефективніших методів обробки мовлення у присутності шумів є адаптивна фільтрація. На відміну від фіксованих (стаціонарних) фільтрів, які застосовують незмінні коефіцієнти незалежно від середовища, адаптивні фільтри здатні змінювати свою структуру в реальному часі. Це дає змогу підлаштовуватись до змін у характеристиках завад, акустичного середовища чи самого мовного сигналу.

Застосування адаптивних фільтрів особливо доцільне у випадках, коли точна модель перешкод невідома або шумова обстановка змінюється

1.2. Адаптивні фільтри

Адаптивний фільтр — це цифрова система, яка вдосконалюється у процесі роботи. Він має два основних входи: сигнал, що містить мовлення разом із завадами, та додаткову інформацію (опорний або синтезований сигнал), яка допомагає скоригувати поточні налаштування фільтра. Основна мета — мінімізувати похибку між бажаним (очищеним) сигналом і поточним виходом фільтра.

Кожен новий фрагмент вхідного сигналу аналізується: фільтр генерує вихід, порівнює його з еталоном, і якщо результат невдалий — змінює ваги, для зменшення помилки. Таким чином, система постійно вдосконалює себе, що і дозволяє їй адаптуватися до шумів, які змінюються з часом.

Адаптивні фільтри становлять важливу складову в обробці голосового сигналу, зокрема в ситуаціях, де характеристики шуму змінюються з часом або є недостатньо визначеними. Їхня здатність модифікувати власні параметри в процесі роботи забезпечує ефективність в умовах нестабільного або непередбачуваного середовища.

Перший адаптивний фільтр

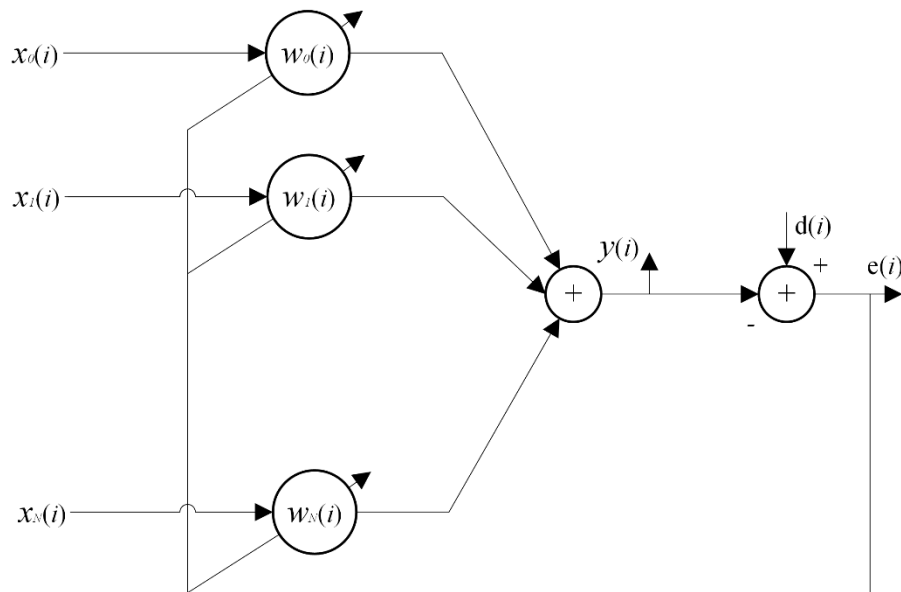


Рисунок 1.2.1 – Блок-схема лінійного комбінатора

Адаптивні фільтри беруть свій початок із Winners filter [11] (фільтра Вінера), який був запропонований Норбертом Вінером у 1940-х роках як оптимальний лінійний фільтр (рис.1.2.1) для відновлення сигналу з шумового середовища на основі мінімізації середньоквадратичної помилки (MSE) (1). Саме підхід Вінера заклав математичну основу для більшості сучасних алгоритмів фільтрації, зокрема для тих, що застосовуються у цифровій обробці сигналів.

$$MSE = E[|e(i)|^2] \quad (1),$$

де $e(i)$ – похибка між опорним сигналом $d(i)$ та виводом фільтру $y(i)$

$$e(i) = d(i) - y(i) \quad (2)$$

Попри свою теоретичну досконалість, фільтр, вимагає апріорного знання статистичних властивостей сигналу та шуму, що обмежує його застосування в умовах, реальному часі. Цей недолік і став рушієм розвитку адаптивних фільтрів, здатних оновлювати свої параметри в процесі роботи, без потреби у повній статистичній інформації.

Одними з прикладами адаптивної фільтрації є:

- LMS [3] [5] – найменших середніх квадратів, блок схема наведена на рис. 1.2.2.

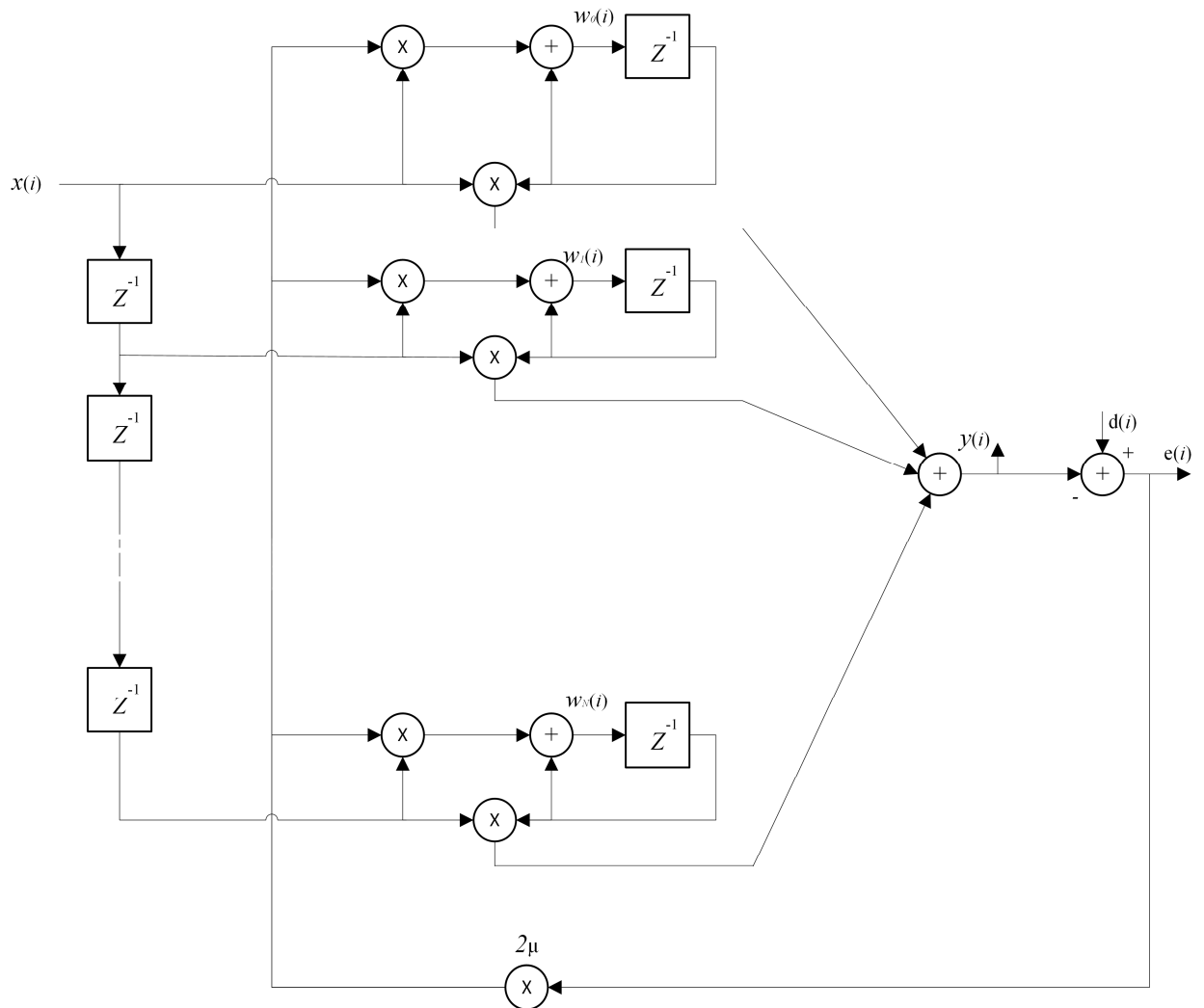


Рисунок 1.2.2 – блок-схема LMS

- RLS [4][5] – рекурсивний метод найменших квадратів, блок-схема наведена на рис. 1.2.3.

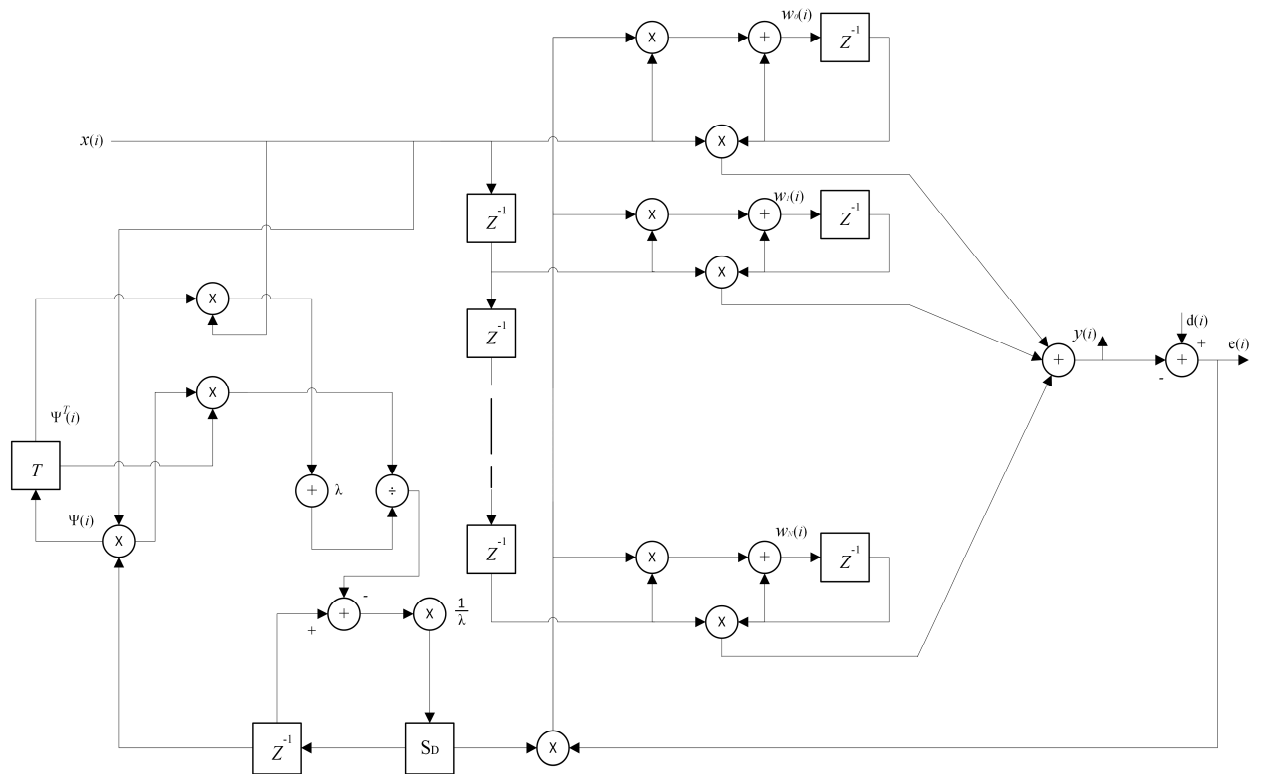


Рисунок 1.2.3 – блок-схема RLS

- Volterra LMS [6] модифікація LMS з використанням ряду Вольтера , блок-схема наведена на рис. 1.2.4.

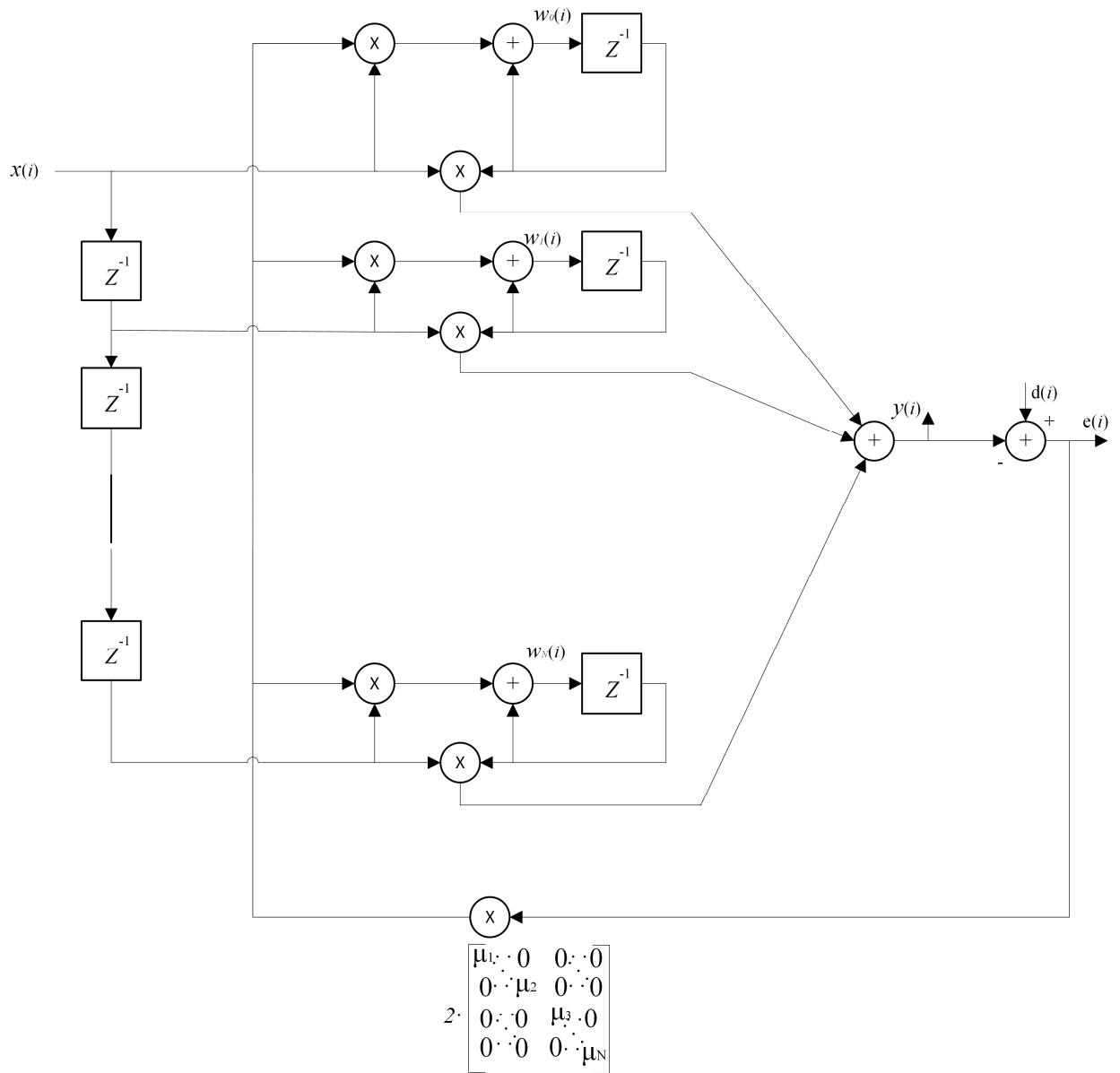


Рисунок 1.2.4 – блок-схема Volterra LMS

- Blind Godart [7] – сліпий адаптивний фільтр на основі алгоритму Годарта, блок-схема наведена на рис. 1.2.5.

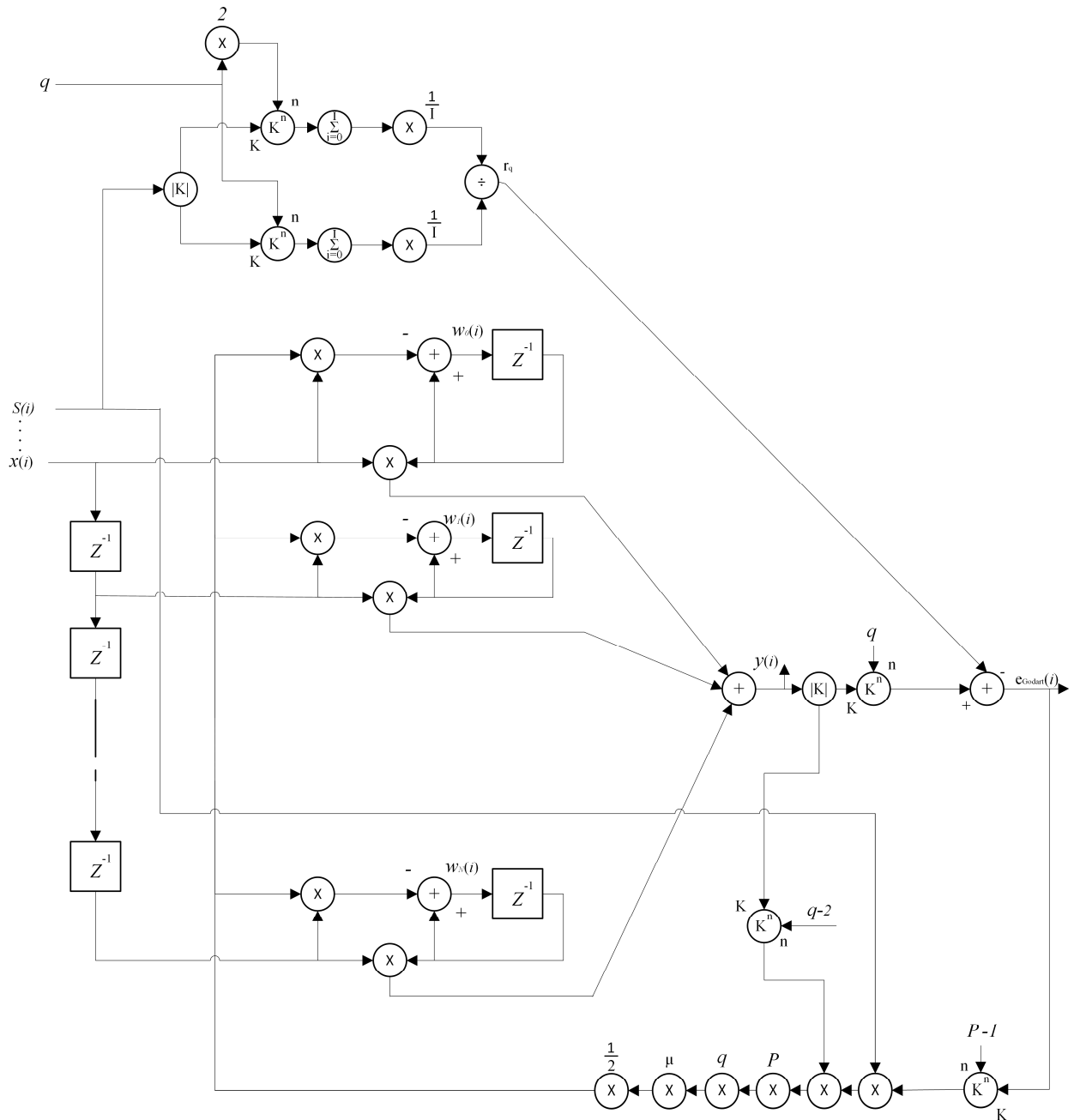


Рисунок 1.2.5 – блок-схема Blind Godart

- Blind Sato [8] – модифікований сліпий фільтр Сато, на рис.1.2.6.

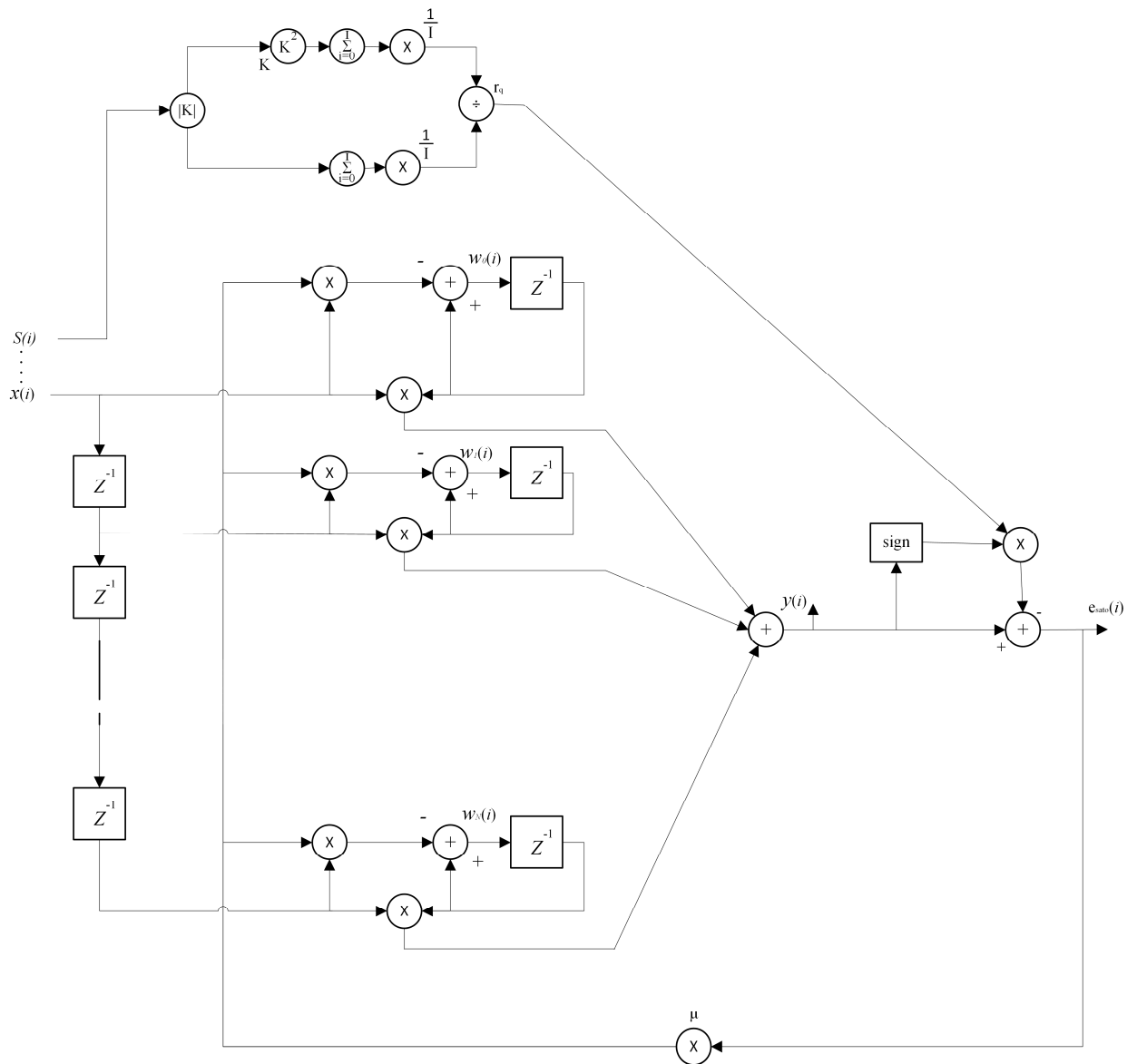


Рисунок 1.2.6 – блок-схема Blind Sato

- Kalman [9] [10] -фільтр калмана, на рис 1.2.7.

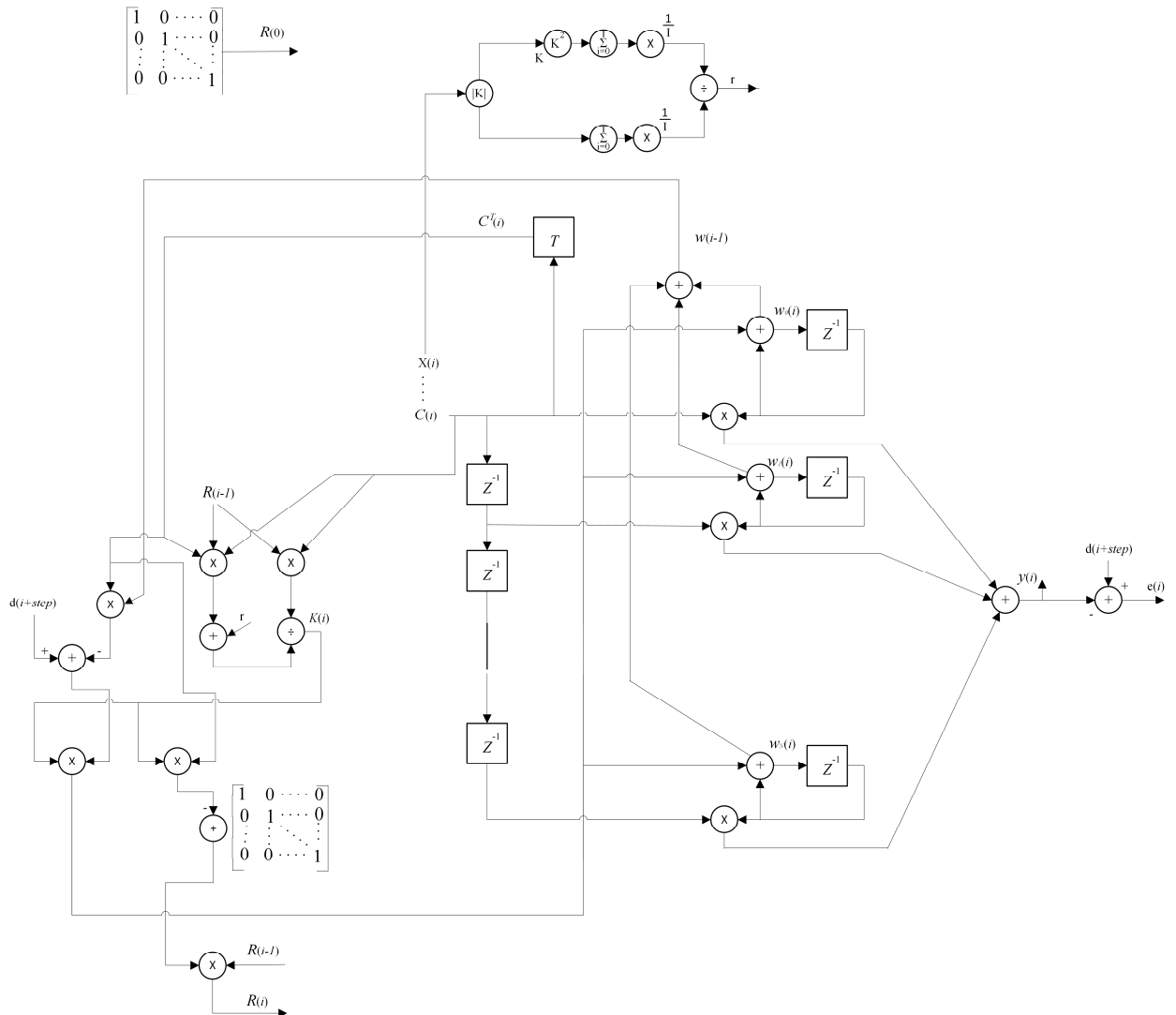


Рисунок 1.2.7 – блок-схема Blind Kalman

Переваги адаптивних фільтрів:

- Автоматична налаштованість, адаптація відбувається у реальному часі.
- Універсальність, можуть застосовуватись у широкому спектрі задач, включаючи компенсацію акустичних шумів, усунення ехо, підсилення мовлення в слухових апаратах тощо.
- Можливість апаратної та програмної реалізації.

Обмеження адаптивних фільтрів:

- Потреба у тренувальному процесі, на початкових етапах адаптації якість фільтрації може бути незадовільною.

- Обмеження за швидкістю збіжності: деякі алгоритми потребують значної кількості ітерацій для досягнення стійкого результату.
- Залежність від вибору параметрів адаптації.

1.3. Характеристика завад та шумів у голосовому сигналі

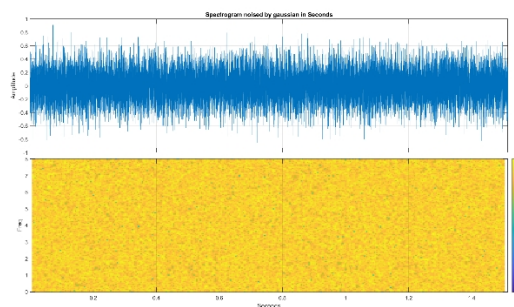
Акустичні завади відіграють ключову роль у спотворенні голосового сигналу. Для коректного тестування адаптивних фільтрів необхідно зрозуміти природу, джерела та характеристики шумів, які зустрічаються в типових сценаріях голосового зв'язку.

Класифікувати шуми ми можемо за:

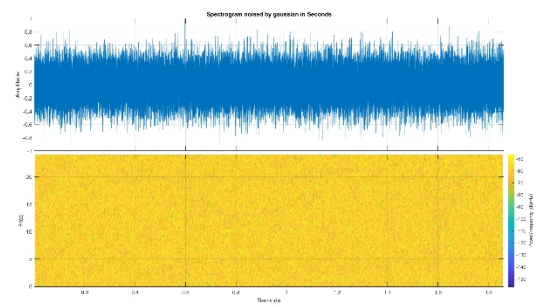
- Спектральною характеристикою (Гауссівський, білий)
- За часовою характеристикою (Стаціонарний, нестаціонарний)
- За джерелом походження (фоновий шум середовища, електронний шум)

Сценарії використання шумів у аналізі:

1. Гауссівський шум – використовується для контролю адаптації, як тестовий сигнал із нормальною розподіленою потужністю (рис. 1.3.1).
2. Гучна розмова – людські голоси, не стаціонарний (рис. 1.3.2).
3. Вуличний Шум – гавкіт, і галас, не стаціонарний (рис. 1.3.3).
4. Будівельна зона – стаціонарний, фоновий шум середовища (рис. 1.3.4).
5. Шосе – нестаціонарний, фоновий шум середовища (рис. 1.3.5).

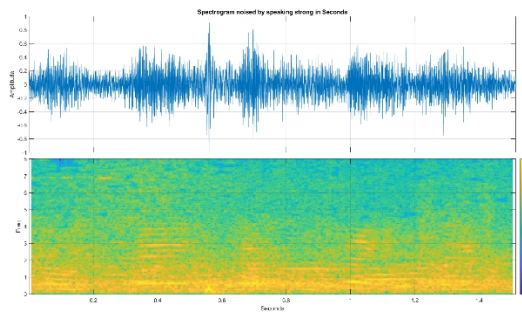


а)

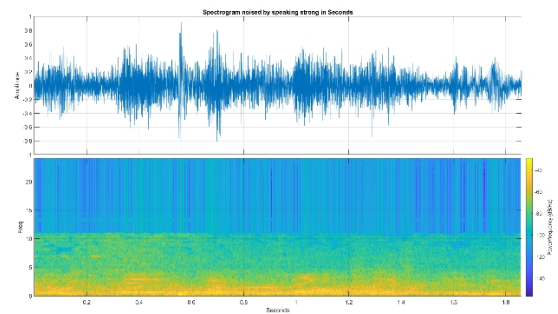


б)

Рисунок 1.3.1 – осцилограма, та спектрограма гауссівського шуму у середовищі MATLAB при дискретизації: а) 16кГц, б) 48 кГц

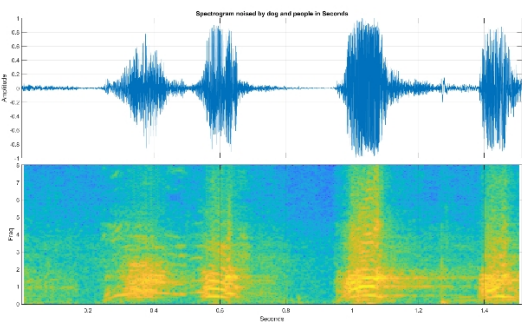


а)

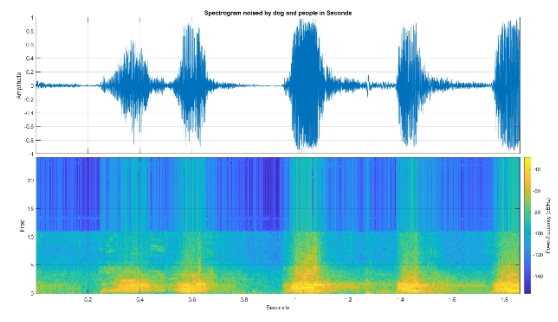


б)

Рисунок 1.3.2 – осцилограма, та спектрограма гучної розмови у середовищі MATLAB при дискретизації: а) 16кГц, б) 48 кГц

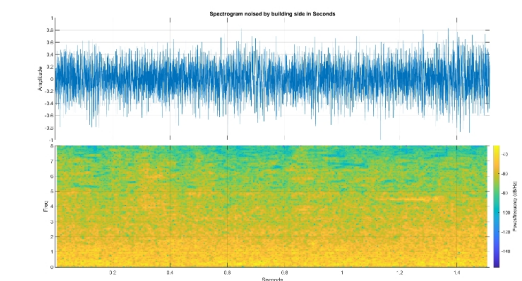


а)

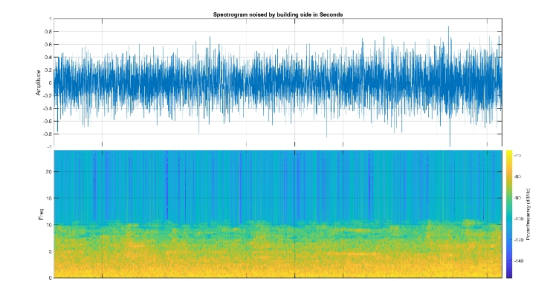


б)

Рисунок 1.3.3 – осцилограма, та спектрограма вуличний шум у середовищі MATLAB при дискретизації: а) 16кГц, б) 48 кГц

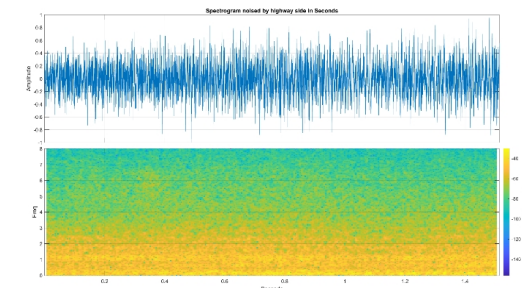


а)

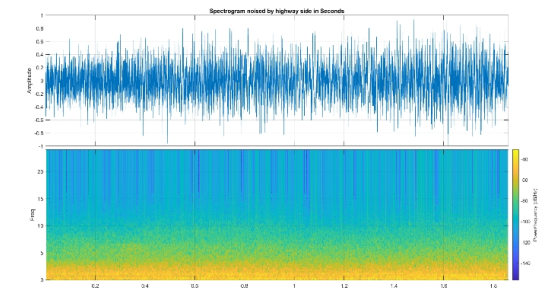


б)

Рисунок 1.3.4 – осцилограма, та спектрограма будівельної зони у середовищі MATLAB при дискретизації: а) 16кГц, б) 48 кГц



а)



б)

Рисунок 1.3.5 – осцилограма, та спектрограма шуму від шосе у середовищі MATLAB при дискретизації: а) 16кГц, б) 48 кГц

1.4. Метрики оцінювання якості мовлення

Оцінювання якості голосового сигналу після обробки є важливим етапом дослідження ефективності аналізу фільтрації, для швидкого аналізу комутації з досліджуванним середовищем через «налаштування – вивід».

Для аналізу обрано відносні оцінки зі таблиці 1.4.1 [12], в даній таблиці, наведено одні із найпопулярніших, та широко застосовуваних метрик, для аналізу аудіо та голосового сигналу.

Таблиця 1.4.1

Агрегована кореляція.

Matteo Torcoli. Objective Measures of Perceptual Audio Quality Reviewed: An Evaluation of Their Application Domain Dependence, 2021 [12],

$\bar{\rho} / \bar{\tau}'$	Audio coding	Source separation
2f-model	0.90 / 0.91	0.86 / 0.82
ADB	0.86 / 0.88	0.83 / 0.81
HAAQI	0.84 / 0.84	0.69 / 0.61
PEAQ ODG	0.81 / 0.84	0.63 / 0.66
PESQ	0.75 / 0.84	0.76 / 0.70
POLQAv3	0.60 / 0.70	0.74 / 0.70
PEMO-Q ODG	0.72 / 0.82	0.77 / 0.78
OPS	0.71 / 0.74	0.67 / 0.63
POLQAv1	0.69 / 0.72	0.74 / 0.68
fwSNRseg	0.67 / 0.71	0.69 / 0.70
POLQAv2	0.56 / 0.57	0.74 / 0.71
SDR	0.58 / 0.67	0.63 / 0.68

Моделі як 2f-model, ADB, HAAQI, PEAQ ODG, OPS вимагають ліцензії для використання та аналізу сигналу, і для аналізу фільтрації адаптивних фільтрів обрано метрики ідентичних по параметрах агрегованої кореляції PESQ[13](Додаток Б) HAAQI [14] (Додаток В), для зменшення похибок.

1.5. Висновки до Розділу 1

В цьому розділі, оглянуто основні теоретичні аспекти фільтрації, адаптивними фільтрами, над якими виконуватиметься досліджування, та метрик оцінювання якості відновленого сигналу.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ КОМПЕНСАЦІЇ ЗАВАД АДАПТИВНИМИ ФІЛЬТРАМИ

У цьому розділі виконується практична реалізація і перевірка ефективності адаптивних фільтрів для компенсації завад у мовленнєвому сигналі. Основна увага приділяється аналізу поведінки фільтрів у типових сценаріях впливу шумів, із застосуванням метрик PESQ та HASQI для кількісного оцінювання якості відновленого сигналу.

Аналіз охоплює чотири ключові частини:

- Постановка завдання та визначення параметрів адаптивних фільтрів;
- Первинна ітерація;
- Графічне представлення результатів ;
- Швидкість обробки;

2.1. Постановка завдання аналізу

У даній роботі заплановано дослідження для двох варіантів дискретизації сигналів 16кГц, та 48 кГц, при яких параметри без дослідження збіжності адаптивних визначено такими:

Для всіх фільтрів зона тренування 500 відліків, та кількість вагових коефіцієнтів 100, додатково, для сліпих адаптивних фільтрів на кшталт Sato, Godart, 1 повторення фільтрації, для фільтру Калману, реалізовано дослідження для 100, та 400 вагових коефіцієнтів.

Умови компенсування завад, зі створеної суміші по формулі (3):

$$s(i) = d(i) + n(i), (3)$$

де $s(i)$ – суміш сигналу,

$d(i)$ – опорний (вхідний) сигнал,

n – шум (зі рівнем SNR дб),

У суміш додаються шум з рівнем SNR від 0 до 30 дБ зі кроком 10 дБ та $d(i)$ вхідний сигнал зі довжиною обрано не менше 1 секунди, та не більше 2 секунд. У аналізі опорний сигнал, записано для 16 кГц, та 48 кГц в аудіо редакторі Audacity.

Компенсація завад адаптивними фільтрами виконується при 3 умовах:

1. Фільтр, на вході має $s(i)$ суміш сигналу, та $d(i)$ опорний сигнал
2. Фільтр, на вході має $s(i)$ суміш сигналу, та без $d(i)$ опорний сигнал, який замінюється $s(i)$ сумішшю сигналу
3. Фільтр, на вході має $s(i)$ суміш сигналу, та без $d(i)$ опорний сигнал, який замінюється $s(i)$ сумішшю сигналу, та виконується акустичне придушення

2.2. Параметри адаптивних фільтрів

Для адаптивних фільтрів, параметри виставлено такими:

- LMS – коефіцієнту градієнту μ виставлено 0,004;
 - RLS – коефіцієнт забуття λ становить 0,99;
 - Volterra LMS – коефіцієнт градієнту μ зменшується від 0,03 на 0,0004 кожні 50 відліків;
 - Sato – коефіцієнт градієнту μ виставлено 0,00004;
 - Godart – коефіцієнт градієнту μ виставлено 0,00004, $q=3$, $p=5$;
4. Kalman – крок огляду (step) 99 для вагових коефіцієнтів 100, та крок огляду 399, для 400 вагових коефіцієнтів.

2.3. Розгляд послідовності фільтрації

Блок-схема послідовності фільтрації наведено на рис. 2.3.1:

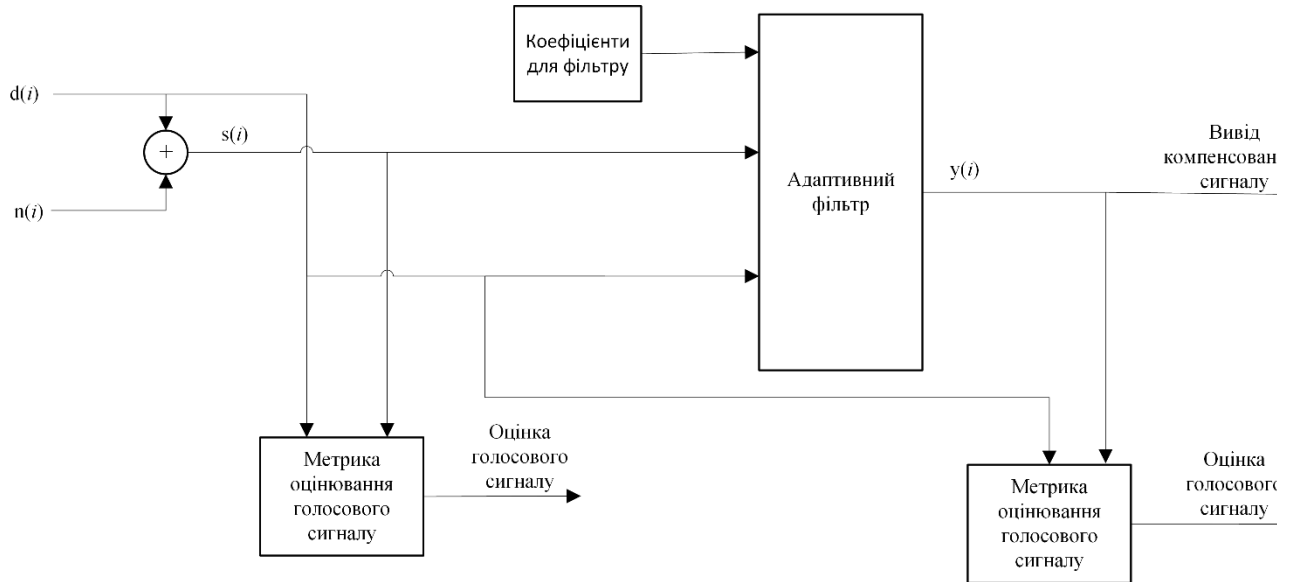


Рисунок 2.3.1 – Блок схема послідовної фільтрації

В огляді (рис.2.3.2-2.3.9) фільтрації адаптивного фільтру розглядається RLS при умові 1 без збіжності для обох видів дискретизації 16 та 48 кГц метрика оцінювання HASQI:

Розгляд починаємо для дискретизації 16 кГц, кількість відліків 24240:

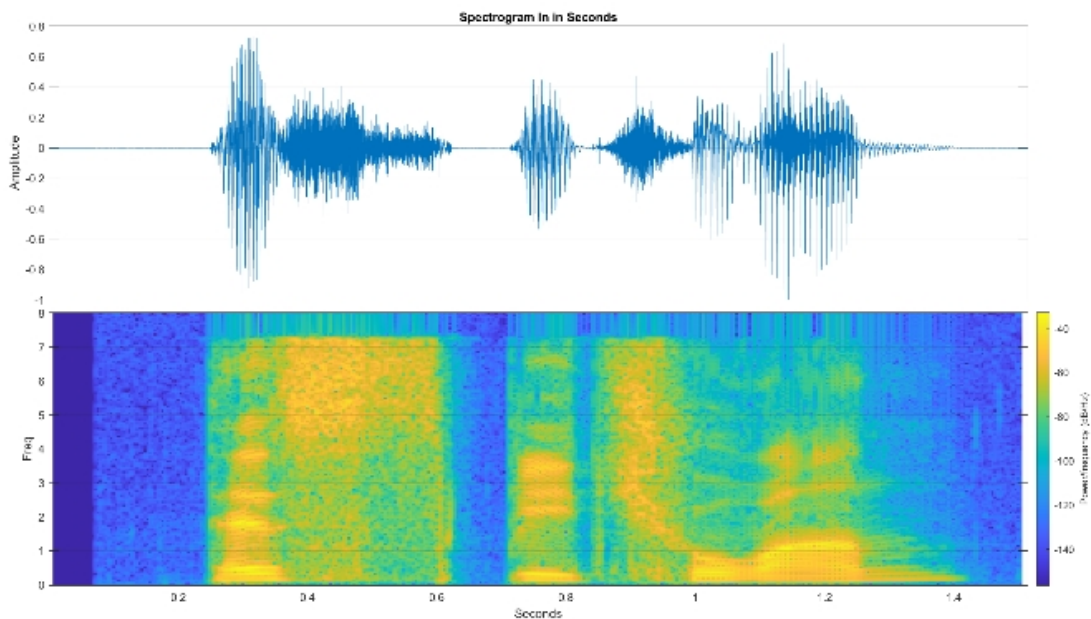


Рисунок 2.3.2 – осцилограма, та спектрограма опорного сигналу у середовищі MATLAB при дискретизації 16 кГц

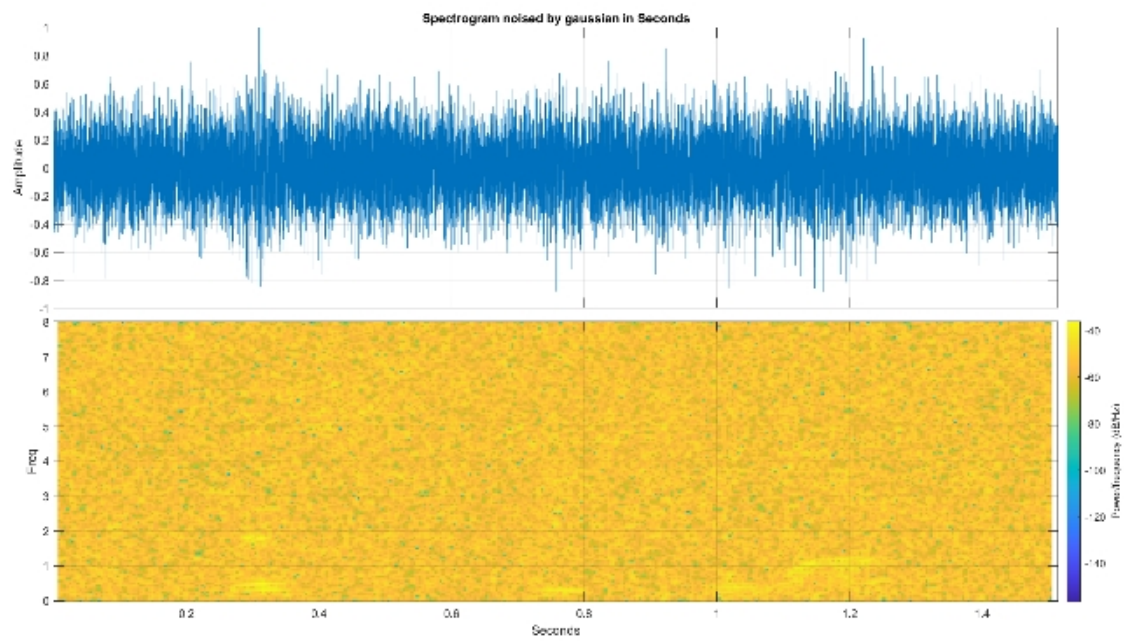


Рисунок 2.3.3 – осцилограма, та спектрограма суміші у середовищі MATLAB при дискретизації 16кГц, оцінка на основі метрики HASQI = 0,021938

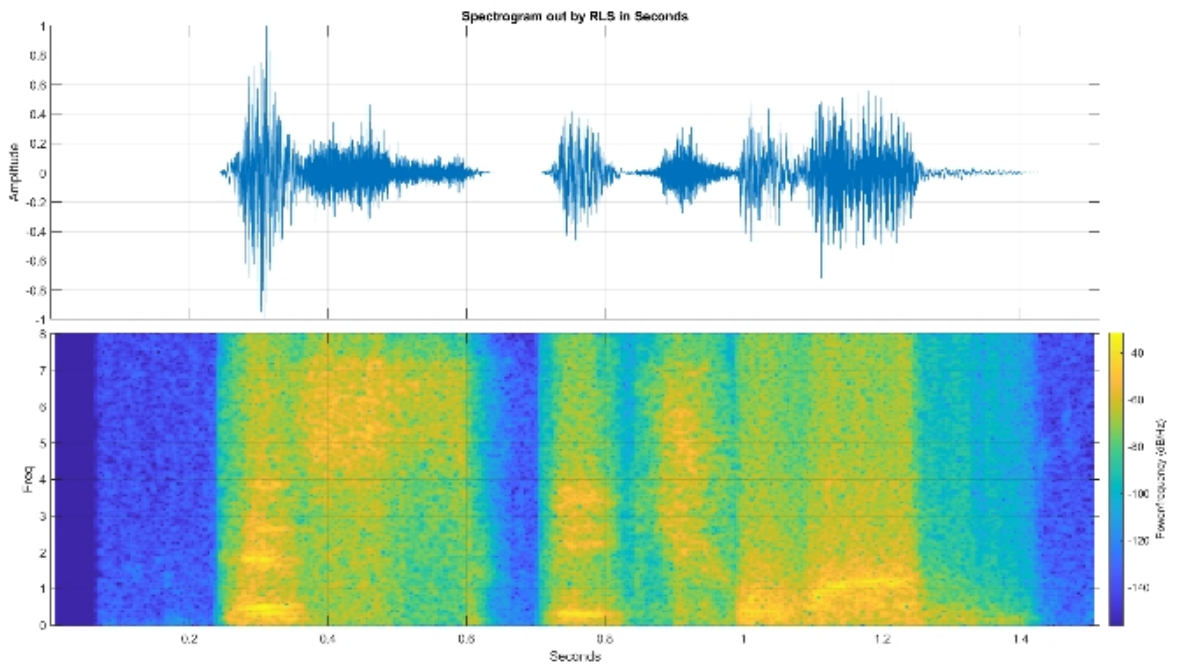


Рисунок 2.3.4 – осцилограма, та спектрограма компенсованого сигналу у середовищі MATLAB при дискретизації 16кГц, оцінка на основі метрики $HASQI = 0,36329$

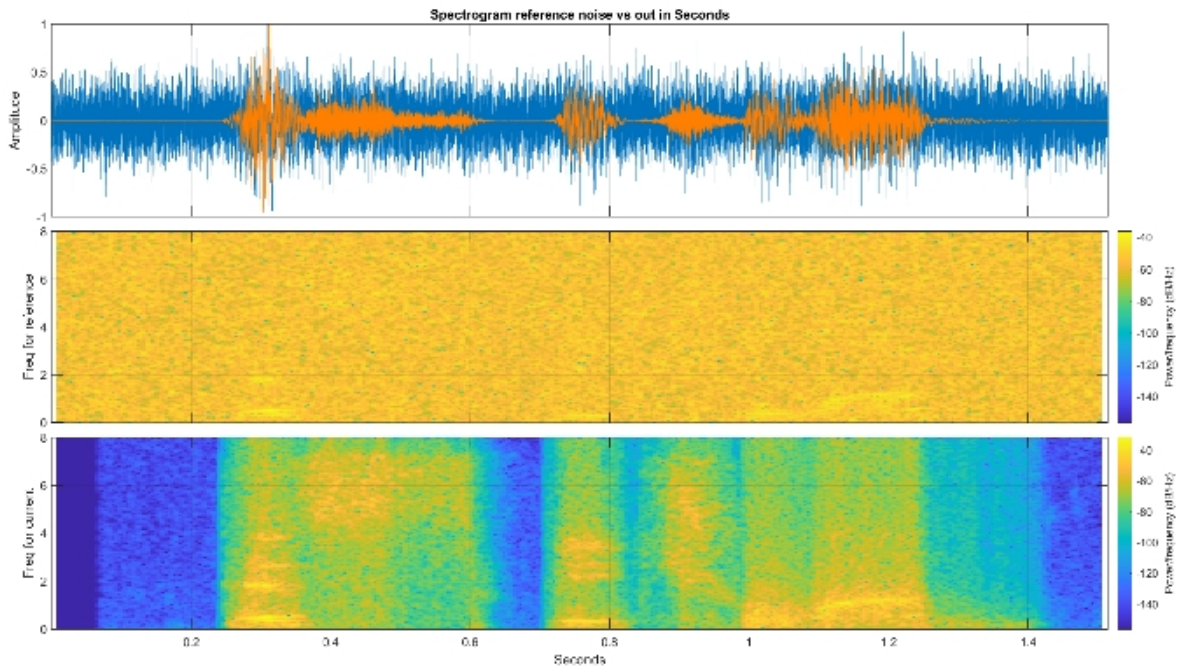


Рисунок 2.3.5 – осцилограма, та спектрограма між сумішшю, та компенсованим сигналом у середовищі MATLAB при дискретизації 16кГц

Для дискретизації 48 кГц, кількість відліків 89328:

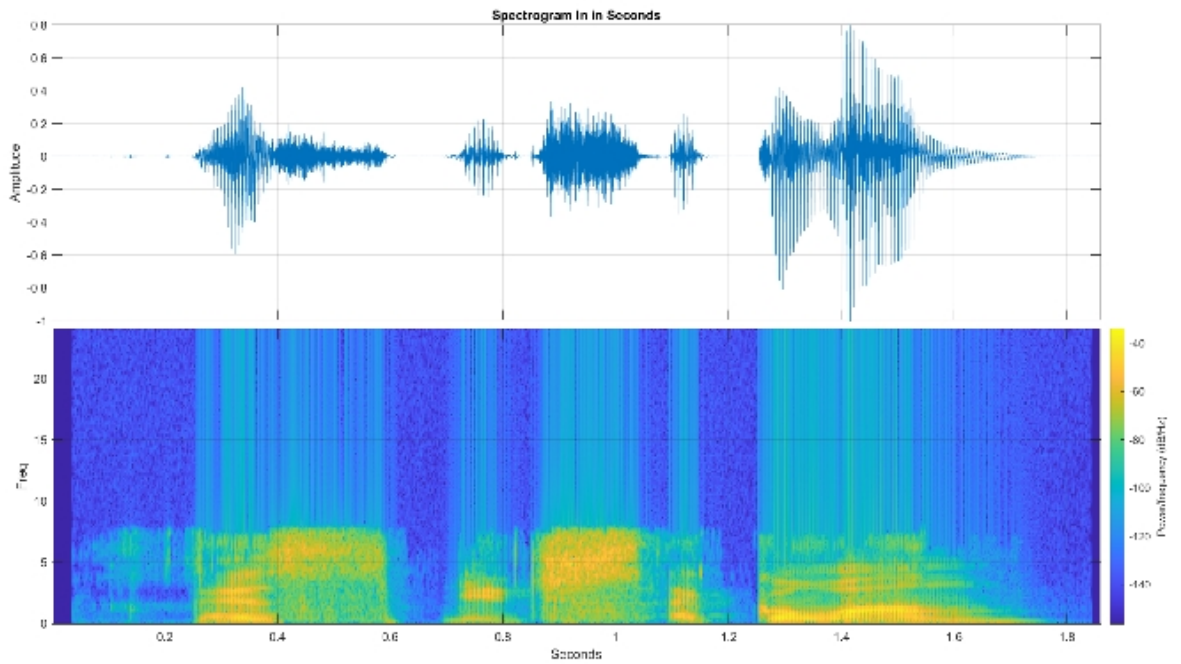


Рисунок 2.3.6 – осцилограма, та спектрограма опорного сигналу у середовищі MATLAB при дискретизації 48кГц

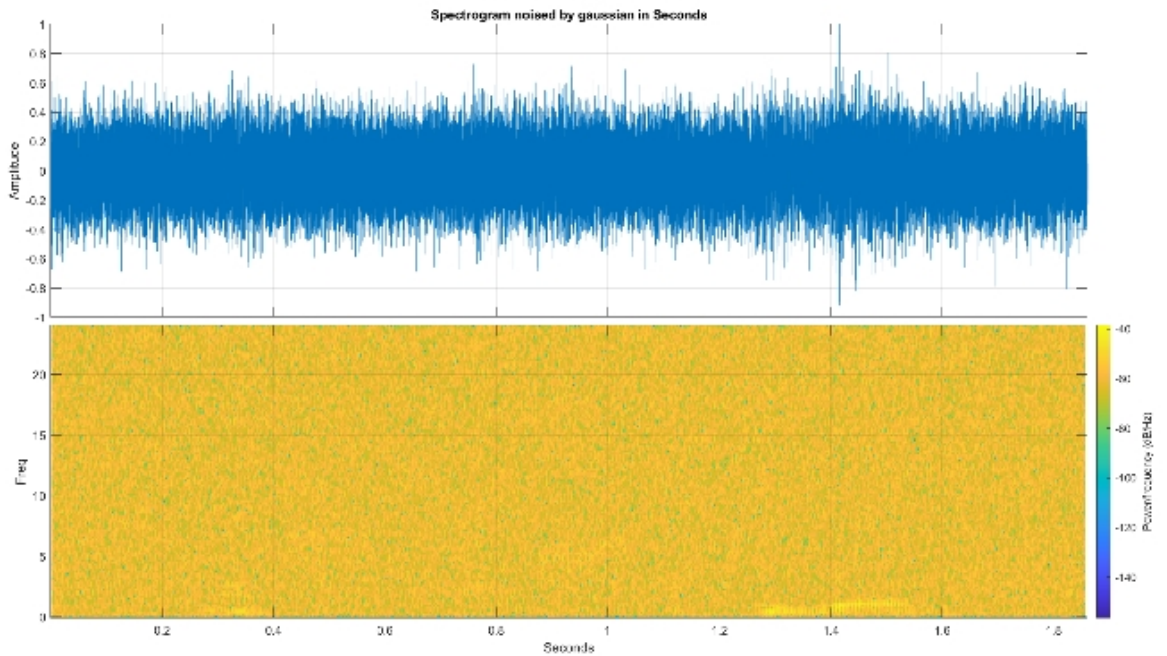


Рисунок 2.3.7 – осцилограма, та спектрограма суміші у середовищі MATLAB при дискретизації 48кГц, оцінка на основі метрики HASQI = 0,047038

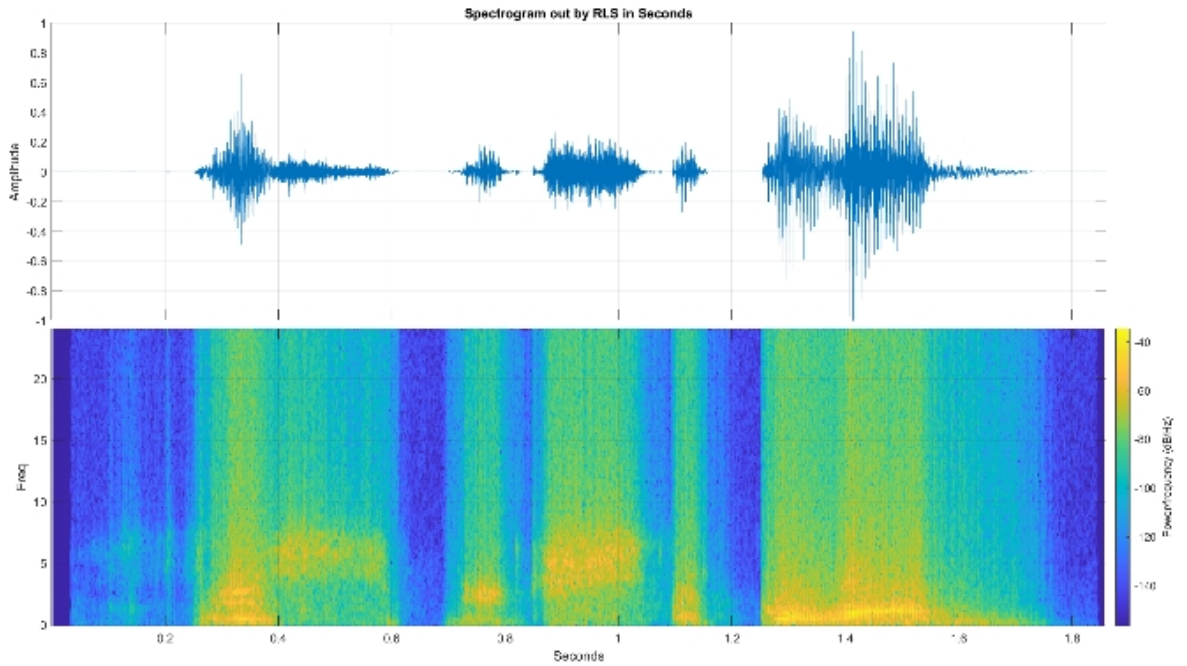


Рисунок 2.3.8– осцилограма, та спектрограма компенсованого сигналу у середовищі MATLAB при дискретизації 48кГц , оцінка на основі метрики $HASQI = 0,37575$

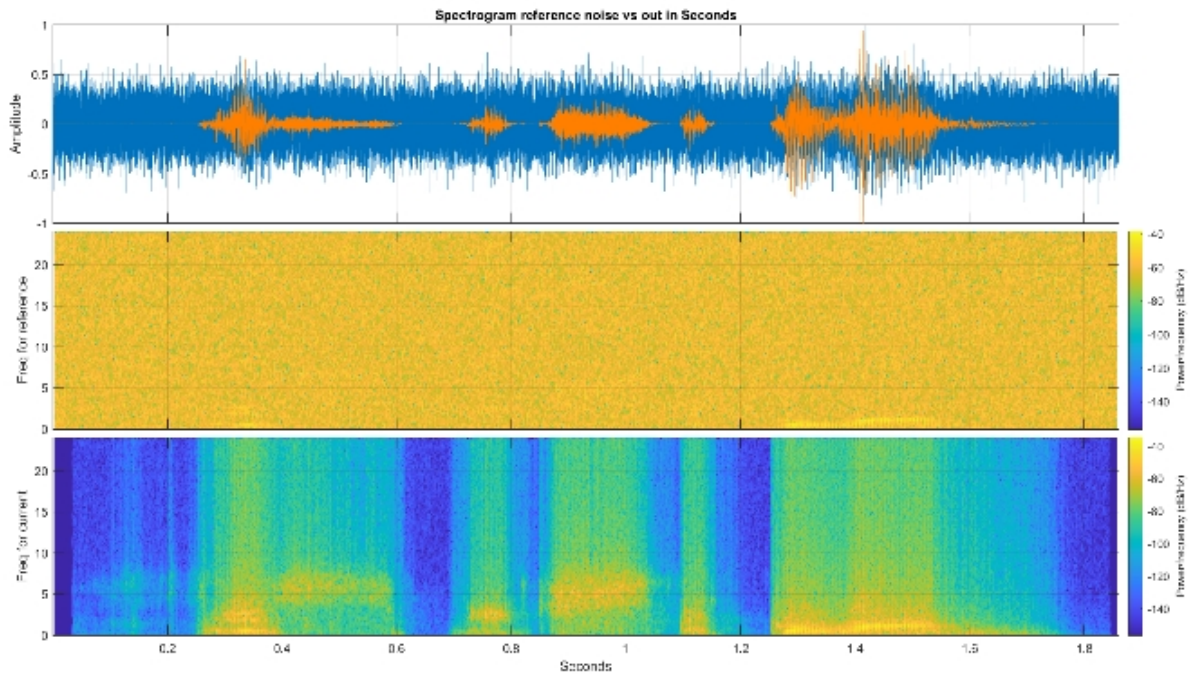


Рисунок 2.3.9 – осцилограма, та спектрограма між сумішшю, та компенсованим сигналом у середовищі MATLAB при дискретизації 48кГц

Весь використаний час на послідовність фільтрації (Початок фільтрації – кінець фільтрації з оцінкою), становить приблизно 34 (для 16 кГц) та 40 (для 48 кГц) секунд, що вважається дуже довго. При відключених метриках, та виводах зображень, швидкість ітерації займає лише 2 секунди (для 16 кГц), отже $t_{\text{дод}} = 32$ секунди, що дає можливість для включення фільтрації реальному часу, без умови врахування часу на збіжність.

На рис. 2.3.3, та рис. 2.3.7 суміш сигналу виконується зі опорного сигналу, та гауссівського шуму з рівнем SNR 10 дБ. На виводі фільтрації у суміші з компенсувалась завада, та отримали рівень 0.37, що по класифікації HASQI становить 2\5 поділки, що означає що, корисний голосовий сигнал з суміші можливо визначити, проте не ідеально.

2.4. Оцінка графічного виводу компенсації

Виконано аналіз 3-ох умов, для 2 видів дискретизації сигналу, вивід яких наведено на діаграмах (рис. 2.4.1-2.4.9) для різних метрик, для більш детального та комплексного аналізу фільтрації, у додатках (Додаток Г (дискретизації 16кГц відносно метрики PESQ), Додаток Д (дискретизації 16кГц відносно метрики HASQI), Додаток Ж (дискретизації 48кГц відносно метрики HASQI)) наведено в числовому вигляді.

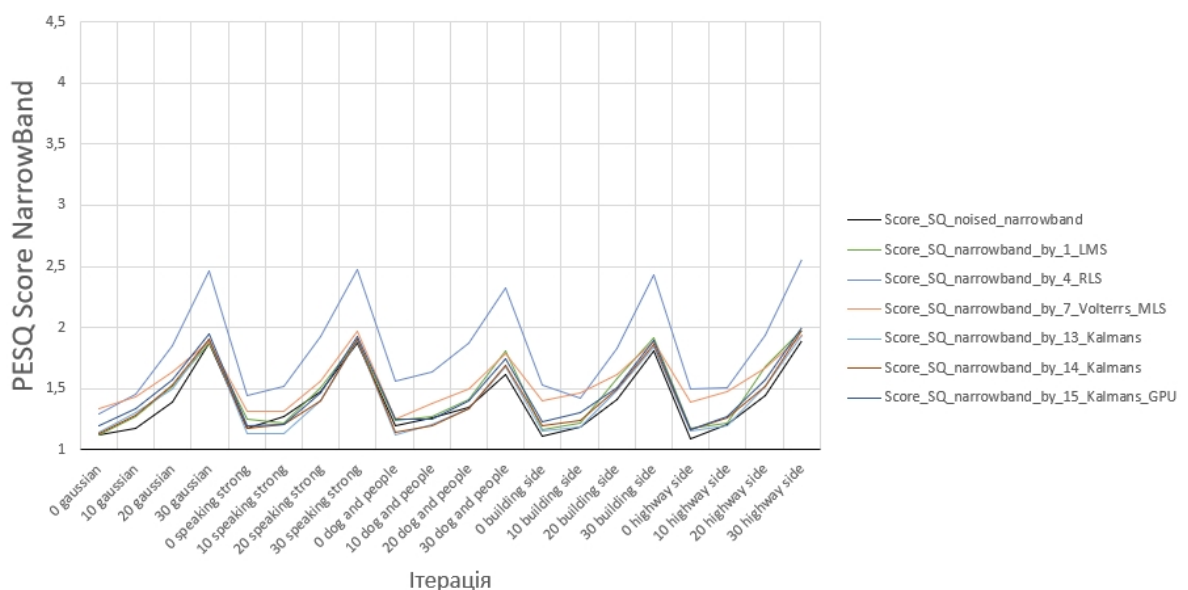


Рисунок 2.4.1 – діаграма оцінка компенсації (умова 1) завади по PESQ при дискретизації 16кГц

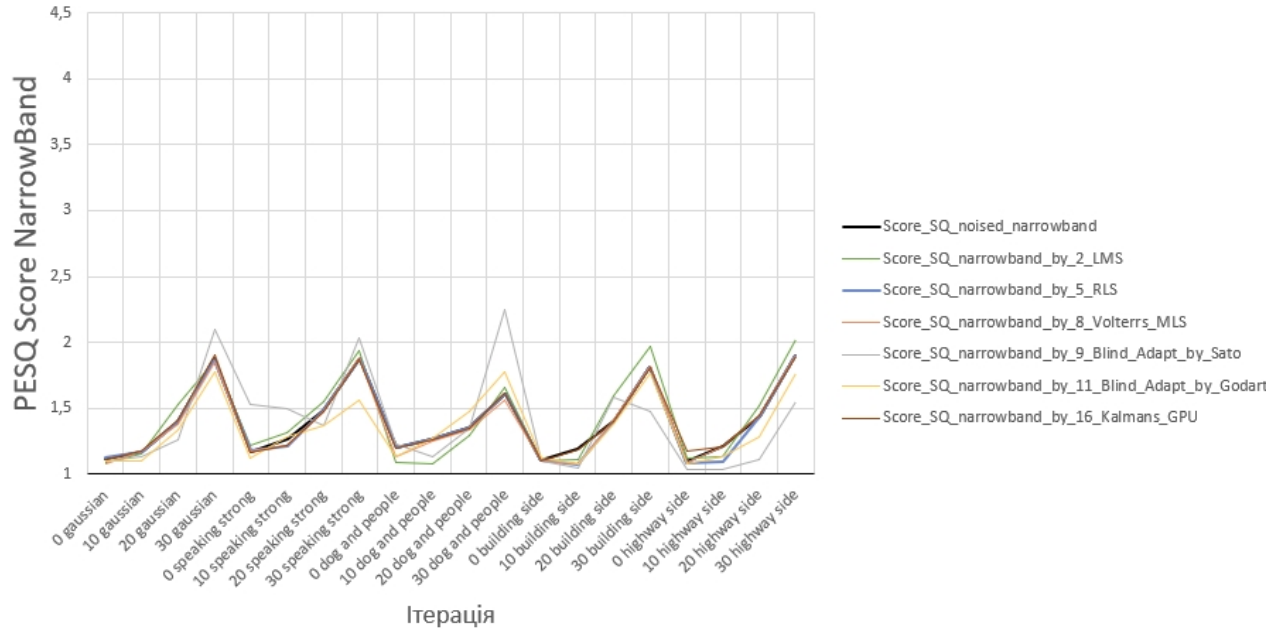


Рисунок 2.4.2 – діаграма оцінка компенсації (умова 2) завади по PESQ при дискретизації 16 кГц

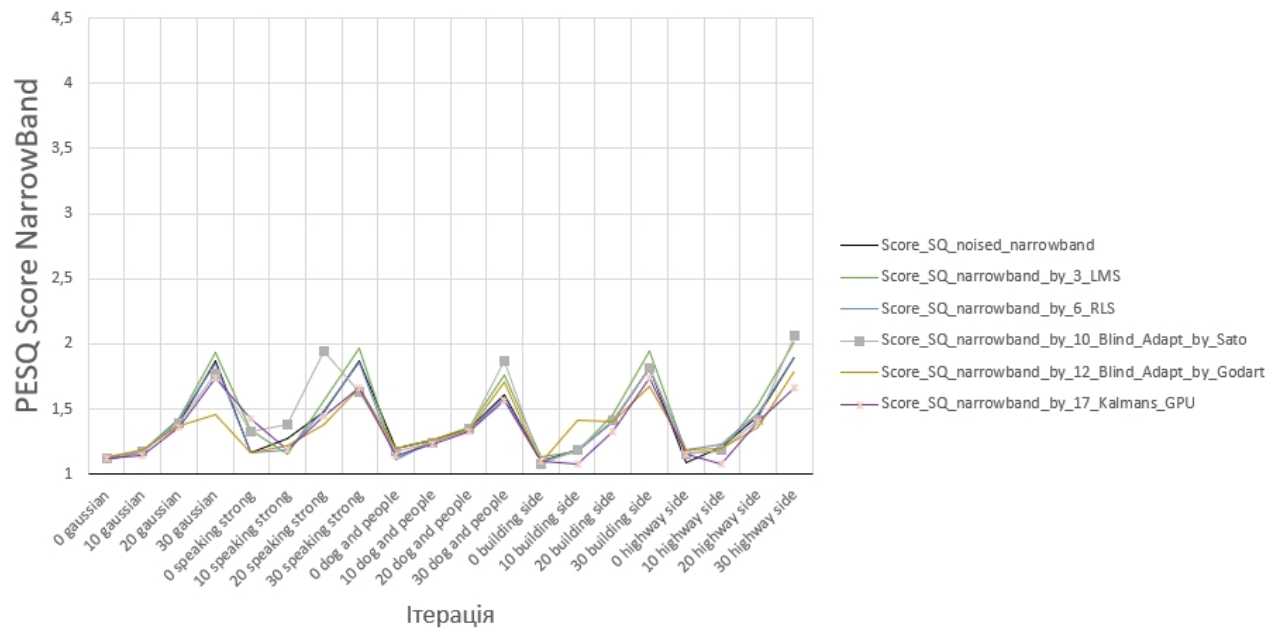


Рисунок 2.4.3 – діаграма оцінка компенсації (умова 3) завади по PESQ при дискретизації 16 кГц

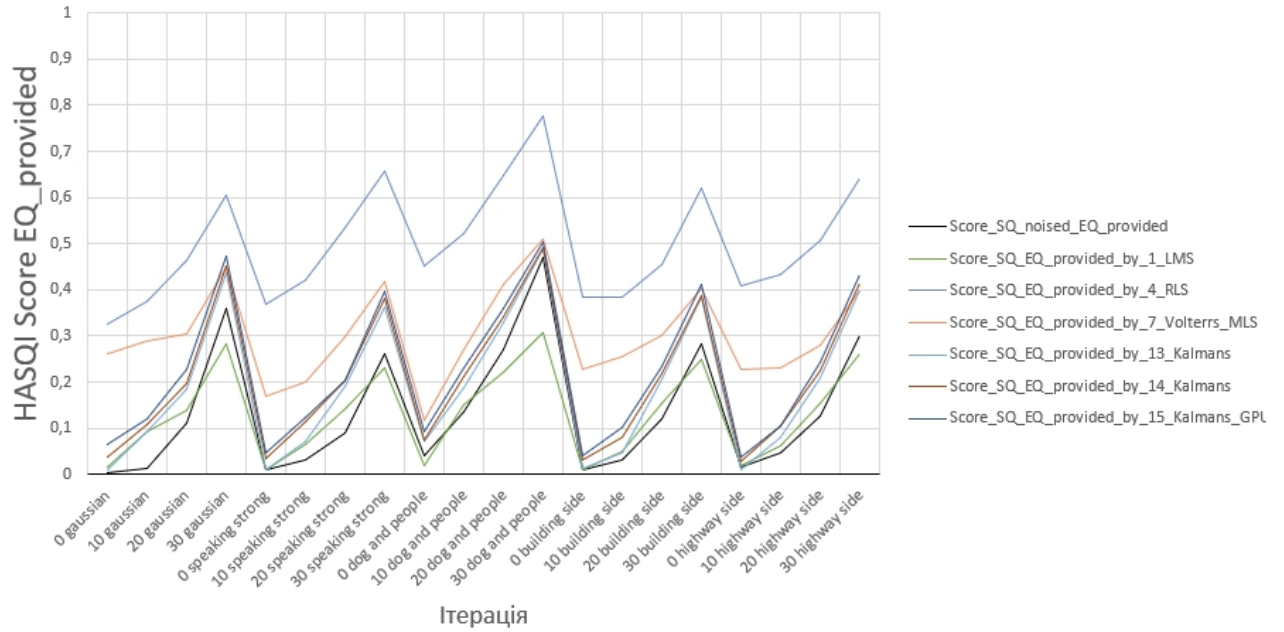


Рисунок 2.4.4 – діаграма оцінка компенсації (умова 1) завади по HASQI при дискретизації 16кГц

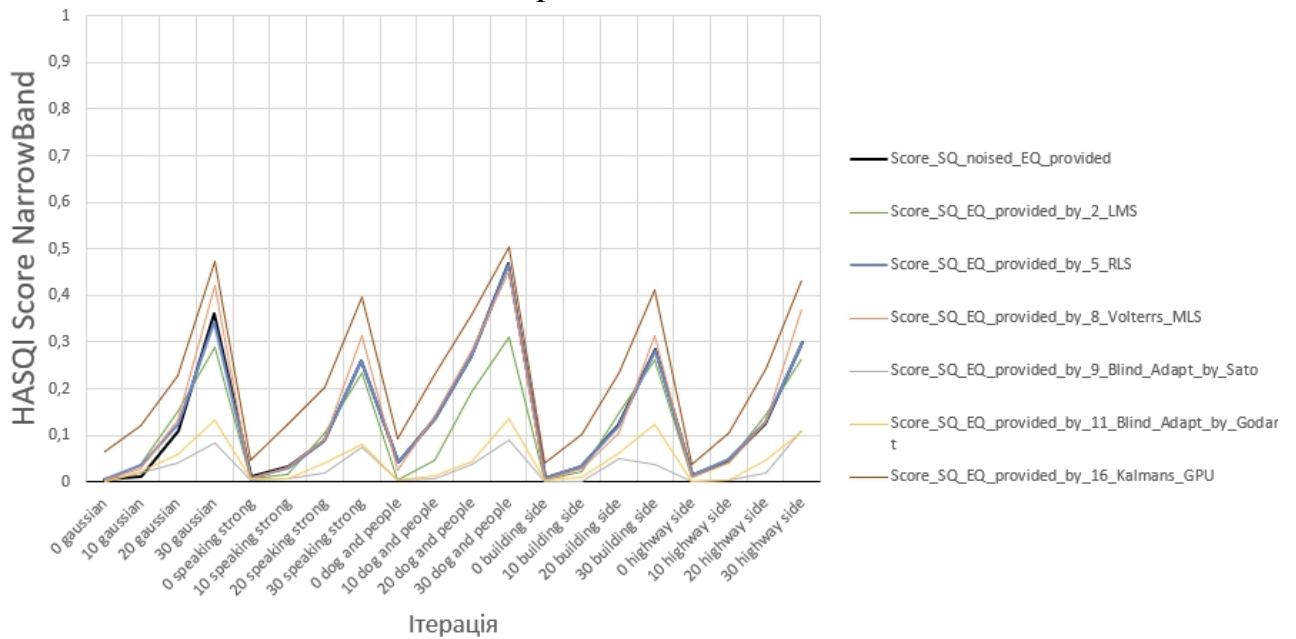


Рисунок 2.4.5 – діаграма оцінка компенсації (умова 2) завади по HASQI при дискретизації 16 кГц

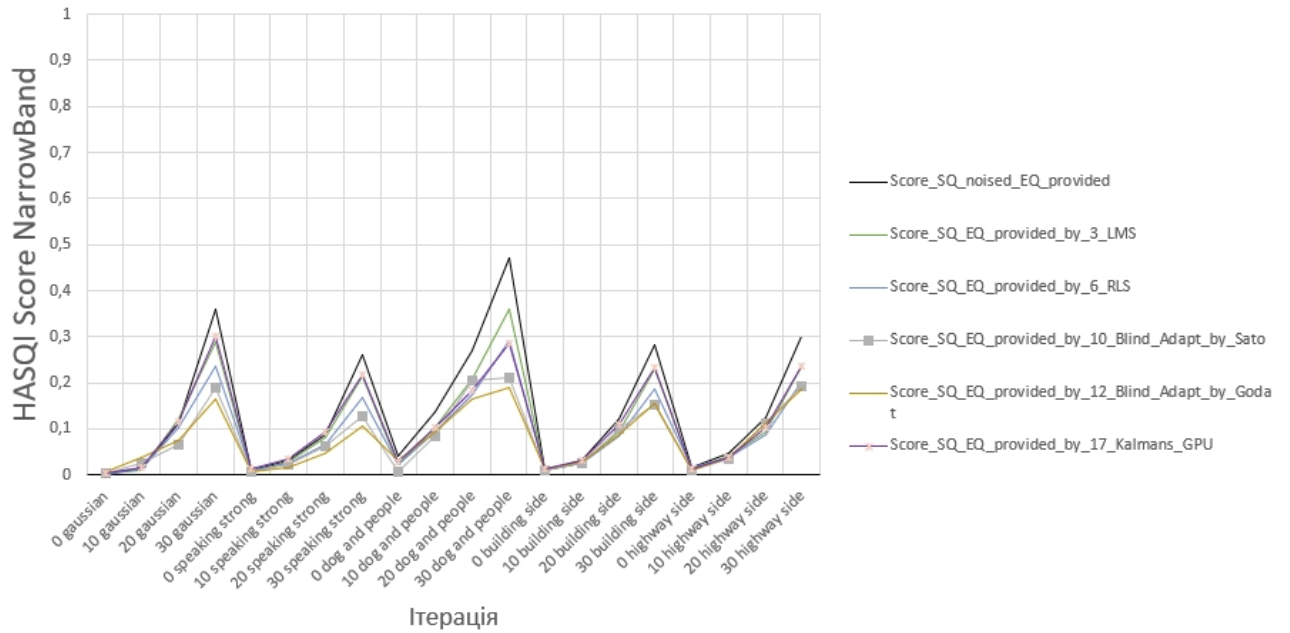


Рисунок 2.4.6 – діаграма оцінка компенсації (умова 3) завади по HASQI при дискретизації 16 кГц

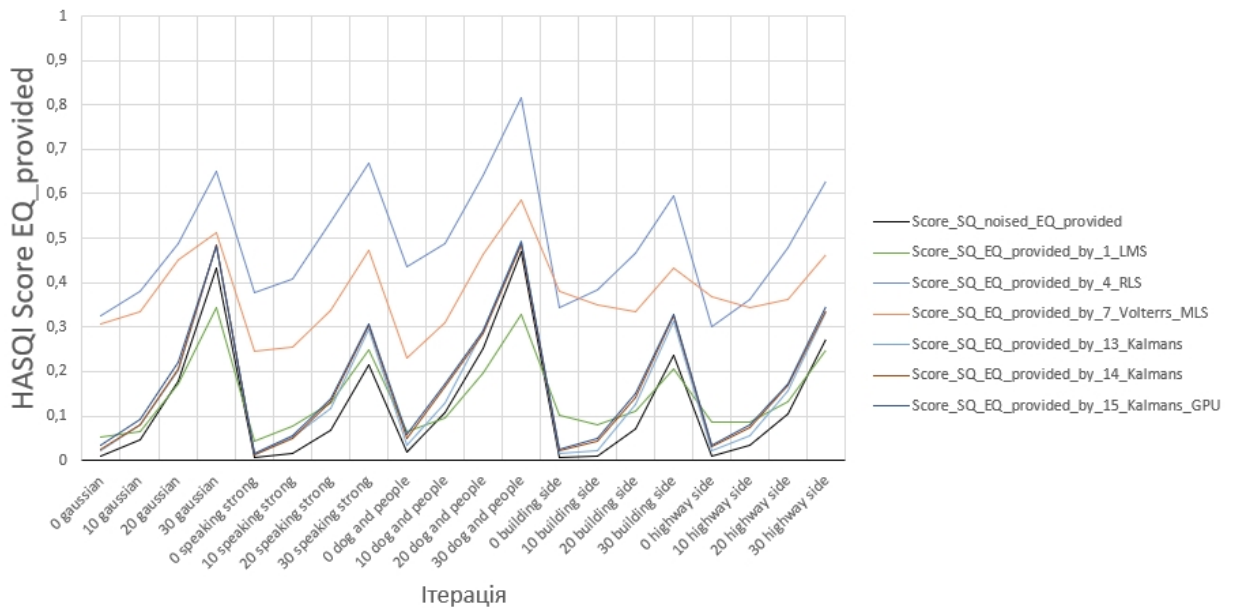


Рисунок 2.4.7 – діаграма оцінка компенсації (умова 1) завади по HASQI при дискретизації 48 кГц

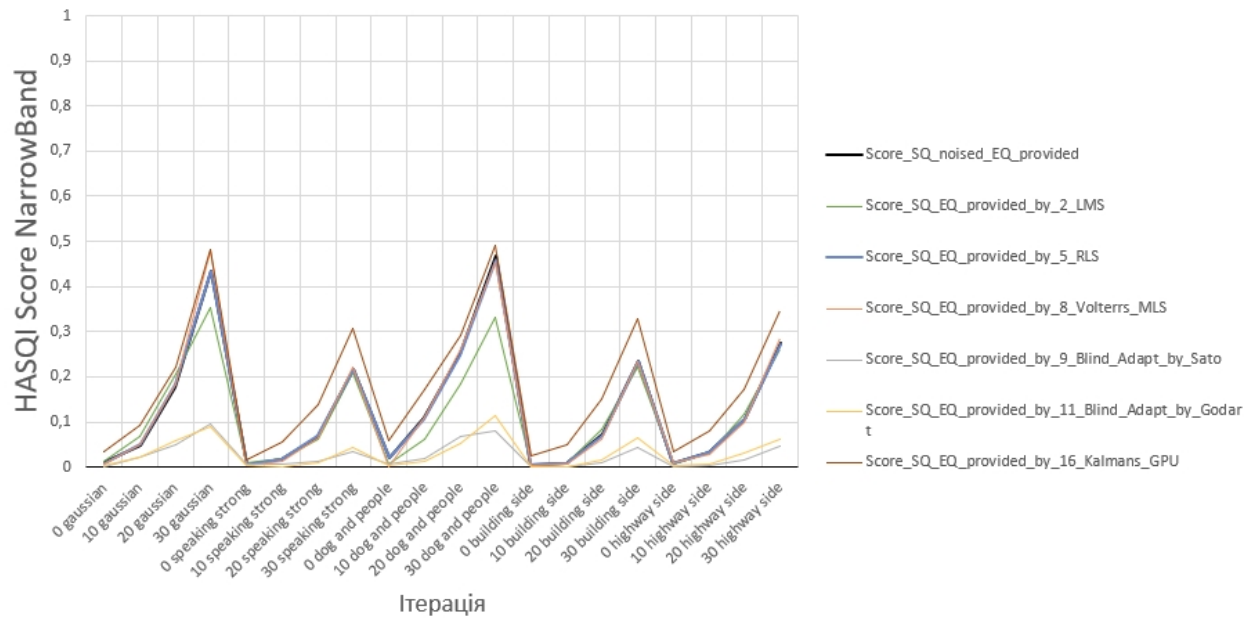


Рисунок 2.4.8 – діаграма оцінка компенсації (умова 2) завади по HASQI при дискретизації 48 кГц

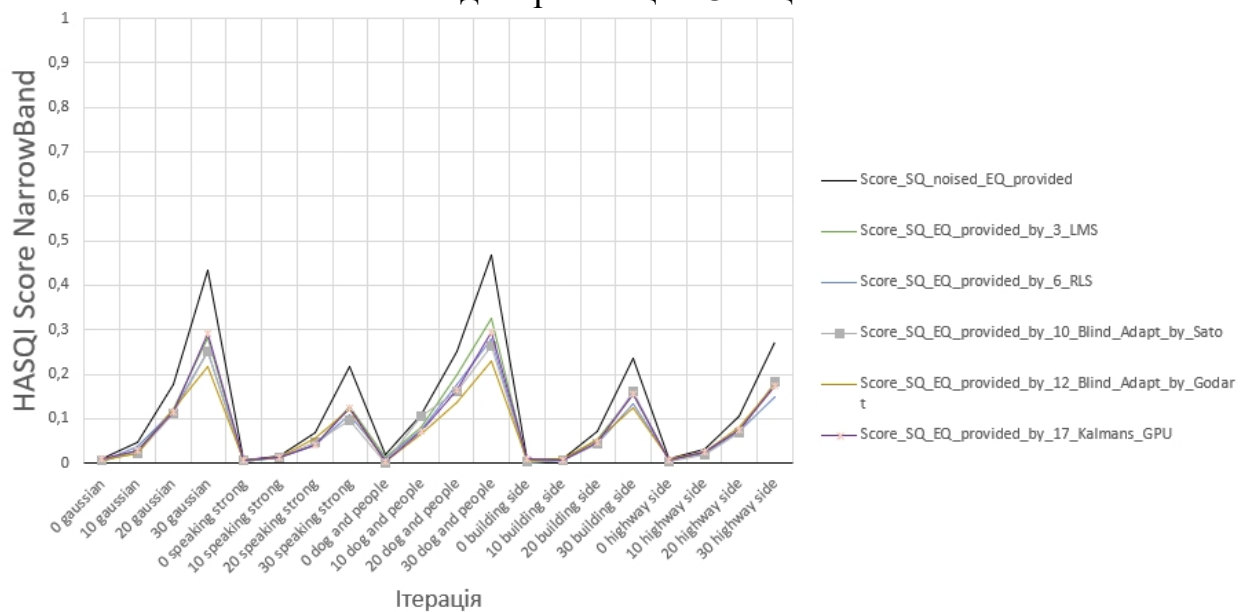


Рисунок 2.4.9 – діаграма оцінка компенсації (умова 3) завади по HASQI при дискретизації 48 кГц

По діаграмах на рисунках 2.4.1-2.4.9, можемо визначити, що без збіжності, тільки у випадках умови 1, більшість адаптивних фільтрів чудово справляються із задачею фільтрації, хоча б мінімально покращити сигнал, при налічуванні опорного сигналу окрім LMS який при середніх рівнях шуму (на 30 дБ) отримує проблеми через свою характеристику «градієнту», при умові 2, фільтр Kalman's зі 400 ваговими коефіцієнтами, зміг

продемонструвати себе, як «шумостійкий» фільтр. Нелінійний LMS фільтр на основі ряду Вольтера зміг також покращити якість сигналу, хоч і не настільки чудово.

При умові 3 зі акустичним придушенням, фільтри не змогли покращити сигнал, що досить очікувано, акустичне придушення використовується тільки від двох лінійних систем, де можливо обирати який зі вхідних сигналів ми хочемо придушити (стерео, 5.1,7.2).

2.4.1. Аналіз впливу завад на послаблення адаптивних фільтрів

По рисункам 2.4.1-2.4.9, ми можемо визначити, який зі шумів, гірше компенсується, по різниці оцінці «суміші» та сигналу зі «компенсованою» завадою.

Для Умови 1, найслабшої компенсації усіма фільтрами були гауссівський шум, та фоновий шум середовища (Будівельна зона). Для умови 2, найслабшу компенсацію отримав не стаціонарний шум (Вуличний шум). Для умови 3, не можливо визначити через відсутність токового покращення сигналу у всіх алгоритмів.

2.4.2. Оцінка швидкодії

У таблиці 2.4.1 (для дискретизації 16 кГц) та таблиці 2.4.2 (для дискретизації 48 кГц) наведено середньо арифметичний час по формулі (4) однієї ітерації для адаптивних фільтрів:

$$t_{\text{ср}} = \frac{1}{I} \sum_{i=0}^I t_i, (4)$$

Нормований час в свою чергу отримуємо зі п.2.3, в якому ми отримали що $t_{\text{дод}} = 32$ секунди, а отже нормований час для обробки фільтру визначаємо по формулі (5)

$$T_{\text{норм}} = t_{\text{ср}} - t_{\text{дод}}, (5)$$

Таблиця 2.4.1

Фільтр	LMS 100	RLS 100	Volterra LMS 100	Sato 100	Godart 100	Kalman 100 w	Kalman 400 w	Kalman -GPU 400 w
$t_{\text{ср}}$, Час на ітерацію, с	33	34	34	37	39	40	152	94
$T_{\text{норм}}$, Нормований час без виводу оцінки, с	1	2	2	5	7	8	120	62

Таблиця 2.4.2

Фільтр	LMS 100	RLS 100	Volterra LMS 100	Sato 100	Godart 100	Kalman 100 w	Kalman 400 w	Kalman -GPU 400 w
$t_{\text{ср}}$, Час на ітерацію, с	45	50	46,5	43	43	53	411	256
$T_{\text{норм}}$, Нормований час без виводу оцінки, с	13	17	14,5	11	11	20	379	224

Можемо бачити, що час залежить від кількості вхідних відліків в сигналі, та кількості вагових коефіцієнтів, хоч ми і збільшили в чотири рази кількість відліків у сигналі (між 16кГц та 48 кГц) ми отримали уповільнення для «швидких фільтрів» до 13 разів, а для «повільних фільтрів» відносно 4 разів, для Калмана тримає значення від 2,5 до 3,5 разів, для сліпих практично у двічі разів.

2.5. Висновки до Розділу 2

В цьому розділі було здійснено комплексний аналіз компенсації завад у голосовому сигналі за допомогою адаптивних фільтрів, з урахуванням трьох різних умов. Проведено первинну ітерацію на прикладі фільтру RLS, в якій підтверджено ефективність адаптації навіть за складних умов впливу завад, проте впливову компенсацію не помітно, що говорить про те, що налаштування алгоритмів, є однією з вад використання адаптивних фільтрів.

На основі метрик оцінювання PESQ, HASQI встановлено, що:

- Найкращі результати досягаються, у яких виконується мінімальна компенсація завади у сигналі, теоретично, повинно бути наближеним до найкращого при наявності опорного сигналу, що свідчить про цілком невірне налаштування та відсутність методів збіжності в алгоритмах, окрім фільтра Калмана, який самостійно себе налаштовує.
- Сліпі фільтри, LMS Volterra та Kalman з великою кількістю важелів здатні частково компенсувати відсутність опорного сигналу, та в деяких шумах самостійно компенсувати шуми.
- Умова з акустичним придушенням (умова 3) не дав чіткого виводу виконання компенсування хоча б в одному з фільтрів через виконання дослідження через моно вид сигналу.

Проаналізовано швидкодію при двох частотах дискретизації (16 кГц та 48 кГц), що дозволило оцінити обчислювальну вартість кожного алгоритму, в якому найбільшій вартості є алгоритм RLS, через швидкість, та вивід з компенсованого сигналу, за тим алгоритм Kalman, який ціною часу, але виконав компенсацію завад, при відсутності опорного сигналу.

РОЗДІЛ 3

ПОКРАЩЕННЯ АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ

На основі отриманих у попередньому розділі результатів, встановлено ефективність адаптивної фільтрації за низки фіксованих умов. Разом із тим, значна тривалість сигналу створює додаткове навантаження на систему адаптації, зокрема через велику кількість вхідних відліків та динамічність голосового потоку.

У цьому розділі розглядається підхід до підвищення стабільності фільтрації на основі MLS шляхом попереднього на окремих ділянці сигналу застосування отриманих параметрів до інших частин.

3.1. Сегментованість вхідного сигналу

Аналіз показав, що ефективність адаптивної фільтрації залежить від швидкості налаштування як вагових коефіцієнтів та «вдалого» налаштування алгоритму, вплив яких можливо компенсувати через умови збіжності, у якому алгоритм сам себе виправить.

Умова збіжності[11] адаптивних алгоритмів може виконуватись через:

- Мінімальну середньоквадратичну похибку(6)

$$\varepsilon = MSE = E[|e(i)|^2] \quad (7)$$

- Через мінімальну різницю вагових коефіцієнтів (7)

$$\varepsilon = E[|w(i) - w(i-1)|] \quad (7)$$

- Та через стабілізацію метрик оцінки (8)

$$\varepsilon = S_i - S_{i-1} \quad (8)$$

Для випадків, коли ми не знаємо корисного сигналу, збіжність через мінімальну середньоквадратичну похибку, та стабілізацією метрик оцінки, ми хоч і не помітно але спираємось відносно $d(i)$ опорного сигналу, що в свою чергу чудово покращить якість голосового сигналу для випадків наявності опорного сигналу, в зонах для тренування, але негативно впливає при

відсутності опорного сигналу, що ставить під питання самостійність адаптивного фільтру.

Отже для можливості компенсувати не очікуванні завади, які є не стаціонарні підходить саме збіжність через мінімальну різницю вагових коефіцієнтів.

Для подальшої фільтрації пропонується для покращення компенсації впливу завад алгоритмами, сегментовано розділяти вхідний сигнал, на певні зони, а після фільтрації – поєднувати послідовно, блок схема сегментовано розділення сигналу, зі умовою збіжності вагових коефіцієнтів, та введення до алгоритму, наведено на рисунку 3.1.1.

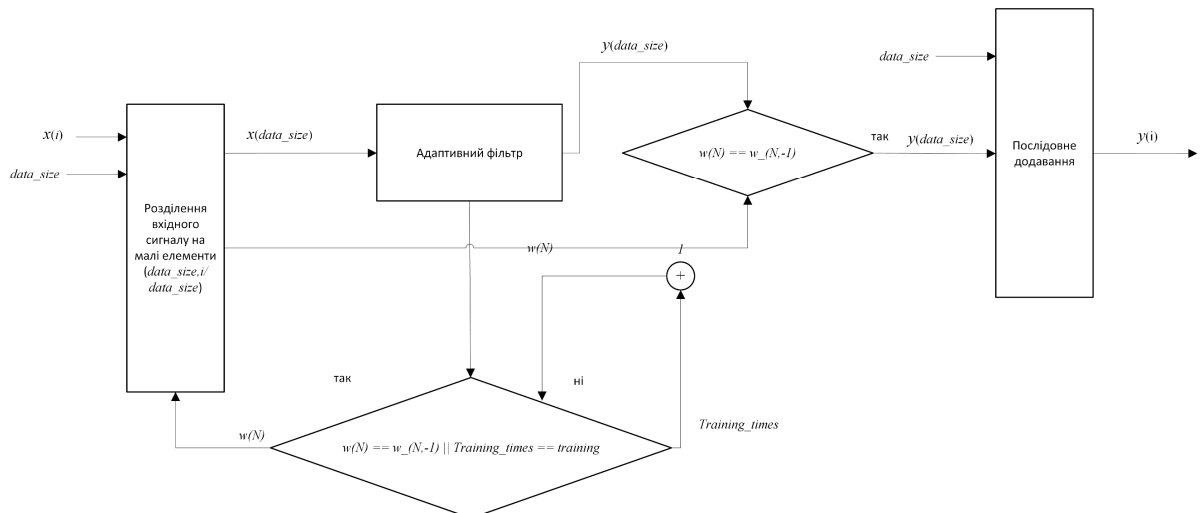


Рисунок 3.1.1 – Блок схема сегментованого розділення сигналу

3.2. Постановка дослідження при сегментації сигналу

Для зменшення часу на перевірку у цьому розділі пропонується підхід аналізу на адаптивному фільтрі LMS (який показав слабку компенсацію для всіх випадків шуму в п.2.4) на коротких фрагментах сигналу зі виконанням умови збіжності або кількості тренування з наступною фільтрацією. Завданням є реалізувати та дослідити новий адаптивний цикл:

- Розділення на сегменти вхідний сигнал;
- Тренування зі умовою збіжності вагових коефіцієнтів

3.3. Параметри MLS алгоритму

Коефіцієнт градієнту залишається зі п.2.2, - 0.004, проте кількість вагових коефіцієнтів становить 80, тренування увімкнена 10 разів зі умовою збіжності, сегментація виконується на 1000 відліків, де 500 відліків відноситься на тренування вагових коефіцієнтів адаптивного фільтру.

3.4. Оцінка графічного виводу модифікованого методу компенсування завад

Виконано аналіз, відповідно до п.2.4, в якому 1 вид дискретизації сигналу 48 кГц, вивід якого наведено на діаграмі (рис.3.4.1-3.4.3), для метрики HASQI, для більш детального та комплексного аналізу фільтрації, у додатку (Додаток 3).

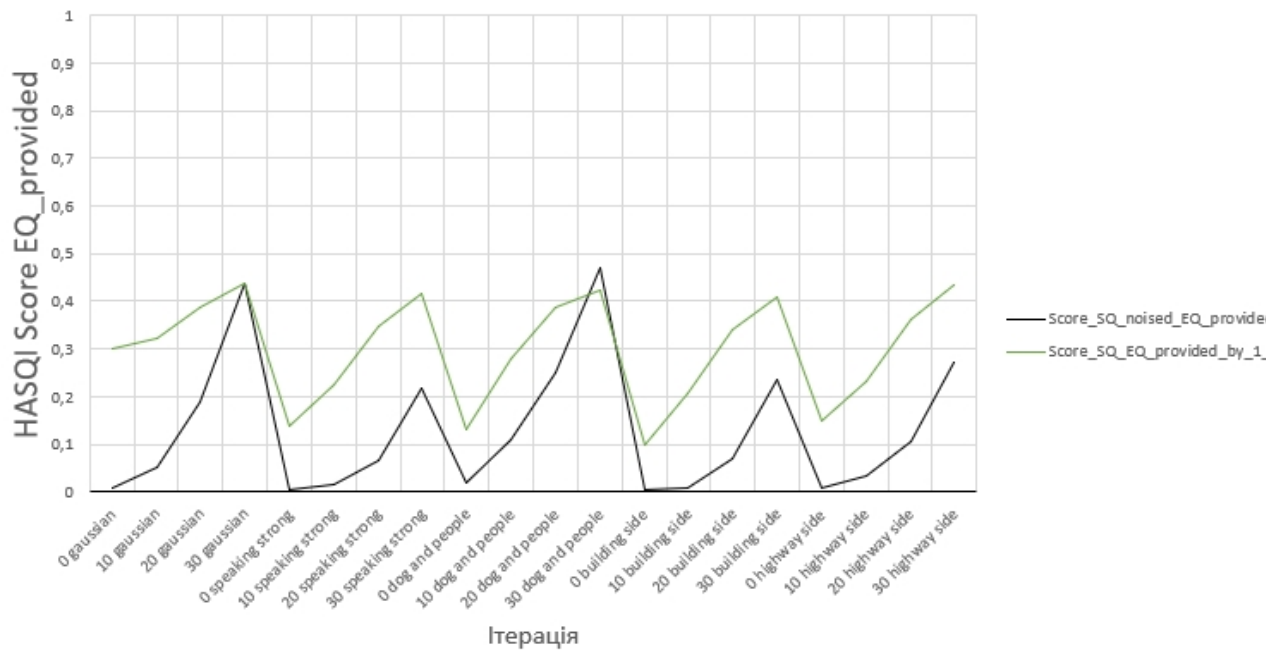


Рисунок 3.4.1 – діаграма оцінка компенсації (умова 1) завади по HASQI при дискретизації 48кГц

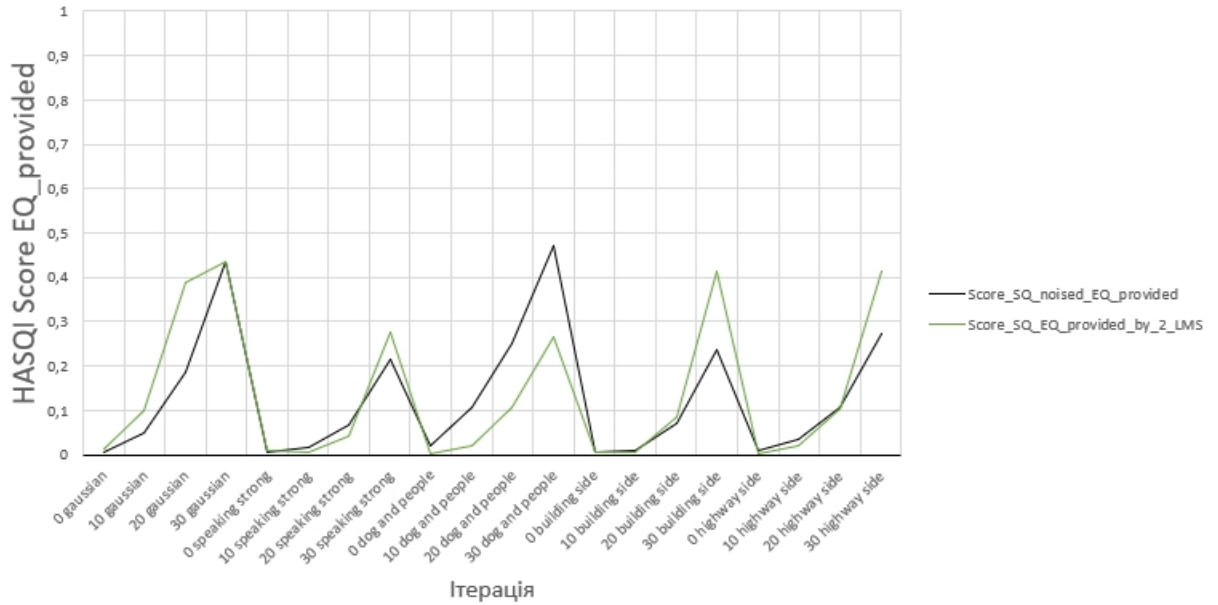


Рисунок 3.4.2 – діаграма оцінка компенсації (умова 2) завади по HASQI при дискретизації 48кГц

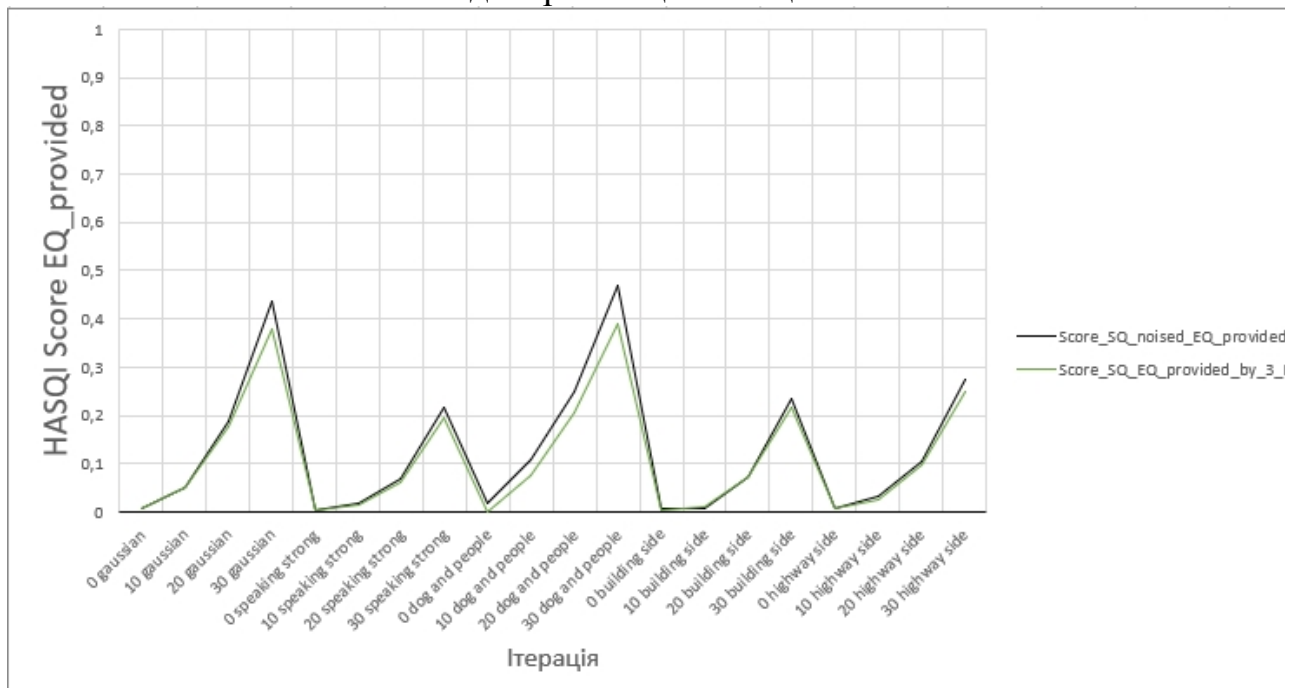


Рисунок 3.4.3 – діаграма оцінка компенсації (умова 3) завади по HASQI при дискретизації 48кГц

Як можемо побачити по діаграмам для адаптивного фільтру LSM зі сегментацією, у якого помітно, що для умови 1, якість компенсації для всіх умов завад, з досить великим покращенням, відносно попереднього дослідження, для умови наявності опорного сигналу.

Для умови 2. Збільшились зони, в якому алгоритм виконує компенсування завади, без наявного опорного сигналу. Для умови 3, без наявних переваг, що очікувано.

3.4.1.Оцінка швидкодії

У таблиці 3.4.1 (для дискретизації 48 кГц) наведено середньо арифметичний час однієї ітерації, та нормований час.

Таблиця 3.4.1

Фільтр	LMS 80
$t_{\text{ср}}$, Час на ітерацію, с	46
$T_{\text{норм}}$, Нормований час без виводу оцінки, с	14

Час на перевірки збіжності у адаптивному фільтрі, зовсім збільшив, тривалість обробки на 1с, що не є критично.

3.5. Висновки до Розділу 3

Сегментована адаптація у адаптивних алгоритмах, показує істотне покращення якості відновлення мовленого сигналу, відносно лінійної фільтрації, розглянутому в розділі 2, в умовах різних завад, та зовсім слабо впливає на швидкодію, збільшуючи час на ітерацію в 1 с при зменшеній кількості вагових коефіцієнтів у алгоритмі.

ВИСНОВКИ

У цій роботі розглянуто ефективність, та актуальність адаптивних фільтрів у компенсуванні різних типів завад в голосових сигналах. Особлива увага приділялась швидкості обробки та якості компенсації фільтрами LMS, RLS, Volterra-LMS, Sato та Godart, Kalman при зміні завади, а також завдяки використанню метрик оцінювання якості мовлення PESQ і HASQI для швидкого отримання результату у системі «вхідний параметр - вивід».

Проведене дослідження продемонструвало, що вибір типу адаптивного фільтру, а також стратегія його навчання (включаючи попереднє тренування, сегментацію, збіжність по ваговим коефіцієнтам) можуть суттєво впливати на результат. Зокрема від швидкості налаштування фільтрів на зміну завади та великій кількості відліків, тоді як сегментований підхід, може збільшити якість компенсації впливу завад.

Запропонована стратегія попереднього навчання та умови збіжності через вагові коефіцієнти на сегменті сигналу демонструє потенціал для застосування в системах реального часу — на кшталт голосовому режиму зв'язку, слухових апаратах, обробці мовлення в шумному середовищі та інших задачах, де швидка адаптація саме фільтрів LMS, та RLS, Volterra LMS, через не вибагливість в точності налаштування.

Фільтр Калмана, в свою чергу може підійти для військових, аерокосмічних, та локаційних цілей, через простоту налаштування (збільшувати\зменшувати кількість вагових коефіцієнтів), однак необхідно вирішити питання в швидкості адаптації фільтру, при якому ітерація «суміш – корисний сигнал» займатиме найменшого часу.

Сліпі алгоритми, показали себе досить зі слабкої сторони, а отже, як концепт, швидкого «шумостійкого» алгоритму, має шанс на життя, проте має складність в налаштуванні, у вигляді вибору коефіцієнтів, окрім обрання кількості вагових коефіцієнтів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. MATLAB Documentation, [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>
2. Audacity Reference Manual, [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://manual.audacityteam.org>
3. B. Widrow, J.M. McCool, M.G. Larimore, C.R. Johnson Jr., Stationary and nonstationary learning characteristics of the LMS adaptive filters. Proc. IEEE 64, 1151–1162 (1976), [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://isl.stanford.edu/~widrow/papers/j1976stationaryand.pdf>
4. E. Eleftheriou, D.D. Falconer, Tracking properties and steady-state performance of RLS adaptive filter algorithms. IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. (ASSP) 34, 1097–1110 (1986), [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<http://msol.people.uic.edu/ECE516/papers/Tracking%20Properties%20and%20Steady-State%20Performance%20of%20RLS.pdf>
5. Komal R. Borisagar ,Dr. G.R.Kulkarni, “Simulation and Comparative Analysis of LMS and RLS Algorithms Using Real Time Speech Input Signal”, [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
https://www.researchgate.net/profile/Komal-Borisagar/publication/228889283_Simulation_and_Comparative_Analysis_of_LMS_and_RLS_Algorithms_Using_Real_Time_Speech_Input_Signal/links/59a782c64585156873cfdc34/Simulation-and-Comparative-Analysis-of-LMS-and-RLS-Algorithms-Using-Real-Time-Speech-Input-Signal.pdf
6. Felipe C. Pinheiro and Cássio G. Lopes, “A Nonlinear Adaptive Filter Based on the Model of Simple Multilinear Functionals”, [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://arxiv.org/pdf/1603.00427>

7. D.N. Godard, Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication system. IEEE Trans. Commun. (COM) 28, 1867–1875 (1980), [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.academia.edu/795261/Self_recovering_equalization_and_carrier_tracking_in_two_dimensional_data_communication_systems
8. Y. Sato, A method of self-recovering equalization for multi-level amplitude modulation. IEEE Trans. Commun. (COM) 23, 679–682 (1975), [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://faratarjome.ir/u/media/shopping_files/store-EN-1484205766-4349.pdf
9. R.E. Kalman, A new approach to linear filtering and prediction problems. Trans. ASME J. Basic Eng. 82, 34–45 (1960), [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://courses.cs.duke.edu/compsci527/cps274/fall11/papers/Kalman60.pdf>
10. R.E. Kalman, Mathematical description of linear dynamical systems. SIAM J. Control 1, 152–192 (1963), [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://people.duke.edu/~hpgavin/SystemID/References/Kalman-JSIAM-1963.pdf>
11. Paulo S. R. Diniz, “Adaptive Filtering Algorithms and Practical Implementation Fifth Edition 2020”, Universidade Federal do Rio de Janeiro Niterói, Rio de Janeiro, Brazil [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://picture.iczhiku.com/resource/eetop/WYiRoZIFhjsRrXmN.pdf>
12. Matteo Torcoli, Thorsten Kastner, Jürgen Herre, Senior Member, IEEE, “Objective Measures of Perceptual Audio Quality Reviewed: An Evaluation of Their Application Domain Dependence”, IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing (Volume: 29) , 1530-1541 (2021) [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://arxiv.org/pdf/2110.11438>

13.ITU-T Recommendation P.862, “Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs”, Switzerland Geneva, 2001, ITU-T P.862 (02/2001) [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:

<https://futureblue.com/voice/itu/ORIGINAL/P/T-REC-P.862-200102-I!!SOFT-ZST-E.zip>

14.James M. Kates, Kathryn H. Arehart , ”The Hearing-Aid Audio Quality Index (HAAQI)”, IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing (Volume: 24, Issue: 2, February 2016) [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4849486/pdf/nihms750308.pdf>

ДОДАТОК А

Доступ до програмного обладнання в середовищі MATLAB

Matlab (PESQ+HAAQI measurements) Interference, noise, distortion compensating by adaptive methods (LMS,RLS,Volterra LMS,, Blind, Kalman) (with huge ability of configuration self) in voice communication – Режим доступу до ресурсу:

<https://github.com/KEHOL/PESQ-HASQI/releases/tag/AdaptiveFiltering>

ДОДАТОК Б

Блок схема PESQ

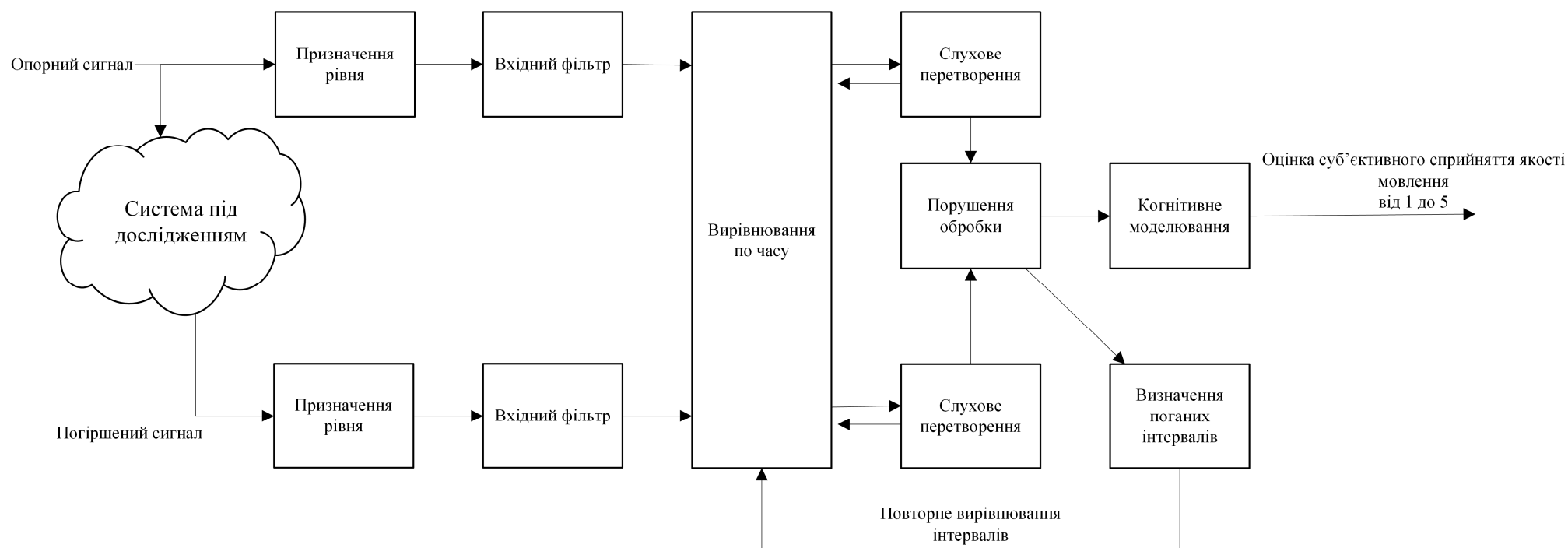


Рисунок.Б.1 – блок-схема PESQ

ДОДАТОК В

Блок схема HASQI



Рисунок.В.1 – блок-схема HASQI

ДОДАТОК Г

Таблиця вивід дискретизації 16кГц відносно метрики PESQ

Matlab (PESQ+HAAQI measurements) Interference, noise, distortion compensating by adaptive methods (MLS,RLS,Volterra LMS,, Blind, Kalman) (with huge ability of configuration self) in voice communication – Режим доступу до ресурсу:

https://github.com/KEHOL/PESQ-HASQI/blob/table-16-kHz-HASQI/16%20kHz%20PESQ_Exit_Information_tables.xlsx

ДОДАТОК Д

Таблиця вивід дискретизації 16кГц відносно метрики HASQI

Matlab (PESQ+HAAQI measurements) Interference, noise, distortion compensating by adaptive methods (LMS,RLS,Volterra LMS, Blind, Kalman) (with huge ability of configuration self) in voice communication – Режим доступу до ресурсу:

https://github.com/KEHOL/PESQ-HASQI/blob/table-16-kHz-HASQI/16%20kHz%20HASQI_Exit_Information_tables.xlsx

ДОДАТОК Ж

Таблиця вивід дискретизації 48кГц відносно метрики HASQI

Matlab (PESQ+HAAQI measurements) Interference, noise, distortion compensating by adaptive methods (LMS,RLS,Volterra LMS, Blind, Kalman) (with huge ability of configuration self) in voice communication – Режим доступу до ресурсу:

https://github.com/KEHOL/PESQ-HASQI/blob/table-16-kHz-HASQI/48%20kHz%20HASQI_Exit_Information_tables.xlsx

ДОДАТОК 3

Таблиця вивід дискретизації 48кГц відносно метрики
HASQI модифікацією сегментування.

Matlab (PESQ+HAAQI measurements) Interference, noise, distortion
compensating by adaptive methods (LMS,RLS,Volterra LMS, Blind, Kalman)
(with huge ability of configuration self) in voice communication – Режим доступу
до ресурсу:

<https://github.com/KEHOL/PESQ-HASQI/blob/table-16-kHz->

HASQI/48%20kHz%20Modificated%20HASQI_Exit_Information_tables.xlsx