ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «**ПОБУДОВА АДАПТИВНОГО КОРЕКТОРА МОДЕМУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ПРИЙМАЛЬНОГО КАНАЛУ**»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

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

_____ Денис ОСИФЛЯК
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

Виконав здобувач вищої освіти гр.ТСДМ-63 Денис ОСИФЛЯК

_____

Керівник: ктн, доцент Михайло МАЛЮЖЕНКО

_____

Рецензент:

_____

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра Телекомунікаційних систем та мереж
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Телекомунікаційних систем та мереж
_____Віктор ЗАЇКА
«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Осифляку Денису Петровичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: **:** «Побудова адаптивного коректора модему передачі даних приймального каналу»
керівник кваліфікаційної роботи Михайло МАЛЮЖЕНКО, КТН, доцент
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «30» жовтня 2025 р. № 467.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2025 р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Загальні принципи адаптивної фільтрації.
   2. Особливості передачі сигналів з допомогою адаптивної корекції.
   3. Аналіз роботи наявних пристроїв адаптивної корекції.
   4. Алгоритми адаптивної корекції.
   5. Ехо сигнали та адаптивна корекція.
   6. Ідентифікація електронних каналів.
   7. Моделювання адаптивних коректорів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
   1. Обґрунтування необхідності адаптивних фільтрів.
   2. Принципи використання адаптивних коректорів.
   3. Алгоритми які використовуються в адаптивній корекції.
   4. Можливості практичного використання та моделювання адаптивних фільтрів.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: Презентація на слайдах

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір та аналіз науково-технічної літератури	10.10.2025	Викон.
2	Історія адаптивної корекції в цифровій обробці сигналів	20.10.2025	Викон.
3	Різновиди адаптивних фільтрів та їх алгоритми та основи підрахунків	15.11.2025	Викон.
4	Моделювання адаптивних фільтрів за допомогою MatLab та LabVIEW	30.11.2025	Викон.
5	Висновки, вступ, реферат	10.12.2025	Викон.
6	Розробка презентації	20.12.2025	Викон.

Здобувач вищої освіти Денис ОСИФЛЯК

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи Михайло МАЛЮЖЕНКО

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій
ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Осифляк Д.П. до захисту кваліфікаційної
(прізвище та ініціали)
роботи

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)
на тему: «Побудова адаптивного коректора модему передачі даних приймального каналу».

Магістерська робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Осифляк Денис Петрович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти новими комп'ютерними технологіями, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які були поставлені керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до наукової роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувачем Осифляком Денисом Петровичем на оцінку «**добре**» та присвоїти йому кваліфікацію «магістр з електронних комунікацій та радіотехніки»

Керівник роботи Михайло МАЛЮЖЕНКО
(підпис) *(Ім'я,ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 2025 року

Висновок кафедри по магістерській роботі

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Осифляк Д.П. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедрою Телекомунікаційних систем та мереж Віктор ЗАЇКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього ступеня магістра

Здобувача вищої освіти Осифляка Дениса Петровича
(прізвище, ім'я, по батькові)
на тему «Побудова адаптивного коректора модему передачі даних приймального каналу»

Актуальність: Цифрова обробка сигналів (ЦОС) сьогодні широко використовується в радіо локаційних і радіонавігаційних системах, системах радіо, провідному і оптичному зв'язку; в обчислювальній та побутової техніці. Це обумовлено величезними теоретичними досягненнями за останні шість десятиліть в ЦОС, а також технологічними досягненнями електронної техніки, дозволяють створювати одночасно компактні і високопродуктивні цифрові пристрої для реалізації алгоритмів ЦОС у реальному масштабі часу.

Позитивні сторони: Виходячи з проведених досліджень у роботі отримано важкодоступну інформацію про адаптивну фільтрацію сигналів та про адаптивну фільтрацію на приймальному каналі модему передачі даних. . Більшість пристроїв зараз використовують адаптивні фільтри. Від складних пристроїв, наприклад ЕКГ(електрокардіограма) в вузько спрямованому спектрі, до массового використання наприклад, телевізори.

Недоліки: 1. Більш детально треба було сформулювати, чим відзначаються специфікації вимог при проектуванн НІХ-фільтрів й СІХ-фільтрів.

2.Не чітко був сформулйований критерій роботи адаптивного фільтра.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку магістерській кваліфікаційної роботи

Висновок: *кваліфікаційна робота заслуговує оцінку "***добре***", а здобувач Осифляк Денис Петрович заслуговує присвоєння кваліфікації: Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки*.

Рецензент
науковий ступінь, вчене звання _____ (підпис) _____ *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: ___стор., ___ рис., ___ табл., ___ джерел.

Мета роботи-дослідити застосування адаптивних фільтрів.

Предмет дослідження-можливості адаптивних фільтрів.

Об'єкт дослідження – адаптивні фільтри.

Проведений аналіз можливостей адаптивних фільтрів:

Адаптивний коректор дуже важлива частина яка дозволяє автоматично підлаштовуватись до параметрів прийму сигналів. Адаптивні коректори застосовуються для корекції амплітудних і фазових спотворень, що викликаються міжсимвольними спотвореннями сигналу та не достатками апаратури для прийому і передачі сигналу. Для цього є різні способи вирішення цієї проблеми. Наприклад зменшення швидкості передавання даних, розширити смугу пропускання або ж скоректувати частотну характеристику щоб вона наближалась до ідеальної форми.

Для усунення цих спотворень на приймальному кінці каналу встановлюється коректор. Коректор являє собою фільтр на лініях затримки, ваги якого вибираються під час тренування або навчання, коли по каналу зв'язку надсилаються спеціальні тестові сигнали. Після періоду навчання характеристики коректора встановлюються такими, при яких спотворення каналу стають мінімальними.

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

АДАПТИВНІ ФІЛЬТРИ ТА ЕКВАЛАЙЗЕРИ, LMS, RLS, NLMS, МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АДАПТИВНОЇ КОРЕКЦІЇ.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work for obtaining the educational degree of master: ___ pages, ___ figures, ___ tables, ___ sources.

The object of research is adaptive filters.

The subject of the study is the use of adaptive filters in modems and other devices.

The purpose of the study is to study the operation of adaptive filters on the receiving channel of a data transmission modem.

Research methods are to identify the possibilities of using various adaptive filter algorithms.

There are various ways to solve this problem. For example, reducing the data transfer rate, expanding the bandwidth, or adjusting the frequency response to make it closer to an ideal shape.

To eliminate these distortions, an equalizer is installed at the receiving end of the channel. The equalizer is a filter on the delay lines, the weights of which are selected during training or learning, when special test signals are sent over the communication channel. After

During the training period, the characteristics of the corrector are set to such that channel distortions become minimal.

KEYWORDS:

ADAPTIVE FILTERS AND EQUALIZERS, LMS, RLS, NLMS, POSSIBILITIES OF USING ADAPTIVE CORRECTION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ……..…..8

ВСТУП ……...9

1 **ВВЕДЕННЯ В АДАПТИВНУ КОРЕКЦІЮ** ……...11

1.1 Основи адаптивної корекції ……11

1.2 Функції адаптивної корекції ……15

1.3 Вимоги до адаптивних фільтрів ……21

1.4 Адаптивна корекція і PNM(Proactive Network Maintenance)…….……28

2 **РІЗНОВИДИ АДАПТИВНИХ ФІЛЬТРІВ ТА ЇХ АЛГОРИТМИ**..30

2.1 Компенсація ехо сигналів ……..30

2.2 Зворотна ідентифікація об’єкта та вирівнювання характеристик електричних каналів……...38

3 **ПРОЕКТУВАННЯ АДАПТИВНИХ ФІЛЬТРІВ** …….45

3.1 Моделювання адаптивних фільтрів за допомогою додатків DSP System Toolbox мови MATLAB ……...47

3.2 Нестандартні програмні засоби для моделювання адаптивних фільтрів на мові MATLAB ……52

3.3 Моделювання додатків адаптивної фільтрації за допомогою Adaptive Filter Toolkit середовища розробки LabVIEW ……....53

ВИСНОВКИ ……64

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ ……...65

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ……....66

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ……..…..8

ВСТУП ……...9

1 **ВВЕДЕННЯ В АДАПТИВНУ КОРЕКЦІЮ** ……...11

1.1 Основи адаптивної корекції ……11

1.2 Функції адаптивної корекції ……15

1.3 Вимоги до адаптивних фільтрів ……21

1.4 Адаптивна корекція і PNM(Proactive Network Maintenance)…….……28

2 **РІЗНОВИДИ АДАПТИВНИХ ФІЛЬТРІВ ТА ЇХ АЛГОРИТМИ**..30

2.1 Компенсація exo сигналів ……..30

2.2 Зворотна ідентифікація об’єкта та вирівнювання характеристик електричних каналів……...38

3 **ПРОЕКТУВАННЯ АДАПТИВНИХ ФІЛЬТРІВ** …….45

3.1 Моделювання адаптивних фільтрів за допомогою додатків DSP System Toolbox мови MATLAB ……...47

3.2 Нестандартні програмні засоби для моделювання адаптивних фільтрів на мові MATLAB ……52

3.3 Моделювання додатків адаптивної фільтрації за допомогою Adaptive Filter Toolkit середовища розробки LabVIEW ……....53

ВИСНОВКИ ……64

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ ……...65

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ……....66

ВСТУП

Цифрова обробка сигналів (ЦОС) сьогодні широко використовується в радіо локаційних і радіонавігаційних системах, системах радіо, провідному і оптичному зв'язку; в обчислювальній та побутової техніці. Це обумовлено величезними теоретичними досягненнями за останні шість десятиліть в ЦОС, а також технологічними досягненнями електронної техніки, дозволяють створювати одночасно компактні і високопродуктивні цифрові пристрої для реалізації алгоритмів ЦОС у реальному масштабі часу. Такий тривалий розвиток теорії і практики ЦОС призвело до виникнення в цій області знань ряду самостійних науково-технічних направлень. Адаптивна обробка сигналів - це одне з таких напрямків. Адаптивна обробка сигналів зароджувалася в середині минулого століття. Однак коріння використовуваних в ній математичних методів йдуть в більш далеке минуле. Потім ці методи були використані Вінером, Колмогоровим, Крейном, Левинсоном і рядом інших вчених для формування основних принципів адаптивної обробки сигналів.

Використання адаптивної обробки сигналів на практиці людство зобов'язане Бернарду Уїдроу (Bernard Widrow), який в кінці 50-х років минулого століття розробив і реалізував перший адаптивний фільтр на базі Least Mean Square (LMS) алгоритму, також відомого як алгоритм за методом найменшого квадрата (МНК). Коли ж потрібно використовувати адаптивну обробку сигналів, під якою зазвичай розуміється адаптивна фільтрація? Тоді, коли з поставлений ним завданням не можуть впоратися фільтри з фіксованими параметрами. Як правило, це випадки коли умови фільтрації змінюються, а тому вимоги до параметрів фільтра не можуть бути сформульовані заздалегідь. Адаптивний фільтр - це фільтр з перебудованими ваговими коефіцієнтами (ВК). Залежно від розв'язуваної задачі він може бути одноканальним або багатоканальним, мати дійсні або комплексні ВК. Алгоритми обчислення ВК можуть бути простими, як, наприклад, LMS-алгоритм, або складними, як, наприклад, Recursive Least Squares (RLS) алгоритм, також відомий як рекурсивний метод найменших квадратів (РМНК). Сьогодні існує величезна кількість радіоелектронних виробів, показники роботи яких

немислимі без використання адаптивних фільтрів.

Прикладами таких виробів є адаптивні антенні решітки, адаптуюся компенсатори сигналів електричного і акустичного відлуння, адаптивні еквалайзери (вирівнювачі) електричних характеристик каналів зв'язку, адаптивні компенсатори шумів і ряд інших пристроїв. Адаптивні фільтри, що входять до складу цих пристроїв, в залежності від використовуваного алгоритму обчислення ВК демонструють різну функціональну ефективність. Для відповіді на питання, чому це так і від чого це залежить, необхідно розуміти, що являє собою адаптивна фільтрація сигналів з математичної точки зору. Відповіді на ці запитання містяться в численних публікаціях в періодичних виданнях, працях науково-технічних конференцій і технічних книгах, присвячених адаптивній обробці сигналів, в основному на англійській мові і важкодоступних більшості українських читачів.

1 ВВЕДЕННЯ В АДАПТИВНУ КОРЕКЦІЮ

1.1 Основи адаптивної корекції

Згідно з різними оцінками на сьогоднішній день в науково-технічних журналах і працях науково-технічних конференцій налічується більше 10 тисяч публікацій, які висвітлюють різні питання теорії і практики адаптивної обробки сигналів. Таке число публікацій свідчить про величезні теоретичні здобутки в цій області, що знайшли своє відображення в адаптивних пристроях, що застосовуються на протязі вже багатьох десятиліть в різних радіоелектронних виробах. Прикладами адаптивних пристроїв є компенсатори сигналів електричного і акустичного відлуння, еквалайзери (вирівнювачі) характеристик електричних і акустичних каналів зв'язку, адаптивні антенні і акустичні решітки. Сьогодні можна констатувати той факт, що адаптивні пристрої - це невід'ємні елементи обладнання сучасних радіотехнічних систем і систем зв'язку, тактико-технічні характеристики яких часом недосяжні без використання адаптивної обробки сигналів. Дійсно, сигнали ближнього і далекого відлуння є джерелами перешкод для модемів, що працюють в дуплексному режимі, а міжсимвольна інтерференція є джерелом перешкод в каналах зв'язку з обмеженою пропускною здатністю. Для досягнення модемами високих швидкостей передачі і прийому цифрових даних ці перешкоди повинні бути придушені, що здійснюється за допомогою адаптивних луна-компенсаторів і еквалайзерів.

Позитивний зворотний акустичний зв'язок, що виникає в обладнанні озвучування приміщень (концертні зали, зали для нарад) і в пристроях голосового зв'язку («hands-free»), усувається за допомогою адаптивних компенсаторів сигналів акустичного відлуння. Вирівнювання акустичних характеристик приміщень при використанні обладнання високоякісного відтворення звуку здійснюється за допомогою адаптивних еквалайзерів.

Придушення активних перешкод, частотний діапазон яких збігається з частотним діапазоном корисного сигналу, в радіолокації, гідролокації і зв'язку здійснюється за допомогою адаптивних антенних і акустичних решіток.

Ці решітки є просторовими фільтрами. Вони забезпечують придушення сигналів

перешкод, направлення на джерела яких відрізняються від напрямку на джерело корисного сигналу.

Практичні результати адаптивної обробки сигналів багато в чому сьогодні зобов'язані технологічним досягненням в електроніці і мікроелектроніці, завдяки яким з'явилися одночасно високопродуктивні і компактні цифрові пристрої на базі програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) і надвеликих інтегральних схем (НВІС) цифрових сигнальних процесорів (ЦСП). Ці пристрої забезпечують реалізацію складних алгоритмів ЦОС в реальному масштабі часу тобто на необхідній частоті дискретизації оброблюваних сигналів.

Таким чином, багаторічні теоретичні та практичні досягнення в адаптивної обробки сигналів дозволяють вважати її сформованим науково-технічним напрямком в сучасних радіотехніці і зв'язку. В основі більшості штучних адаптивних пристроїв лежить адаптивний фільтр.

Фільтрація сигналів - це така їх обробка, метою якої є отримання інформації яку нам потрібно, наприклад сигналів, що володіють певними характеристиками. Обробка сигналів може виконуватися як аналоговим, так і цифровим способом.

Відомо, що властивості цифрового фільтра з фіксованими параметрами зазвичай визначаються його функцією передачі. У свою чергу, передавальна функція визначає структуру фільтра і його обчислювальну складність. Якщо вимоги до передавальної функції неможливо сформулювати заздалегідь або ці вимоги можуть змінюватися в процесі роботи фільтру, то замість фільтра з фіксованими параметрами необхідно використовувати фільтр із змінними параметрами, наприклад адаптивний.

Так як параметри адаптивного фільтра змінюються в процесі його роботи, то очевидно, що такий фільтр є нелінійним пристроєм. Однак при кожному фіксованому значенні параметрів адаптивний фільтр являє собою лінійне пристрій, так як між його вхідними і вихідними сигналами зазвичай існує лінійна залежність, яка визначається поточним набором ВК, подібно лінійним фільтрам з фіксованими параметрами.

Таким чином, адаптивний фільтр - це фільтр із змінними в процесі роботи параметрами, набір яких багато в чому залежить від критерію роботи адаптивного фільтра. Цим критерієм часто є досягнення мінімуму деякої цільової функції, як

правило, квадратичної функції помилки між так званим необхідним і вихідним сигналами адаптивного фільтра. Досягнення мінімуму цільової функції означає, що вихідний сигнал адаптивного фільтра «близький» до необхідного сигналу тобто повторює за формою цей сигнал.

Вихідний сигнал адаптивного фільтра наближається до необхідного сигналу за рахунок зміни ВК, що розраховуються на основі обробки необхідного і вхідного (вхідних в багатоканальному випадку) сигналів.

У сталому режимі значення ВК відповідають мінімуму цільової функції або знаходяться в невеликій околиці цього мінімуму. Так як стан адаптивного фільтра змінюється в процесі налаштування ВК, то вважається, що він пристосовується або адаптується до існуючих умов функціонування. Тому і такий фільтр, і алгоритм обчислення його ВК називають адаптивними.

Обчислення вихідного сигналу адаптивного фільтра, і алгоритми обчислення його ВК. Сукупність даних алгоритмів будемо рівнозначно називати або адаптивним фільтром, або адаптивним алгоритмом.

Аналіз адаптивних фільтрів як нелінійних пристроїв є більш складним, ніж аналіз фільтрів з фіксованими параметрами. Але адаптивні фільтри є самоналаштуванні і з цієї точки зору вони простіші, так як не вимагають використання складних і ресурсномістких методів розрахунку, що застосовуються при синтезі фільтрів з фіксованими ВК.

Якщо умови функціонування змінюються, то адаптивний фільтр може ці зміни в деякій мірі відслідковувати. При цьому слід розуміти, що адаптивний фільтр і слідкуюча система - це не зовсім одне й те саме. Адаптивний фільтр, подібно фільтрам з фіксованими ВК, характеризується тривалістю перехідного процесу. Якщо зміни в системі повільні, тобто відбуваються за час, що істотно перевищує тривалість перехідного процесу адаптивного фільтра, то цей фільтр такі зміни, як правило, відстежує. У міру ж збільшення швидкості змін в системі ефективність адаптивного фільтра падає, так як за час зміни він не встигає «Повністю налаштуватися», тобто перейти в установлений режим, коли його перехідний процес вважається закінченим.

У загальному випадку одноканальний адаптивний фільтр являє собою пристрій, показане на рис. 1.1. Тут x (k) - вхідний сигнал, d (k) -потрібний сигнал (який

використовується в позначенні символ «d» відбувається
від англійського слова «desired», тобто потрібного), y (k) - вихідний сигнал,
a (k) = d (k) -y (к) - сигнал помилки, k - індекс дискретного часу або номер відліку оброблюваного сигналу. Ці відліки зазвичай рівномірно розподілені на осі часу як t = kTs = k / Fs, де Ts - період дискретизації, а Fs - частота дискретизації оброблюваних сигналів. Тривалість однієї ітерації адаптивного алгоритму, таким чином час, протягом якого здійснюється розрахунок ВК, використовуваних для обчислення вихідного сигналу адаптивного фільтра на наступній ітерації, в більшості випадків дорівнює одному періоду дискретизації. Якщо розрахунок ВК ведеться повільно, тобто протягом декількох періодів дискретизації, то формування сигналу y (k) все одно необхідно здійснювати на кожному періоді дискретизації для задоволення вимог теореми Котельникова.Розрізняють чотири основних способи побудови комутованих телефонних мереж: "кожна з кожною", радіальний, радіально-вузловий і комбінований.

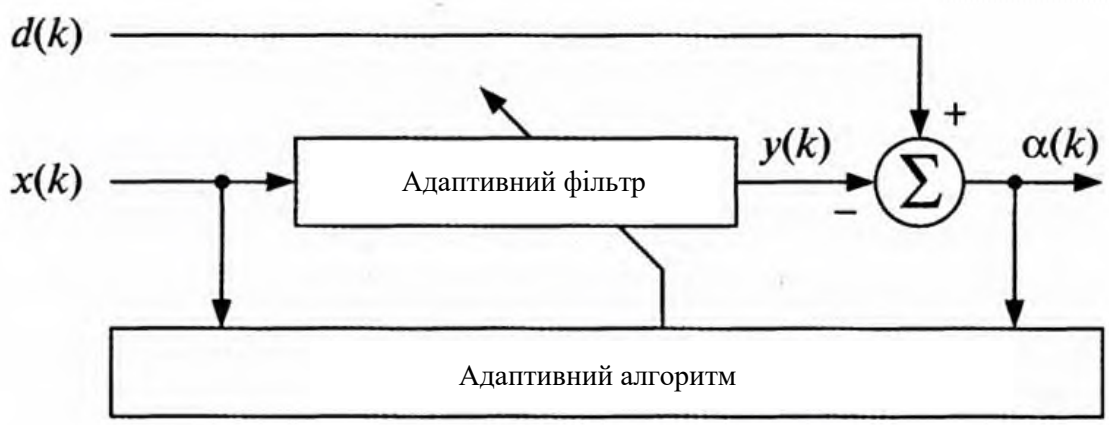


Рис 1.1 Адаптивний фільтр

Для роботи адаптивного фільтра, як правило, недостатньо інформації, одержуваної тільки з вхідного сигналу. Джерелом інформації, якої бракує зазвичай служить необхідний сигнал d (k), фізична природа якого визначається конкретним додатком адаптивного фільтра. Додаток є одним з факторів, що визначають вимоги, що пред'являються до адаптивного фільтру на етапі його проектування.

1.2 Функції адаптивної корекції

Системи цифрового зв'язку призначені для високошвидкісної передачі даних по каналах з обмеженою пропускною здатністю, наприклад низхідним каналах шириною 6 МГц або висхідним каналах шириною 6,4 МГц, які схильні до різних спотворень. Наявність спотворення в каналі призводить до так званої міжсимвольної інтерференції (ISI), яка може викликати помилки передачі даних. Одним із способів компенсації або зменшення ISI є включення адаптивного коректора в приймач або передавач. Якщо характеристики каналу відомі і не змінюються з часом, можна використовувати еквалайзери з фіксованим значенням. Однак в типовій кабельної мережі шлях проходження сигналу між головною станцією і кожним кабельним модемом (або цифровий приставкою) унікальний, тому універсальний фіксований еквалайзер недоцільний. Крім того, спотворення, що викликають ISI, можуть з часом змінитися, тому еквалайзер повинен якимось чином регулюватися, щоб компенсувати зміни в стані каналу. Найчастіше для цього використовуються адаптивні еквалайзери.

Давайте спочатку подивимося на концепцію вирівнювання з точки зору кабельної розподільної мережі (див. Рис. 1.2). Як відомо, в коаксіальному кабелі даної довжини більш високі частоти послаблюються сильніше, ніж більш низькі частоти. Наприклад, якщо всі, хто сходить сигнали в діапазоні, скажімо, від 50 до 870 МГц мають однакову амплітуду на виході підсилювача, ми говоримо, що загальна частотна характеристика- технічно кажучи, амплітуда (або величина) щодо частоти - плоска. На той час, коли плоска група сигналів пройде через коаксіальний кабель до наступного підсилювача, вона буде нахилена через більшу загасання на більш високих частотах, ніж на більш низьких частотах. Щоб знову отримати плоский похилий спектр, ми повинні підключити еквалайзер з фіксованим значенням на другому підсилювачі. Еквалайзер є невеликою пасивною схемою, яка має амплітудно-частотну характеристику, протилежну довжині коаксіального кабелю, що передує підсилювача. По суті, еквалайзер – це широкосмуговий фільтр, який усуває похилий відгук у робочій смузі пропускання, що призводить до рівного спектру амплітуди в залежності від частоти на внутрішніх каскадах посилення другого підсилювача.

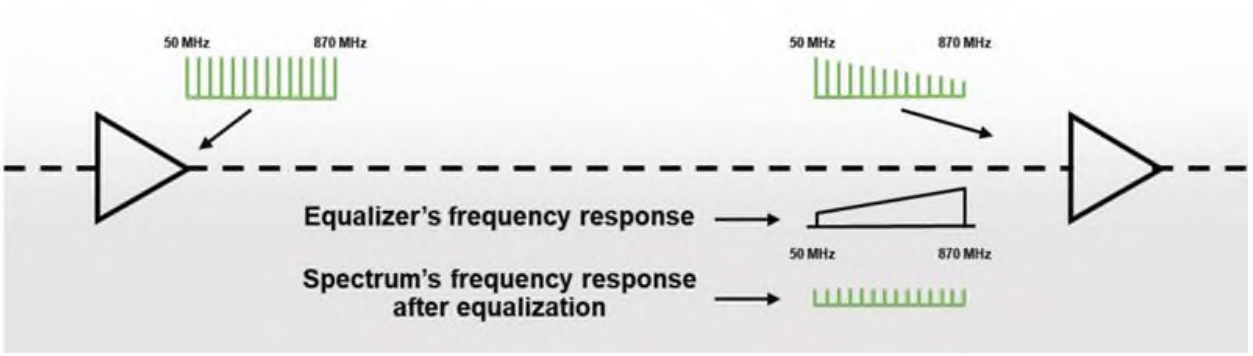


Рис. 1.2 Концепція вирівнювання кабельної розподільної мережі

Адаптивна корекція виконує функцію, аналогічну функції підключення еквалайзера з фіксованим значенням кабельного підсилювача. Замість того, щоб вирівнювати весь РЧ-спектр в низхідному або висхідному напрямку, він працює тільки з одним каналом. Адаптивний означає, що еквалайзер може змінювати свої характеристики при зміні стану каналу.

Адаптивний коректор - це цифрова схема, яка компенсує внутрішньо канальні комплексні спотворення частотної характеристики цифрового сигналу. У кабельній промисловості давно використовується термін «частотна характеристика» для опису амплітуди (або величини) щодо частоти, тобто того, що видно на дисплеї випробувального устаткування, використовуваного для сканування за межами підприємства. Справжня частотна характеристика - це складний об'єкт, що складається з двох компонентів: залежності амплітуди від частоти і залежності фази від частоти. Адаптивний коректор може компенсувати внутрішньо канальні спотворення амплітуди і фази щодо частоти.

Адаптивні коректори використовують складні алгоритми для отримання коефіцієнтів для вирішення еквалайзера «на льоту» - в результаті створюється цифровий фільтр з по суті протилежної складної частотної характеристикою порушеного каналу. Оскільки складна частотна характеристика адаптивного коректора по суті є дзеркальним відображенням комплексної частотної характеристики порушеного каналу, еквалайзер компенсує більшу частину або всю погіршену частотну характеристику в каналі, яка впливає на цифровий сигнал - в межах можливостей адаптивного коректора. (Важливо відзначити, що при високому відношенні сигнал / шум або $\frac{E_s}{N_0}$ адаптивний еквалайзер синтезує протилежний відгук каналу. При більш низькому SNR (відношення потужності

корисного сигналу до потужності шуму) - це призведе до збільшення шуму, тому знайдено компромісне рішення.)

Якщо внутрішньо канальне погіршення раптово зміниться або зникне, адаптивний еквалайзер буде спотворювати сигнал до тих пір, поки не будуть отримані нові коефіцієнти еквалайзера для поточних умов каналу і робота еквалайзера не оновиться. На щастя, цей процес адаптації відбувається дуже швидко і зазвичай займає мілісекунди.

Щоб алгоритми адаптивного еквалайзера почали процес отримання коефіцієнтів, які будуть використовуватися для створення «фільтра», комплексна частотна характеристика якого протилежна комплексної частотної характеристики каналу, еквалайзер запускається з джерела адаптації. Джерелом адаптації може бути передана навчальна послідовність або сам сигнал.

Передана навчальна послідовність: в звичайних коректорах з примусовим обнулінням або мінімальної середньоквадратичної помилкою (MSE) відома навчальна послідовність передається в приймач з метою початкового налаштування коефіцієнтів коректора. У DOCSIS ® процесу попереднього вирівнювання вгору за течією, передачі даних від усіх кабельних модемів включають в себе преамбулу на початку кожного пакета. Преамбула використовується в якості навчального сигналу для адаптивного еквалайзера висхідній кінцевої системи кабельного модему (CMTS).

Сам сигнал: еквалайзери, які не покладаються на передані навчальні послідовності для початкової настройки коефіцієнтів, називаються самовідновлюються або сліпими еквалайзер. Адаптивний еквалайзер в низхідному приймачі кабельного модему DOCSIS (або цифрової приставки) являє собою сліпий еквалайзер. У разі кабельних модемів DOCSIS не визначає навчальну послідовність в низхідному сигналі.

Як згадувалося раніше, алгоритми використовуються для автоматичної настройки коефіцієнтів еквалайзера для досягнення оптимальної продуктивності і для швидкої адаптації до постійно змінюваних характеристик каналу. Загальні критерії для визначення оптимальної продуктивності включають мінімізацію пікових спотворень на виході еквалайзера або мінімізацію MSE на виході еквалайзера. Іншими словами, алгоритм регулює коефіцієнти еквалайзера на

льоту, щоб прийти до рішення, яке найкраще знижує, скажімо, MSE, що покращує коефіцієнт помилок модуляції прийому (RxMER).

Важливим параметром адаптивного еквалайзера є його діапазон, який безпосередньо пов'язаний з максимальною величиною тимчасової затримки в мікро відображення, яке можна компенсувати. Якщо відгук каналу містить відображення (викликане невідповідністю імпедансу), яке має велику тимчасову затримку, ніж діапазон еквалайзера, еквалайзер не може компенсувати це відображення.

На Рис 1.3 показана блок-схема універсального адаптивного еквалайзера. Верхній ряд з полями, позначеними Z-1, можна розглядати як лінію затримки з відведенням. Кожен прямокутник, позначений Z-1, є елементом затримки з величиною тимчасової затримки на «прямокутник», рівній зворотного швидкості передачі символів в еквалайзері з Т-рознесенням. Елемент затримки часто називають відведенням, але відведення також можна розглядати як комбінацію елемента затримки, точки, в якій частина сигналу «відводиться», і множника. Осередки з позначеннями b-2, b-1, b0 і так далі є множниками з коефіцієнтами вирівнювання, які встановлюють посилення для кожного відгалуження. Алгоритм регулює коефіцієнти вирівнювання, які встановлюють посилення для кожного множника. Гуртки з позначкою Σ позначають підсумовують або об'єднують схеми.

Один відвід називається основним (виділено червоним на Рис 1.3). Основний відгалужувач має коефіцієнт посилення 1 і передає вхідний сигнал з його вихідної амплітудою. Інші відгалужувачі представляють або «минуле», або «майбутнє» щодо основного відгалужувача і при необхідності змінюють амплітуди відповідних сигналів, що проходять через них.

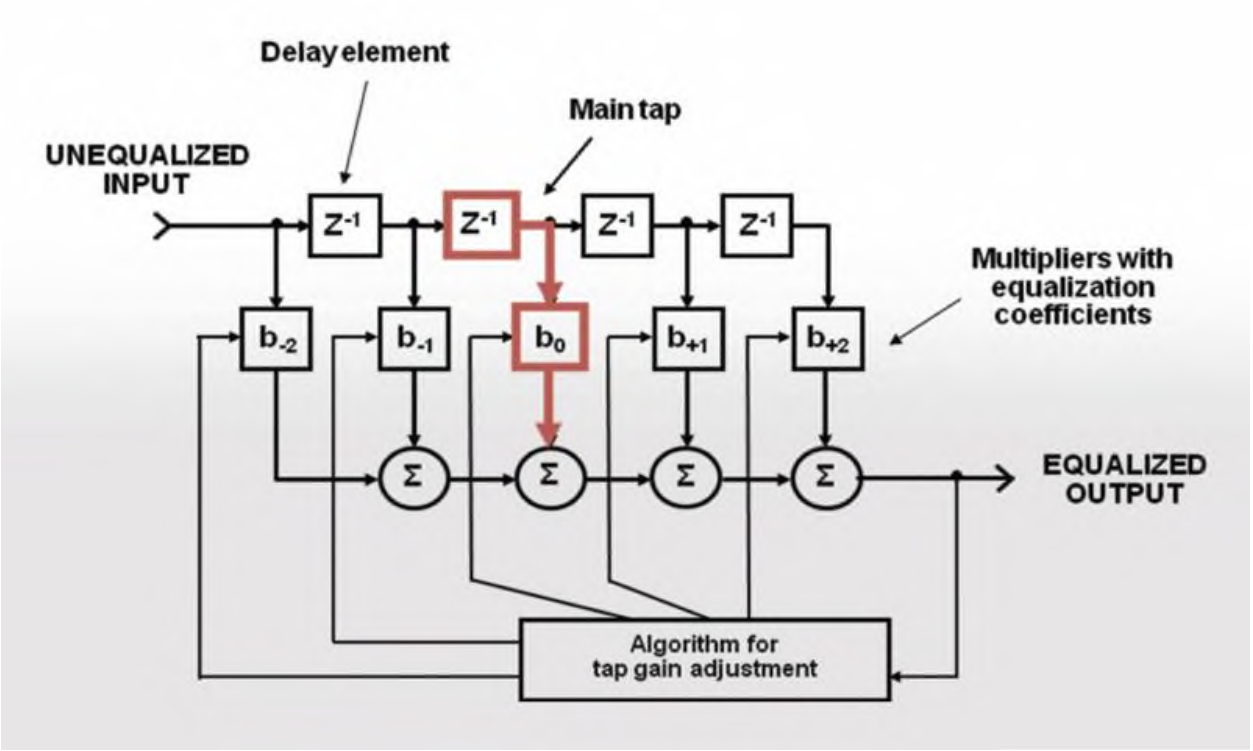


Рис. 1.3 Блок-схема універсального адаптивного еквалайзера

Аналоговий еквівалент того, що тут відбувається, виглядає приблизно так: Кожен з елементів затримки Z -1 в прикладі на Малюнку 2 еквівалентний приблизно 50.9 метрів коаксіального кабелю без втрат (РЧ-сигнал проходить через метр жорсткого коаксіального кабелю, тому 50.9 метрів коаксіального кабелю затримують сигнал приблизно на 195 наносекунд). Кожен множник «bn» еквівалентний змінному атенюатором. Атенюатор b0 налаштовується на відсутність загасання (одиничне посилення), а кожен з інших налаштовується на величину, яка визначається алгоритмом і результуючими коефіцієнтами. Кожну з схем підсумовування Σ можна розглядати як двосторонні роздільники в зворотному напрямку, що функціонують як об'єднувачі, за винятком того, що вони також вважаються «без втрат» в цьому прикладі. Майте на увазі, що цей аналоговий еквівалент - це просто еквівалент. Реальний адаптивний еквалайзер (або попередній еквалайзер) насправді являє собою цифрову схему, але ви можете думати про його роботі як про функціонально подібній аналогової схемою, яка об'єднує різні амплітуди і фази вхідної форми хвилі для досягнення бажаної вихідної форми хвилі.

Як згадувалося раніше, кабельний модем використовує сліпий адаптивний еквалайзер в низхідному приймачі QAM пристрої; вирівнювання виконується після прийому сигналу модемом. Кабельні модеми DOCSIS 1.1 і пізніших версій

здатні вирівнювати - або, точніше, попередньо вирівнювати - висхідний сигнал перед передачею. DOCSIS 1.1 підтримує попереднє вирівнювання висхідного потоку з 8 відводами, а DOCSIS 2.0 і 3.0 підтримують попереднє вирівнювання висхідного потоку з 24 відводами.

Ви можете запитати: «А навіщо в модемі попереднє вирівнювання?» Одна з причин полягає в тому, що шлях між кожним кабельним модемом і CMTS унікальний. Можливо, більш важливо те, що попереднє вирівнювання дозволяє модему виконувати більшу частину адаптивного вирівнювання перед передачею в висхідному напрямку, замість того, щоб покладатися на CMTS, щоб зробити всю роботу.

Попередня корекція в модемі здається хорошою ідеєю, але кабельний модем не має можливості дізнатися стан каналу між виходом його висхідного передавача і входом CMTS. Модем не може «бачити» канал, по якому передається висхідний цифровий модульований сигнал. Отже, як кабельний модем може правильно виконати попередню корекцію переданого висхідного сигналу?

Ось загальний огляд того, як працює попередня корекція висхідного потоку. Кабельний модем передає (серед іншого) пакети обслуговування станції в CMTS, яка використовує преамбулу повідомлення обслуговування станції з нерівномірним вирівнюванням (RNG-REQ) в якості «навчального сигналу» для процесу вирівнювання. Приймач пакетів висхідного потоку CMTS включає в себе адаптивний еквалайзер, який виводить коефіцієнти на основі погіршення каналу, що впливає на сигнал, що приймається.

Після узгодження рішення для прийнятого сигналу модему CMTS передає отримані коефіцієнти еквалайзера модему в повідомленні MAC RNG-RSP. Кабельний модем використовує ці коефіцієнти в своєму адаптивному еквалайзері висхідного потоку для попередньої корекції або попереднього спотворення переданого сигналу, так що, коли він приймається CMTS, теоретично він не буде спотворений.

1.3 Вимоги до адаптивних фільтрів

Основні вимоги до адаптивного фільтру визначаються такими складовими, як додаток, структура і алгоритм.

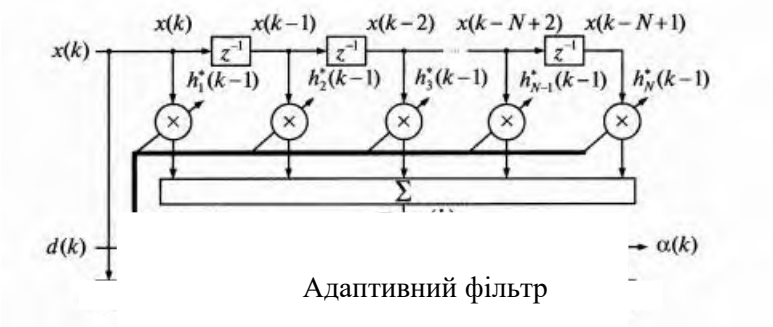
1. Додатки. Тип додатка визначається сигналами, які надходять з навколишнього середовища в якості вхідного *x (k)* і необхідного *d (k)* сигналів. Найбільш відомими і широко використовуваними застосуваннями адаптивних фільтрів є вже згадувані ехо-компенсатори, еквалайзери, адаптивні решітки і ряд інших пристроїв.

2. Структури адаптивних фільтрів. Подібно фільтрам з фіксованими ВК, існують дві основні структури адаптивних фільтрів. Це фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ), або трансверсально, і фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (НІХ), або рекурсивні. Структура одноканального адаптивного КІХ-фільтра наведена на рис. 1.4.

Вихідний сигнал *y (k)* адаптивного фільтра формується як лінійна комбінація затриманих відліків вхідного сигналу *x(k-n+1)*, взятих з вагами h_n *(k-1)*, що обчислюються на попередніх ітераціях *(k-1)* по відношенню до поточних ітераціям *k* , тобто як

$$y(k) = \sum_{n-1}^{N} h_n(k-1)x(k-n+1) = h_N^H(k-1)x_n(k),$$

Де N – число ВК фільтра, а $h_n^*(k-1) = [h_1(k-1), h_2(k-1), \dots, h_n(k-1), \dots, h_{N-1}(k-1), h_N(k-1)]^T$ – вектор ВК та $x_n(k-1) = [x(k),\ x(k-1),\ x(k-n+1), \dots, x(k-N+2),\ x(k-N+1)]^T$ – вектор сигналів в фільтрі. Порядок фільтру визначається як N-1, тобто по числу ліній затримки. Вектори $h_N(k)$ та $x_N(k)$ в загальному випадку є комплексними.



Адаптивний фільтр

Рис 1.4 Одноканальний адаптивний КІХ-фільтр

Верхній індекс T використовується для позначення операції транспонування вектору або матриці, а верхній індекс H - для позначення операції ермітовим сполучення, тобто транспонування і комплексного сполучення, що позначається символом *, елементів вектору або матриці.

Перший нижній індекс N в позначеннях векторів і матриць буде вказувати на число елементів у векторі або число елементів в квадратній матриці, яке визначається як N × N. Число елементів в прямокутної матриці буде позначатися двома першими нижніми індексами. Наприклад, запис A_{NM}^{T} означає операцію транспонування матриці A_{NM}, тобто матрицю. Таким чином, нижні індекси в позначенні матриць будуть вказувати на число елементів нетранспонованих матриць. У ряді випадків нижній індекс N також буде використовуватися в позначеннях скалярних змінних, вказуючи на те, що ці змінні є функціями від TV-мірних векторів для розрізнення однойменних скалярних змінних, що є функціями від (N + 1), N або (N- 1) -мірних векторів в швидких алгоритмах адаптивної фільтрації.

Вектори всюди будуть позначатися напівжирними малими символами, а матриці - напівжирними великими. Елементи матриць і векторів будуть позначатися відповідно звичайними малими і великими символами. Нижні індекси в елементах матриць і векторів будуть позначати номери цих елементів в матрицях і вектори відповідно до загальноприйнятої системі їх нумерації. В якості інших ознак в позначеннях векторів, матриць або їх елементів можуть бути використані різні символи в нижньому індексі, які прямують через кому після позначення розміру вектора або матриці або номерів їх елементів, а також символи в верхньому індексі. Одинична матриця (квадратна діагональна матриця з одиницями на головній діагоналі і нульовими іншими елементами) буде позначатися символом I_N нульові матриці (матриці, що містять тільки нульові елементи) - символами O_N і O_{NM}, одиничний вектор (вектор, що містить всі одиниці) – символом i_N а нульовий вектор (вектор, який містить лише нульові елементи) - символом 0_N. Під вектором зазвичай буде розумітися вектор-стовпець. Використовуючи вихідний сигнал адаптивного фільтра, можна обчислити сигнал апріорної помилки моделювання необхідного сигналу *d (k)* як

$$\alpha(k) = d(k) - y(k) = d(k) - h_N^H(k-1)x_N(k)$$

Сигнал апостеріорної помилки визначається при ВК, рівних $h_n(k)$, як

$$e(k) = d(k) - \hat{y}(k) = d(k) - h_N^H(k-1)x_N(k)$$

Як видно, терміни «апріорний» і «апостеріорного» пов'язані зі значеннями ВК адаптивного фільтра, що обчислюються відповідно на попередньої і поточної ітераціях алгоритму адаптивної фільтрації.

На практиці при роботі адаптивного фільтра на його виході спостерігаються апріорні помилки, так як поточне значення вихідного сигналу фільтра *y (k)* формується за значеннями ВК, обчисленим на попередній ітерації. Апостеріорні помилки зазвичай використовуються в алгоритмах обчислення ВК і при формуванні цільової функції роботи адаптивного фільтра, наприклад середньоквадратичної помилки (Mean Square Error, MSE) $F = E\{e(k)e^*(k)\} = E\{|e(k)|^2\}$, де $E\{\bullet\}$ - операція усереднення по ансамблю реалізацій . У разі КІХ-фільтрів така функція, є дійсною унімодальною квадратичною функцією в просторі дійсних або комплексних ВК, тобто характеризується єдиним мінімумом.

Будемо розглядати в основному адаптивні фільтри з комплексними ВК. Це обумовлено деякими математичними тонкощами, використовуваними при отриманні алгоритмів обчислення ВК для таких фільтрів, а також тим, що перехід від адаптивних алгоритмів для фільтрів з дійсними ВК до алгоритмів для фільтрів з комплексними ВК часто не очевидний, незважаючи на те, що він зводиться в основному до правильній розстановці операцій комплексного сполучення деяких змінних, використовуваних в алгоритмах.

Тому теорія адаптивної фільтрації буде використовуватись до фільтрів з комплексними ВК, так як в більшості літературних джерел адаптивні алгоритми розглядаються в основному для фільтрів з дійсними ВК. Перехід від опису фільтрів з комплексними ВК до опису фільтрів з дійсними ВК є тривіальним і зазвичай зводиться до виключення всіх операцій комплексного сполучення в матрицях, векторах і скалярних змінних.

В адаптивних антенні решітках (ААР) або ехо-компенсаторах і еквалайзерах обладнання цифрових систем зв'язку з квадратурної модуляцією обробляються комплексні сигнали. Це природним чином призводить до необхідності

використання адаптивних фільтрів з комплексними ВК. У загальному випадку адаптивні КІХ-фільтри можуть бути багатоканальними і при цьому утримувати неоднакове число ВК в каналах (рис. 1.5). вектор ВК такого М-канального адаптивного фільтра

$$h_N(k-1) = \left[h_{N_1}^T(k-1), h_{N_2}^T(k-1), \dots, h_{N_M}^T(k-1), \dots, h_{N_{M-1}}^T(k-1), h_{N_M}^T(k-1)\right]^T$$

утворюється з послідовності векторів ВК каналів

$$h_{N_m}(k) = \left[h_{1,m}(k-1), h_{2,m}(k-1), \dots, h_{n,m}(k-1), \dots, h_{N_m-1,m}(k-1), h_{N_m,m}(k-1)\right]^T,$$

а вектор сигналів $x_N(k) = \left[x_{N_1}^T(k), h_{N_2}^T(k), \dots, x_{N_M}^T(k), \dots, x_{N_{M-1}}^T(k), h_{N_M}^T(k)\right]^T$ – із послідовності векторів сигналів каналів $x_N(k) = [x_m(k), x_m(k-1), \dots, x_m(k-n_m+1), \dots, x_m(k-N_m+2), x_m(k-N_m+1)]^T$

Сумарне число ВК багатоканального фільтра визначається як $N = \sum_{m=1}^{M} N_m$.

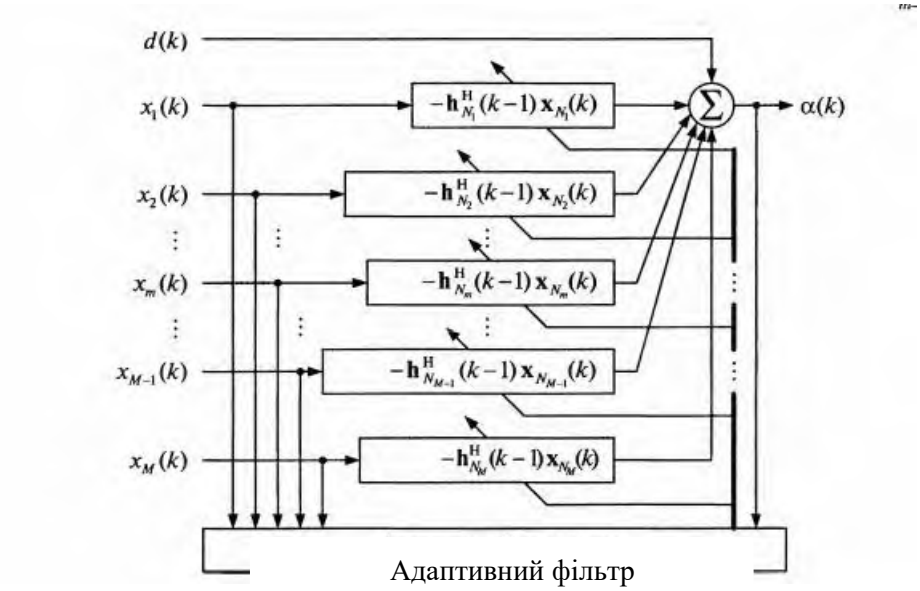


Рис. 1.5 Багатоканальний адаптивний КІХ-фільтр

Неоднакове число ВК в каналах багатоканального адаптивного фільтра, з одного боку, часто диктується фізичною природою завдання, а з іншого - обумовлено завжди існуючими обмеженнями на обчислювальну складність реалізації фільтрів. Так як в адаптивних фільтрах обчислювальна складність є функцією повного числа ВК N, то це число не слід збільшувати, якщо на те немає жодних причин, незважаючи навіть на те, що ряд алгоритмів, наприклад для багатоканальних адаптивних фільтрів з однаковим числом ВК в каналах , математично (алгоритмічно) «багато простіше» алгоритмів для фільтрів з

неоднаковим числом ВК в каналах.

Під обчислювальною складністю алгоритмів ЦОС, до яких належать і алгоритми адаптивної фільтрації сигналів, розуміється число арифметичних операцій (зазвичай складань, підрахунків, множення і ділення, а іноді і більш складних операцій, наприклад вилучення квадратних коренів), необхідних для виконання однієї ітерації алгоритму.

Слід зазначити дві приватні структури адаптивного фільтра (див. Рис. 1.4). Це багатоканальний фільтр з одним ВК ($N_m = 1, m = 1,2, \dots, M$) в кожному з каналів, який використовується в вузькосмугових ААР, і багатоканальний фільтр з однаковим числом ВК в каналах$N_1 = N_2 = \cdots = N_m > 1$, який використовується в широкосмугових акустичних решітках або багатоканальних компенсаторах сигналів акустичного відлуння. Структура багатоканального фільтра загального вигляду (див. Рис. 1.5) також використовується при реалізації нелінійних поліноміальних адаптивних фільтрів, в яких нелінійні ядра є наборами з багатоканальних фільтрів з числом ВК в каналах, змінним від $N_1 = 1$ до $N_m = N$ з кроком, рівним одному ВК. Крім того, компенсатор сигналів ближнього і далекого відлуння в модемах для дротових каналів зв'язку або еквалайзер зі зворотним зв'язком можна також розглядати як двоканальний адаптивний фільтр з неоднаковим числом ВК в каналах.

Адаптивні БІХ-фільтри на сьогоднішній день поки що не знайшли широкого застосування на практиці, так як, крім проблем зі стійкістю, їм властива проблема багатоекстремального (неунімодальності) цільової функції, що не дозволяє в загальному випадку гарантувати збіжність процесу обчислення ВК до глобального (найкращому) рішенням.

3. Алгоритми. Адаптивний алгоритм - це процедура обчислення ВК, що забезпечують мінімізацію цільової функції адаптивного фільтра, тобто виконання критерію його роботи. Алгоритм характеризується видом використовуваної цільової функції, методом пошуку оптимального рішення і природою сигналів помилок. В адаптивних алгоритмах, як правило, використовуються арифметичні операції як над апріорними, так і над апостеріорними помилками. Процедури обчислення вихідних сигналів адаптивного фільтра $y(k) = h_N^H(k-1)x_n(k)$ і $\hat{y}(k) = h_N^H(k)x_n(k)$, тобто власне фільтрація сигналів, також часто вважаються

складовими частинами адаптивного алгоритму.

Більшість обчислень в адаптивних алгоритмах є ітераційні процедури. Ці ітерації, як правило, збігаються за тривалістю з періодом дискретизації оброблюваних сигналів. При цьому обчислюються змінні оновлюються на кожній ітерації в результаті додавання деяких добавок до попередніх значень або віднімання цих добавок з попередніх значень.

Наприклад, обчислення ВК в адаптивному алгоритмі за критерієм найменшого середнього квадрата (Least Mean Square, LMS) виконується як

$$h_N(k) = h_N(k-1) + \mu x_n(k)\alpha^*(k),$$

тобто

$$\begin{Bmatrix}\text{Поточне}\\ \text{значення}\\ \text{вектору ВК}\end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix}\text{Попереднє}\\ \text{значення}\\ \text{вектору ВК}\end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix}\text{Крок}\\ \text{збіжності}\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}\text{Вектор}\\ \text{вхідних}\\ \text{сигналів}\end{Bmatrix}\{\text{помилка}\}.$$

У рекурсивних алгоритмах за критерієм найменших квадратів (Recursive Least Squares, RLS) обчислення ВК виконується як

$$h_N(k) = h_N(k-1) + g_N(k)\alpha^*(k),$$

тобто

$$\begin{Bmatrix}\text{Поточне}\\ \text{значення}\\ \text{вектору ВК}\end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix}\text{Попереднє}\\ \text{значення}\\ \text{вектору ВК}\end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix}\text{Вектор}\\ \text{коефіцієнтів}\\ \text{Калмана}\end{Bmatrix}\{\text{помилка}\}.$$

Тут поточні і попередні значення векторів ВК пов'язані з номерами ітерацій алгоритму k і k - *1*. В ряді інших алгоритмів, наприклад в алгоритмах на основі QR-розкладання і в сходових алгоритмах, також використовуються рекурсивні обчислення, пов'язані зі зміною порядку фільтра на одиницю на кожній ітерації по k.

Вибір адаптивного алгоритму зазвичай зумовлений низкою таких вимог, як тривалість перехідного процесу, що характеризує швидкість збіжності і стежать властивості адаптивного фільтра; значення залишкових помилок в усталеному режимі, що характеризує точність знаходження оптимального рішення; обчислювальна складність алгоритму, що характеризує складність його апаратної або програмної реалізації.

До цих вимог слід додати поняття алгоритмічної складності, під якою розуміється складність математичного уявлення алгоритмів, обумовлена

кількістю і різноманітністю математичних виразів (формул), що є, власне, алгоритмом. Алгоритмічна складність і арифметична складність в кінцевому підсумку впливають на складність реалізації алгоритмів.

З точки зору складності алгоритми адаптивної обробки сигналів можна умовно розділити на кілька груп. Існують обчислювально-прості алгоритми, тобто з малим числом арифметичних операцій на одну ітерацію.

Це алгоритми з лінійної обчислювальною складністю $O\ (N)$ і малої алгоритмічної складністю. Такі алгоритми зазвичай описуються всього лише кількома простими математичними виразами. Прикладами простих алгоритмів є LMS-алгоритм і інші адаптивні алгоритми на основі стратегій градієнтного пошуку ВК. Алгоритм за критерієм найменших квадратів (Least Squares, LS) характеризується великою обчислювальною складністю $O\,(N^3)$ і малої алгоритмічної складністю. RLS-алгоритми характеризуються середньої обчислювальною складністю $O\,(N^2)$ і середньої алгоритмічної складністю. Швидкі, тобто обчислювально-ефективні або з малим числом арифметичних операцій на одну ітерацію, RLS-алгоритми характеризуються низькою обчислювальною складністю $O\ (N)$ і великий алгоритмічної складністю, так як представляються досить великим числом різноманітних математичних формул.

При реалізації адаптивних фільтрів формально відтворити складні алгоритми адаптивної обробки сигналів не завжди вдається з першого разу.

Це відбувається від того, що автори книг і статей зазвичай не доходять спільної позначення змінних в адаптивних алгоритмах, опускають важливі питання їх ініціалізації, що не сприяє однозначному розумінню цих алгоритмів.

В результаті, на практиці до цих пір в основному використовуються адаптивні фільтри на базі простих алгоритмів. Відомий фахівець в області адаптивної фільтрації Джон Чіоффі (John Cioffi) в 1996 році сказав: «Експерти протягом вже багатьох років розробляють складні та ефективні RLS-алгоритми, проте інженери їх не люблять, тому що не розуміють, а тому вважають за краще використовувати в основному прості градієнтні алгоритми ».

Таке ставлення до складних алгоритмів адаптивної фільтрації в минулому було багато в чому обумовлено також і низькою продуктивністю цифровий елементної бази. Щоб при реалізації складних алгоритмів забезпечувалася

необхідна частота дискретизації сигналів, необхідно було мати у своєму розпорядженні певними обчислювальними ресурсами, які на той час були часто недоступні. Однак сьогодні такі алгоритми вже реалізовані на сучасній елементній базі. Це має сприяти використання в сучасних додатках не тільки простих, але і складних алгоритмів адаптивної фільтрації.

1.5 Адаптивна корекція і PNM(Proactive Network Maintenance)

ICFR розшифровується як всередині канальна частотна характеристика. ICFR описує рівність вашого цифрового каналу 6 МГц. Коли канал не є плоским, цифровий сигнал може спотворюватися, і приймальному обладнанню може бути важко приймати рішення щодо прийому бітів. ICFR вимірюється в дБ (децибел), при цьому 0dB є еталонним або абсолютно плоским каналом, а ICFR - співвідношенням дисперсії потужності в межах каналу 6 МГц від кінця до кінця. ICFR в ідеалі повинен бути на рівні 3dB для належного виправлення помилок вперед (FEC), хоча MSO (кілька операторів обслуговування) можуть мати більш жорсткі стандарти. Наприклад, Comcast зазвичай знімає 2 дБ ICFR. Більшість питань ICFR будуть питаннями приміщення, оскільки завод зазвичай ретельно підтримується, при цьому приміщення є дико неконтрольованою змінною. Погано встановлені F-з'єднувачі, погані розгалужувачі, кабель з неправильними радіусами вигину, наявність декількох рядних з'єднувачів F-81 (стовбур) на відстані 50 футів один від одного тощо, додають ваш ICFR; Подумайте про все, що викликає мікро рефлексію. Ця цифра в основному описує якість виготовлення установника. Фітинги, які є "майже правильними", можуть дорівнювати 10 дБ до вашого ICFR для кожного з них. "Ідеальний" фітинг збільшить ваш ICFR майже на 0 дБ. Проблеми ICFR на обладнанні, що зачіпають кілька модемів, спричинять аварійну ситуацію на місці для обслуговування. У 98% випадків високий коефіцієнт ICFR виникає після легкого удару. Ваш фітинг та заземлювач можуть мати найбільший вплив на цю кількість у приміщенні. Чим вищий ICFR, тим складніший час CM буде підтримувати свій USMER (коефіцієнт помилок модуляції UpStream) за допомогою адаптивного вирівнювання та вище шанс виникнення бітових помилок. Дійсно, мінімізація ICFR максимізує продуктивність.

Проактивне технічне обслуговування мережі (PNM) зосереджується на поліпшенні виявлення мережевих проблем та скороченні часу та вартості вирішення проблем. Він базується на різних стандартизованих методах збору ключових даних про ефективність мережі від різних дротових, бездротових та оптичних технологій, таких як модеми або бездротові маршрутизатори, а потім використовує ці дані для швидкого виявлення та вирішення проблем, перш ніж вони призведуть до збою мережі.

У сучасному світі майже все і всі покладаються на певний тип підключення до Інтернету, дротовий чи бездротовий. Навіть яблуко в продуктовому магазині платять за використання підключеної до Інтернету системи торгових точок, не кажучи вже про всі комунікаційні пристрої, гаджети та інші розумні речі, від яких ми залежимо кожен день. Отож, поки доступ до Інтернету важливий, нам потрібні системи проактивного обслуговування мережі, щоб наші зв'язки працювали безперебійно.

Профілактичні заходи зазвичай коштують дешевше, ніж вирішення проблем після їх виникнення. Наприклад, усунення неполадок у житлових проблемах Wi-Fi щороку споживає цінні галузеві ресурси. Ефективна програма PNM не тільки сприяє зменшенню витрат на усунення несправностей, але також стандартизує процес збору даних, автоматизує віддалене вирішення проблем та забезпечує безпрецедентну кількість корисної інформації про стан мережі. Але найголовніше, що це сприяє зміцненню довіри населення до надійності кабельних послуг - найціннішого показника з усіх.

Частотна характеристика всередині каналу (ICFR) та інші параметри можуть бути отримані з коефіцієнтів попередньої корекції, що дозволяє визначити ступінь погіршення висхідного каналу. Модеми, які «бачать» більш-менш однакові ICFR, можуть бути ідентифіковані та згруповані, і ця інформація накладена на системні карти, щоб допомогти знайти порушення, що викликає проблему! Адаптивне попереднє вирівнювання було основою для ранніх інструментів PNM і залишається важливою частиною останніх інструментів.

2 РІЗНОВИДИ АДАПТИВНИХ ФІЛЬТРІВ ТА ЇХ АЛГОРИТМИ

2.1 Компенсація exo сигналів

Нижче розглядається приклад ідентифікації невідомого імпульсного відгуку в задачах луна-компенсації. Необхідність вирішення цього завдання обумовлена архітектурою існуючих систем провідного телефонного зв'язку.

Так історично склалося, що через економію провідників двонаправлений зв'язок між телефонним апаратом абонента і комутаційним устаткуванням телефонної станції здійснюється за допомогою двопровідного каналу зв'язку без посилення сигналів (рис. 2.1), так як ця ділянка телефонної мережі в усьому світі зазвичай не перевищує кількох кілометрів і втрати (ослаблення) сигналів через опір використовуваних провідників є несуттєвими або допустимими. Зв'язок же між телефонними станціями здійснюється на значно більші відстані, а значить, сигнали схильні до помітного ослаблення. Тому що передаються між станціями сигнали необхідно посилювати, чому зв'язок на цій ділянці мережі може бути тільки односпрямований. Вона здійснюється за двома односпрямованими двопровідними каналами, тобто по чьотирьохпровідному каналу. Перехід між двох і чотирьохпровідними каналами здійснюється за допомогою так званих гібридних або диференціальних схем («hybrid circuits»). Один з можливих варіантів такої схеми показаний на рис. 2.1

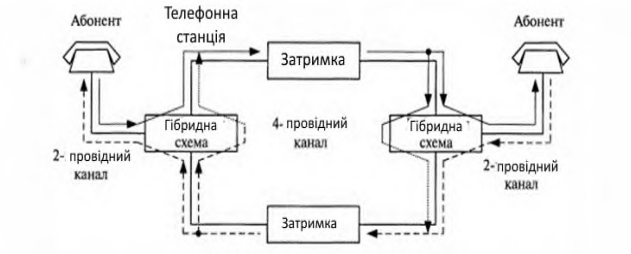


Рис. 2.1 Пристрій телефонного зв'язку між двома абонентами

Гібридна схема - це в ідеалі збалансований міст. Однак цей міст неможливо збалансувати у всьому діапазоні частот оброблюваних сигналів, так як провідні лінії зв'язку характеризуються частотно залежним вхідним імпедансом, в результаті чого через гібридну схему відбувається витік частини сигналу від віддаленого абонента $u_{AB}(t)$ назад до віддаленого абоненту, тобто утворюється exo-сигнал $|u_{CD}(t)| < |u_{AB}(t)|$. Дійсно, умова балансу даної гібридної схеми визначається як

$\frac{Z_i}{(R_1+Z_i)} = \frac{Z_b}{(R_2+Z_i)}$. Якщо $R_1 = Z_i$, то $Z_b = R_2$. Але $R_1 \neq Z_i$, так як Z_i - це комплексний імпеданс двухпровідної лінії зв'язку, навантаженої на розв'язуючий трансформатор. Імпеданс Z_i залежить від топології каналу зв'язку. Балансний імпеданс Z_b - це в більшості випадків просто резистор. Тому узгодити схему у всій смузі частот яка нас цікавить не представляється можливим. Якщо умова балансу не дотримується, то утворюється луна-сигнал u_{CD}(t)≠0.

Таким чином, передається сигнал, будучи затриманим в силу кінцевої швидкості поширення в провідниках, пройшовши через гібридну схему, повертається (також з деякою затримкою) назад до віддаленого абоненту.

Прийнятий віддаленим абонентом власний затриманий і ослаблений сигнал називається сигналом електричного ехо. Для забезпечення комфортної розмови при зв'язку ехо-сигналу необхідно чим більша затримка, тим більше необхідно подавляти(рис. 2.2)

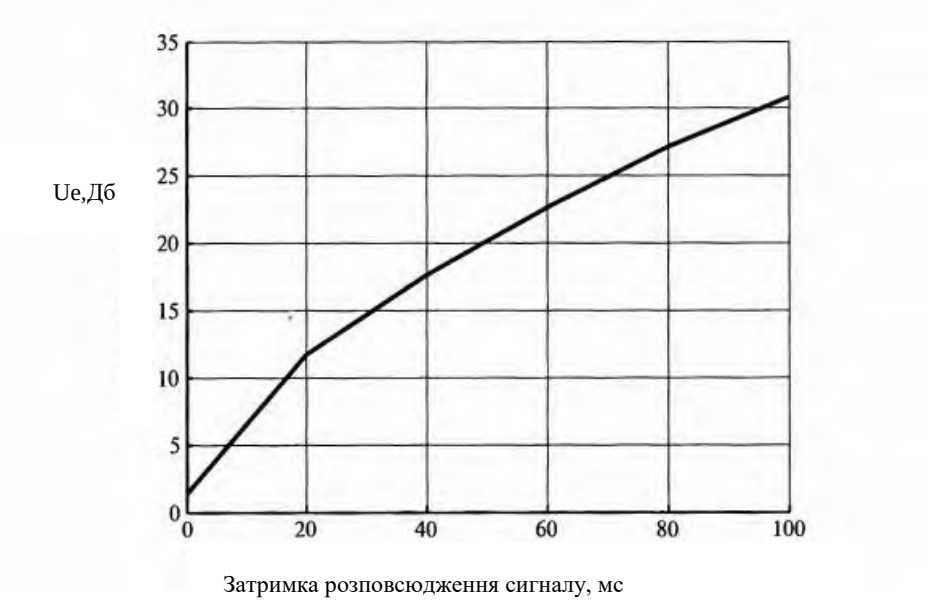


Рис. 2.2 Необхідне подавлення ехо-сигналу

Відомо, що гібридна схема моделюється лінійним КІХ-фільтром. Тому завдання придушення сигналів електричного луни формалізується як завдання ідентифікації імпульсного відгуку цього фільтра w (рис. 2.3).

Тут на малюнку аналого-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі (АЦП і ЦАП) для простоти не показані.

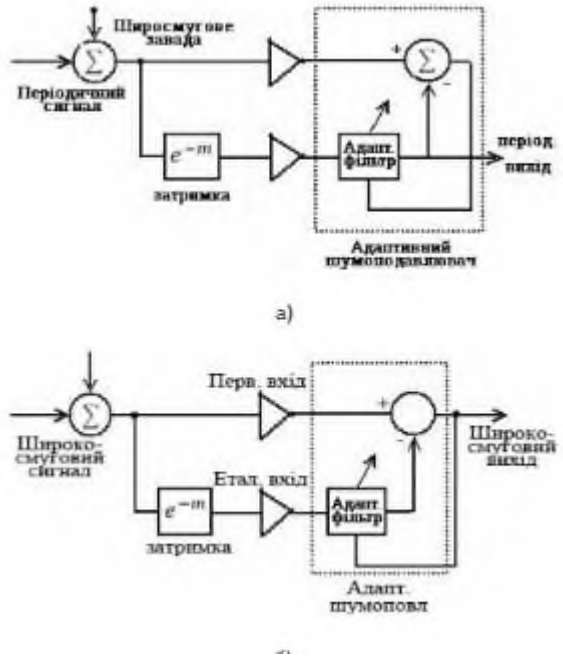


Рис 2.3 Придушення сигналів електричного ехо

Аналогічно вирішується завдання придушення сигналів електричного ехо в модемах дротових систем зв'язку, де також потрібно розділяти сигнали між дво- і чотирьохпровідними каналами, що утворюють канали прийому та передачі даних (рис. 2.4).

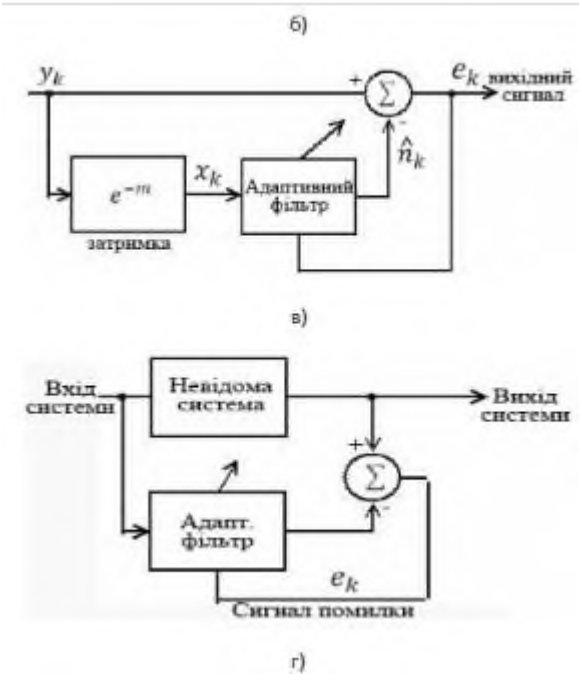


Рис. 2.4 Придушення сигналу електричного ехо в модемах

Акустичне ехо має дещо іншу природу. Воно утворюється за рахунок відображення акустичних сигналів, що випромінюються, наприклад, гучномовцем, від стін приміщення і прийому цих відображень мікрофоном. Гучномовець і мікрофон можуть бути елементами пристроїв озвучування приміщень або пристроїв гучномовного зв'язку. Акустична середовище характеризується акустичним імпульсним відгуком, тому принцип придушення сигналів акустичного відлуння (рис. 2.5) такий же, як і принцип придушення сигналів електричного ехо. Ідентифікований імпульсний відгук в даному випадку утворюється як згортка імпульсних відгуків підсилювача, гучномовця, мікрофона і акустичного імпульсного відгуку приміщення.

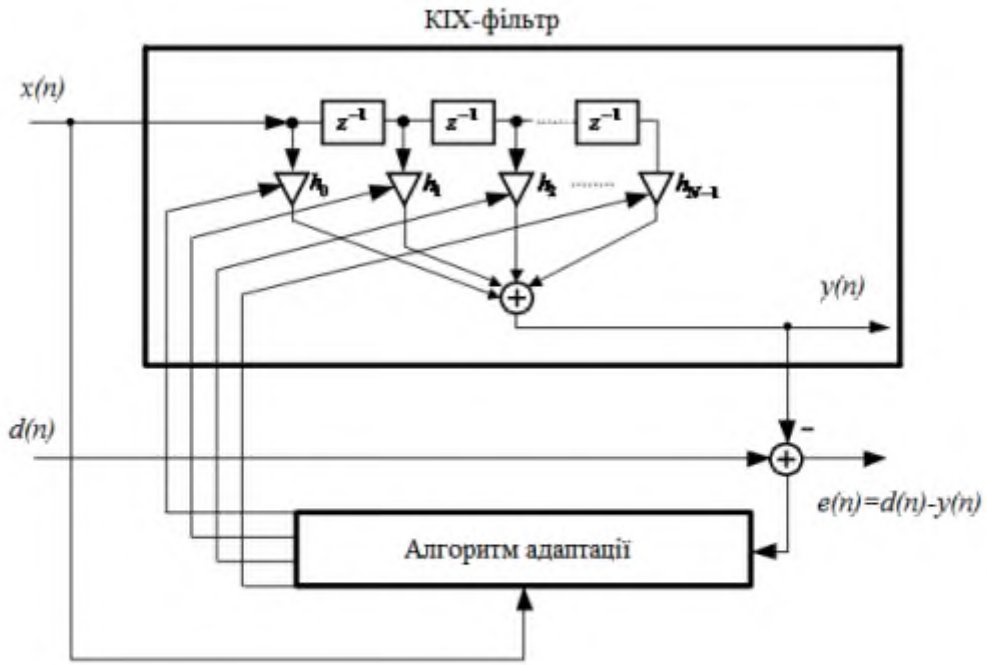


Рис. 2.5 Придушення сигналів акустичного ехо

Розглянемо ефективність застосування адаптивної ехо компенсації на прикладі компенсації сигналів електричного ехо. Стандарт регламентує чисельні моделі ряду імпульсних відгуків, що породжують сигнали електричного еха. На рис. 2.6а показаний один з таких відгуків (такий ж, як на рис. 2.6). Гібридна схема, яка характеризується цим імпульсним відгуком, пригнічує сигнал *x (k)* приблизно на 7.6 дБ. Це придушення грубо можна оцінити по амплітудно-частотній характеристиці (АЧХ) гібридної схеми , яка «приблизно однакова» (-7 ...- 8 дБ) в

більшій частині смуги частот телефонного каналу 0 ... 4 кГц

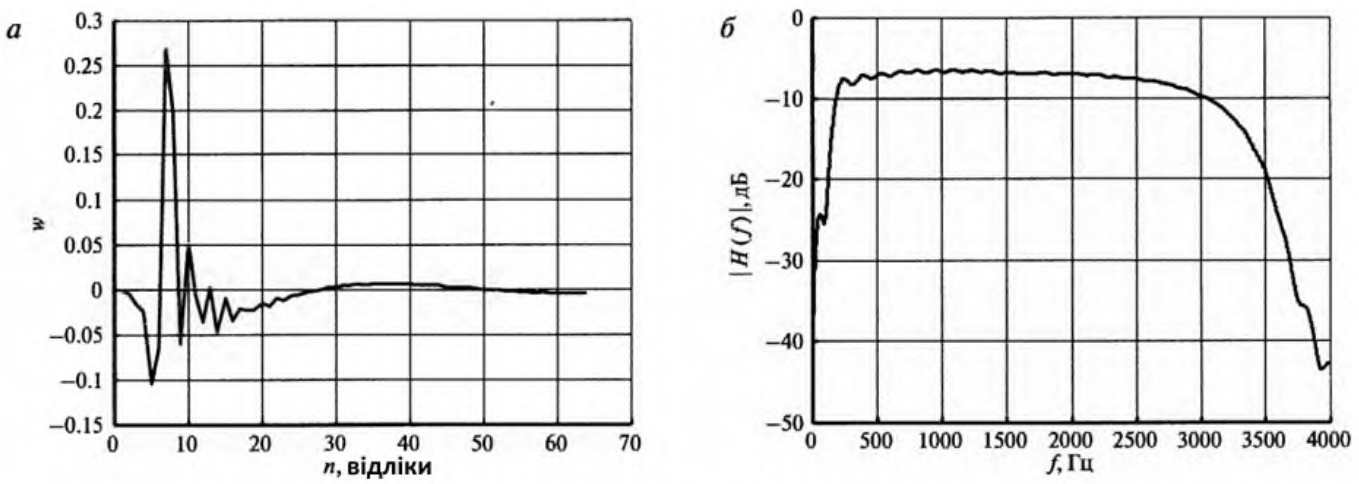


Рис 2.6 ERLE≈7.6 дБ: а) імпульсний відгук гібридної схеми б)АЧХ гібридної схеми

Ослаблення ехо сигналів в термінах ERLE для гібридної схеми є ставлення енергій вхідного сигналу і ехо сигналу:

$$ERLE(k) = 10lg\frac{E\{x^2(k)\}}{E\{d^2(k)\}}$$

На рис. 2.7 наведені результати моделювання придушення відлуння сигналу, утвореного гібридною схемою з характеристиками, такими ж, як на рис. 2.7, за допомогою адаптивного фільтра на базі простого нормалізований алгоритму за критерієм найменшого середнього квадрата (Normalized LMS, NLMS). З рис. 2.7а видно, що ехо сигнал має досить велику амплітуду (середня крива на малюнку). Це означає, що даний сигнал буде добре сприйматися людським вухом, створюючи дискомфорт в розмові, а значить, повинен бути придушений. Видно, що адаптивний фільтр пригнічує ехо сигнал (нижня крива). Адитивний шум $e_0(k)$ в експериментах становить приблизно -30 дБ щодо середнього рівня ехо-сигналів

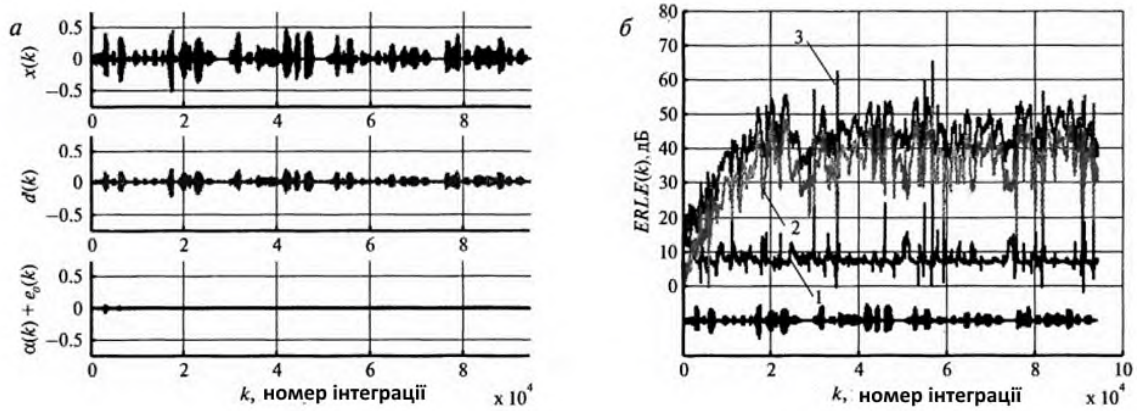


Рис. 2.7 NLMS-алгоритм: 1) ERLE гібридної схеми; 2) ERLE адаптивного

фільтра; 3) ERLE - гібридної схеми і адаптивного фільтра

Параметр ERLE адаптивного фільтра для графіків (див. Рис. 2.7б) визначається як

$$ERLE(k) = 10lg\frac{E\{d^2(k)\}}{E\{\alpha^2(k)\}}$$

а для гібридної схеми і адаптивного фільтра – як

$$ERLE(k) = 10lg\frac{E\{x^2(k)\}}{E\{\alpha^2(k)\}}$$

Енергія сигналів в розрахунках по даним формулам для даного експерименту визначалася на змінному вікні в 256 відліків, що при частоті дискретизації 8 кГц, прийнятої при обробці сигналів в телефонних каналах, так само інтервалу усереднення $\frac{256}{(8\bullet 103)} = 32 \bullet 10^{-3}$ =32мс, тобто умовному інтервалу стаціонарності мовного сигналу.

Результати для RLS-алгоритму представлені на рис. 2.9. З порівняння рис. 2.7 і 2.8 видно, що RLS-алгоритм більш ефективний, як в термінах досяжного ERLE, так і в термінах тривалості перехідних процесів з урахуванням того, що результати для NLMS алгоритму отримані при значенні масштабуючого множника кроку збіжності $\hat{\mu}$, що забезпечує найбільше значення параметра ERLE

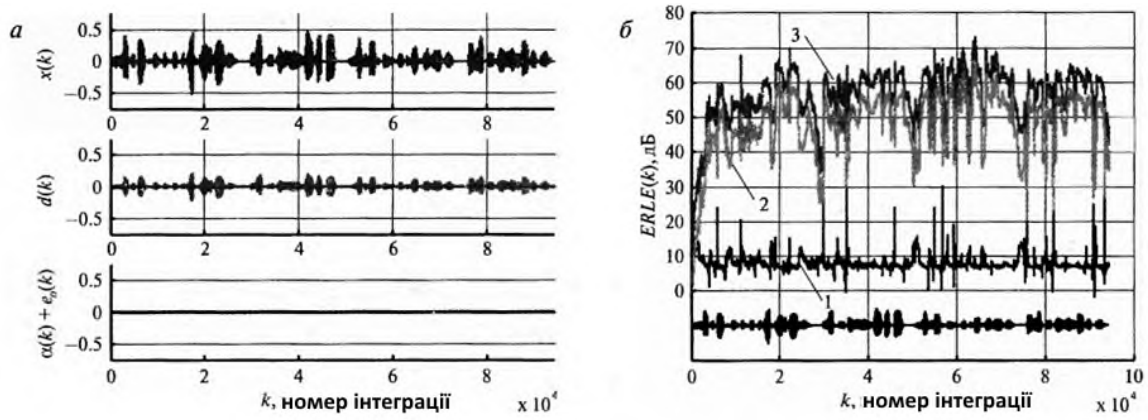


Рис 2.8 RLS-алгоритм: 1) ERLE гібридної схеми; 2) ERLE адаптивного фільтра; 3) ERLE гібридної схеми і адаптивного фільтра

Через подання всіх сигналів в однаковому масштабі на рис. 2.7 і 2.8 візуально оцінити рівні придушених exo сигналів складно. Графіки пригнічених exo сигналів в збільшеному масштабі наведено на рис. 2.9. Темним кольором показаний сигнал $\alpha(k) + e_0(k)$, тобто спостерігається сигнал на виході помилки адаптивного фільтра, а світлим – пригніченне відлуння $\alpha(k)$. Так як придушення

ехо сигналу таке, що рівень залишкового ехо нижче рівня шуму, то візуально оцінити якість ехо компенсації не представляється можливим. Однак при моделюванні можна виділити тільки сигнал пригніченого луни $\alpha(k)$, так як реалізація шумового сигналу є відомою.

З рис. 2.9 видно, що обчислювально більш складний RLS-алгоритм є і більш ефективним, ніж менш складний NLMS-алгоритм, тобто не дивлячись на те що в обох випадках рівень пригніченого ехо сигналу однаковий або навіть нижче рівня шуму, людське вухо розрізняє пригнічений ехо сигнал у разі NLMS-алгоритму і не розрізняє - в разі RLS-алгоритму.

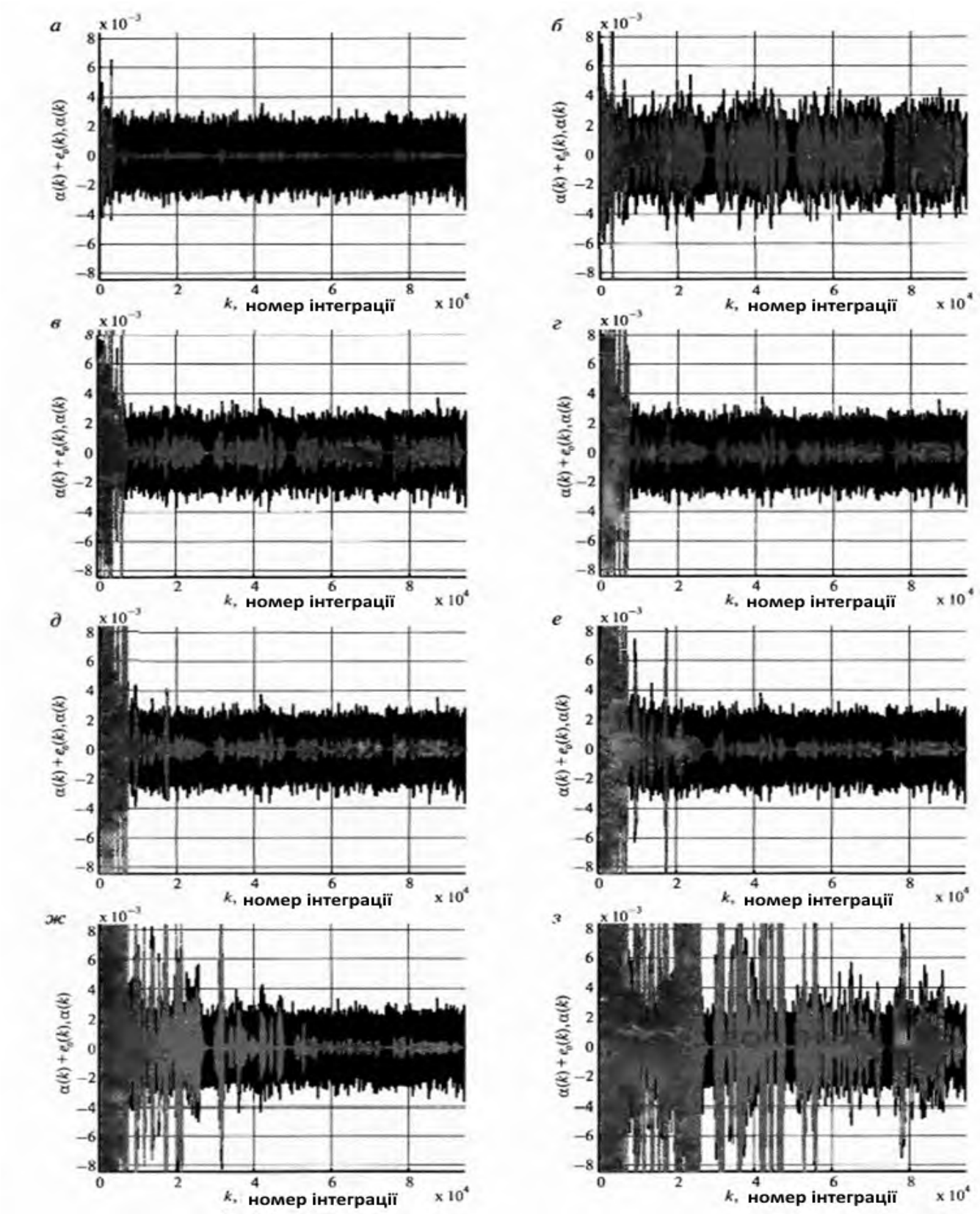


Рис. 2.9 Зашумленний залишковий луна-сигнал $\alpha(k) + e_0(k)$ (темна крива) і не зашумленний залишковий ехо-сигнал $\alpha(k)$ (світла крива):

а) RLS-алгоритм; б) NLMS-алгоритм, p = 0.1; в) NLMS-алгоритм,

p = 0.2; г) NLMS-алгоритм, p = 0.1; д) NLMS-алгоритм, p = 0.075;

е) NLMS-алгоритм, p = 0.05; ж) NLMS-алгоритм, p = 0.025; з) NLMS алгоритм, p = 0.01

2.2 Зворотна ідентифікація об’єкта та вирівнювання характеристик електричних каналів зв’язку

Іншим прикладом використання адаптивних фільтрів є завдання зворотної ідентифікації об'єкта. Вирішення цього завдання широко використовується для вирівнювання характеристик електричних каналів зв'язку (рис. 2.10) за допомогою адаптивних еквалайзерів. Необхідність вирівнювання каналу зв'язку виникає через те, що при передачі цифрових даних по каналах з обмеженою пропускною здатністю виникає явище, зване міжсимвольною інтерференцією. Міжсимвольна інтерференція, поряд з шумом каналу z (k) (рис. 2.10), позначається на правильності рішення про відповідність прийнятого інформаційного символу x(k) символу x(k), переданому по каналу зв'язку. Якби цей канал був просто лінією затримки на час / 0, то сигнал який приймається (Інформаційні символи) можна було б легко оцінювати (розрізняти). Однак більшість каналів зв'язку з математичної точки зору представляють собою КІХ-фільтр(кінцева імпульсна характеристика) з імпульсним відгуком w (рис. 2.12а).

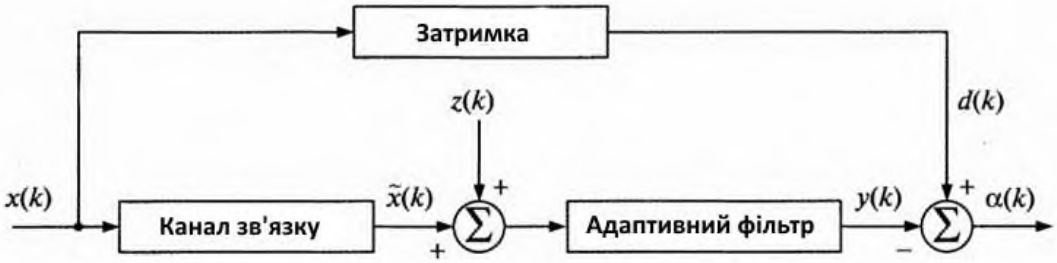


Рис. 2.10 Вирівнювання АЧХ каналу електричного зв’язку

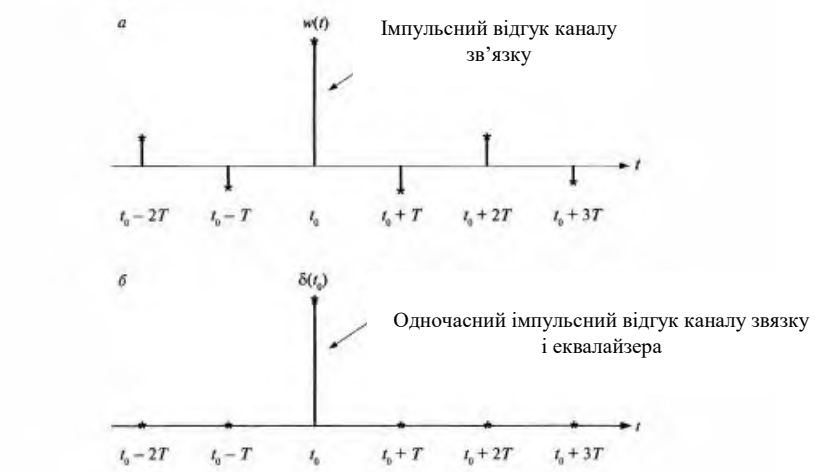


Рис. 2.11 Вирівнювання електричного каналу зв’язку

Згідно рис. 2.11а в кожен відлік часу до, що співпадає з моментом зміни інформаційних символів, які прямують з періодом Т, на виході каналу утворюється зважена сума переданих поспіль символів.

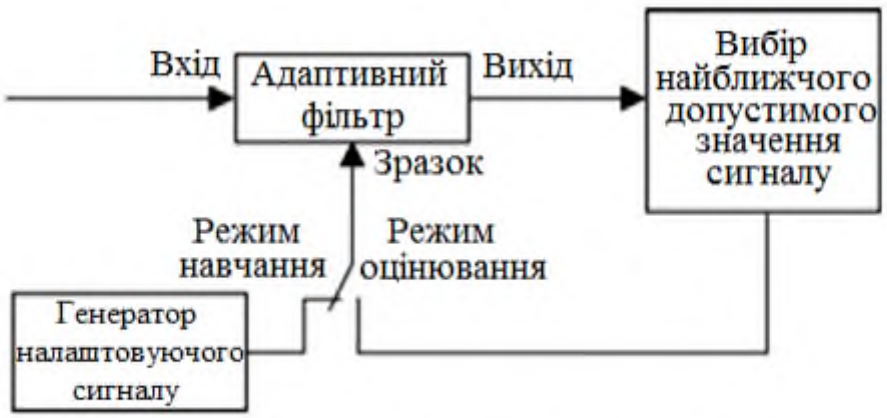
$$\tilde{x}(t_0 + kT) = w(t_0)x(t_0 + kT) + \sum_{n \neq k} w(t_0 + kT - nT)x(t_0 - nT)$$

У цій сумі лише один символ несе поточну інформацію, а інші є шумом (міжсимвольної інтерференції), який не дозволяє правильно розрізняти символи на приймальній стороні. Щоб підвищити ймовірність правильного рішення щодо прийнятих символів, використовуються еквалайзери - пристрої, які зменшують міжсимвольні інтерференцію. Еквалайзер функціонує таким чином, що його АЧХ стає близькою до зворотного АЧХ каналу зв'язку. Іншими словами, спільна АЧХ каналу зв'язку і еквалайзера стає близькою до рівномірної. Це означає, що згортка імпульсних відгуків каналу зв'язку w і еквалайзера h в моменти часу kT близька до дельта-функції (див. рис. 2.11б), в результаті чого міжсимвольна інтерференція зменшується. У цьому випадку вихідний сигнал еквалайзера визначається як

$$y(t_0 + kT) = \delta(t_0)x(t_0 + kT) + 0$$

Інформаційний символ може бути правильно виявлений (оцінений і декодований). Якщо порівняти схеми на рис. 2.3 і 2.11, то можна помітити, що в останньому випадку також вирішується завдання ідентифікації лінійної системи, що визначає затримку прийому сигналу, що передається. Відомо, що імпульсна характеристика лінії затримки дорівнює дельта-функції (тобто одному ненульовому ВК), а АЧХ, як наслідок, є рівномірною. Ідентифікація імпульсної характеристики лінії затримки здійснюється за допомогою каскадного з'єднання КІХ-фільтра з фіксованими ВК (тобто Каналу зв'язку) і КІХ-фільтра з змінюваними ВК (тобто Адаптивного фільтра). Це означає, що згортка фіксованого імпульсного відгуку каналу зв'язку із змінним імпульсним відгуком адаптивного фільтра в процесі адаптації наближається до дельта-функції, а АЧХ стає рівномірною. Для забезпечення цієї умови АЧХ адаптивного фільтра при адаптації наближається до зворотної АЧХ каналу зв'язку. Рис. 2.10 демонструє лише принцип роботи еквалайзера. На практиці необхідний сигнал «не надходить» по окремому каналу зв'язку. Він формується на приймальній стороні протягом протоколу встановлення модемом зв'язку, коли відома (тренувальна)

послідовність символів передається модемом джерела інформації на протилежному кінці каналу зв'язку. Після настройки адаптивного фільтра еквалайзера. Коли канал зв'язку вже вирівняний, замість відомої тренувальної послідовності передаються власне невідомі дані, а в якості сигналу *d (k)* використовується сигнал *y (k)*. Вихідний сигнал адаптивного фільтра *y (k)*, «квантований» за критерієм мінімуму відстані до елементів сузір'я алфавіту переданих даних. Існує два типи еквалайзерів (рис. 2.12): без зворотного зв'язку і зі зворотним зв'язком. Адаптивний фільтр еквалайзера зі зворотним зв'язком можна розглядати як двоканальний адаптивний фільтр. Еквалайзери зі зворотним зв'язком забезпечують більш якісне вирівнювання характеристик каналу, так як вихідний сигнал такого еквалайзера після навчання частково формується з уже раніше прийнятих «правильних» символів.



Мал. 2.12 Адаптивні еквалайзери: а) без зворотного зв'язку; б) зі зворотним зв'язком

Е квалайзер без зворотного зв'язку вирівнює характеристики каналу дещо гірше, ніж еквалайзер зі зворотним зв'язком.

Це проявляється в тому, що після адаптації згортка імпульсних відгуків каналу зв'язку і еквалайзера в меншій мірі нагадує дельта функцію. Як наслідок, провал в АЧХ каналу зв'язку (-60 дБ в даному випадку) вирівнюється по-різному.

Тому що передаються інформаційні символи, в даному випадку з квадратурної фазової модуляцією (Phase Shift Keying, PSK-8), після вирівнювання

каналу розрізняються також по-різному.

На рис. 2.13 показані результати вирівнювання каналу зв'язку в термінах сузір'їв спостережуваних інформаційних символів. Тут символи «Дані» - це сузір'я символів джерела інформації тобто даних, переданих по каналу зв'язку. Символи «Канал» - сузір'я на виході каналу зв'язку. Видно, що без прийняття якихось додаткових заходів ці дані неможливо розрізнити. Таким «додатковим заходом» є вирівнювання каналу зв'язку. З рис. 2.14 (див. Сузір'я, позначене як «Еквалайзер») слід очевидну перевагу еквалайзера зі зворотним зв'язком перед еквалайзером без зворотного зв'язку.

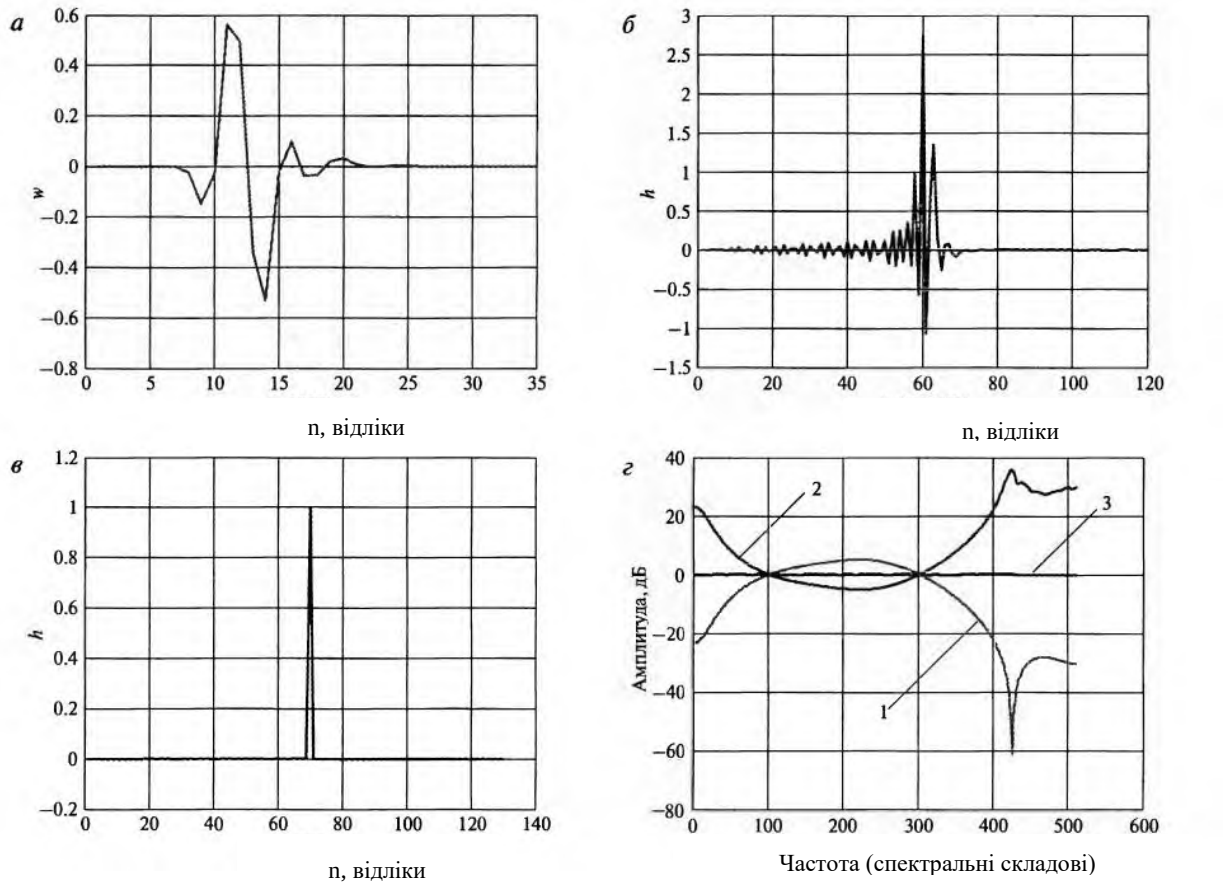


Рис. 2.13 Вирівнювання каналу, RLS-алгоритмом, еквалайзер зі зворотним зв'язком: а) імпульсний відгук каналу зв'язку; б) імпульсний відгук еквалайзера; в) згортка імпульсних відгуків каналу зв'язку і еквалайзера; г) АЧХ: 1) каналу зв'язку, 2) еквалайзера, 3) каналу зв'язку і еквалайзера

Якщо ж порівняти поведінку розглянутих, еквалайзерів з еквалайзерами на базі NLMS-алгоритму, то в обох випадках результати будуть гіршими. Еквалайзер на базі цього алгоритму вимагає в десятки разів перевищує по тривалості тренувальну послідовність для забезпечення збіжності, а також деякого мистецтва

при виборі оптимального значення параметра p. Це також свідчить про перевагу адаптивних фільтрів на базі обчислювально-складних RLS-алгоритмів перед фільтрами на базі простих градієнтних алгоритмів.

Слід також зазначити, що для вирівнювання каналів зв'язку можуть застосовуватися і так звані сліпі еквалайзери тобто ті які не потребують тренувальних послідовностей. Один з можливих способів побудови таких пристроїв ґрунтується на використанні CM-критерію (Constant Modulus, критерій сталості модуля інформаційних символів). В разі, якщо передані інформаційні символи задовольняють цьому критерію. Адаптивні алгоритми на основі CM-критерію застосовуються для обробки PSK сигналів, а також інших сигналів, що характеризуються постійним значенням модуля інформаційних символів. Кожен CM-символ a_j, що представляє з себе комплексне число

$Re\{a_j\} + jIm\{a_i\}$, яке має властивість $|a_i| = \sqrt{a_i a_i = s = const}$, де *i=1,2…, I, I* – число символів алфавіту (використовується в позначенні PSK-*I*), а

$j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця. Значення модуля інформаційних символів s на приймальній стороні є відомим.

CM-критерій для адаптивного фільтра формується як

$$E\{||s^p| - |y(k)|^p|^q\} \to min,$$

а відповідні адаптивні алгоритми позначаються як CM (p, q).

Цільова функція в рівнянні є багато екстремальною, а тому використання простих градієнтних алгоритмів для її мінімізації часто призводить до локальних рішень. Алгоритми за критерієм найменших квадратів, наприклад RLS-алгоритми, безпосередньо не можуть бути використані в цьому випадку. У той же час згідно при p = q = 2 цільова функція в рівнянні може бути зведена до квадратичної функції, що дозволяє для її мінімізації використовувати незначно модифіковані алгоритми оптимізації квадратичних цільових функцій.

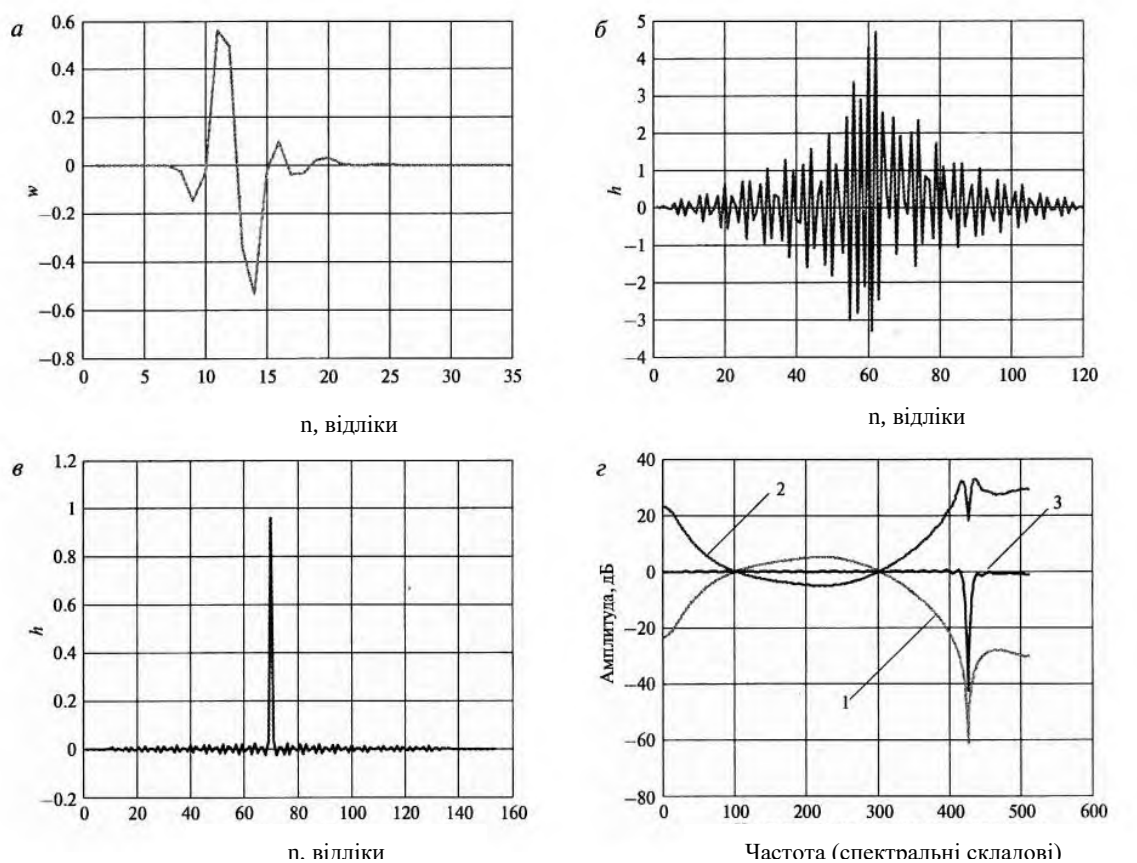


Рис.2.14 Вирівнювання каналу, RLS-алгоритм, еквалайзер без зворотного зв'язку: а) імпульсний відгук каналу зв'язку; б) імпульсний відгук еквалайзера; с) згортка імпульсних відгуків каналу зв'язку і еквалайзера, в) АЧХ: 1) - каналу зв'язку, 2) - еквалайзера, 3) - каналу зв'язку і еквалайзера

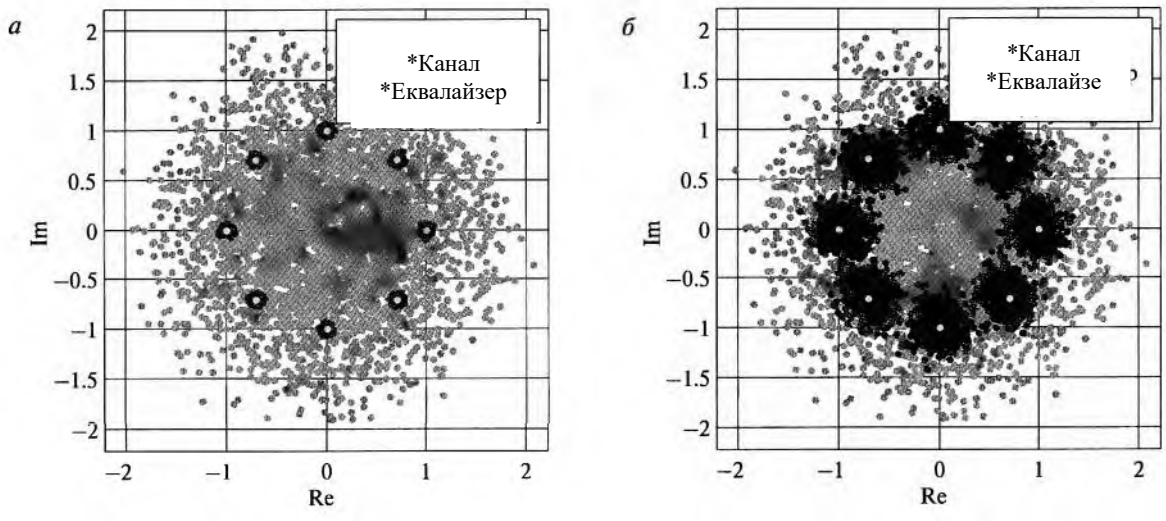


Рис. 2.15 Вирівнювання каналу, RLS-алгоритм: а) еквалайзер зі зворотним зв'язком; б) еквалайзер без зворотного зв'язку

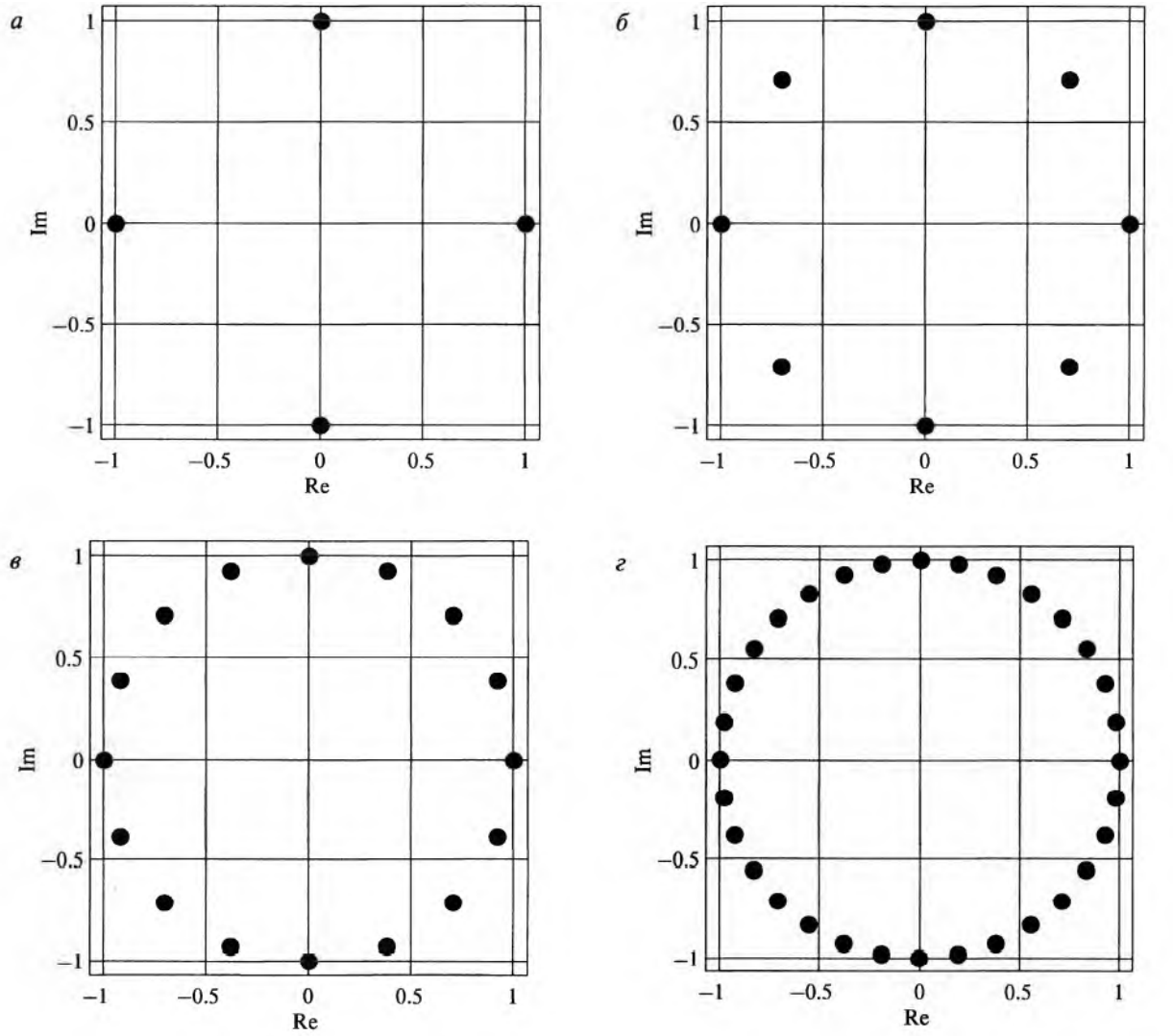


Рис. 2.16 Сузір'я інформаційних символів: а) PSK-4; б) PSK-8; в) PSK-16; г) PSK-32

3 ПРОЕКТУВАННЯ АДАПТИВНИХ ФІЛЬРІВ

Різноманіття існуючих на сьогоднішній день алгоритмів адаптивної фільтрації (алгоритмів обчислення ВК адаптивного фільтра і його вихідного сигналу), частина з яких розглянута в цій роботі, умовно показано на рис. 3.1. Адаптивні алгоритми випливають з теорії оптимальної винерівській фільтрації. Прообразами більшості цих алгоритмів служать алгоритм Ньютона, алгоритм найшвидшого спуску і алгоритм за критерієм найменших квадратів. До простих належать різновиди градієнтних LMS- і NLMS-алгоритмів, а до складних - різновиди RLS-алгоритмів на базі MIL і QR-розкладання. Проміжний клас алгоритмів утворюють алгоритми афінних проекцій.

Наявність різноманітних алгоритмів адаптивної фільтрації дає можливість розробникам радіоелектронної апаратури приймати компромісні рішення між обчислювальною складністю та ефективністю адаптивних фільтрів при їх розробці або використанні. Прості градієнтні алгоритми, переважно орієнтовані на апаратну реалізацію адаптивних фільтрів. Складні RLS-алгоритми і алгоритми афінних проекцій, включаючи їх швидкі версії, в основному орієнтовані на програмну реалізацію. Незважаючи на складність, RLS-алгоритми є найбільш ефективними, а тому також представляють практичний інтерес поряд з простими градієнтними алгоритмами.

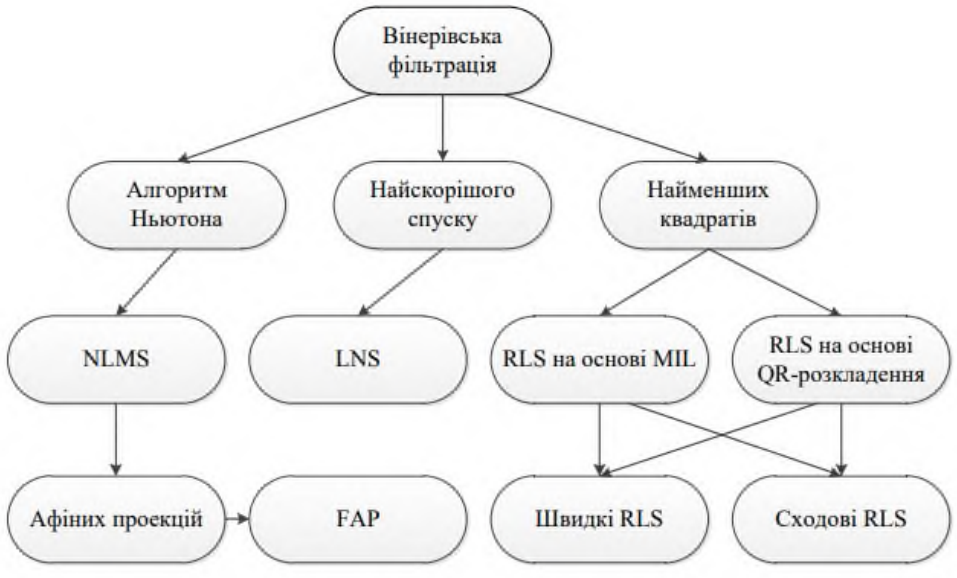


Рис. 3.1 Різноманіття алгоритмів адаптивної фільтрації сигналів

Різноманіття RLS-алгоритмів утворюється за рахунок використання різних віконних функцій при оцінці кореляційної матриці вхідних сигналів адаптивного фільтра і її динамічної регуляризації, а також структурно незалежною паралельної реалізації за допомогою одного, двох або чотирьох ЦСП. Це різноманіття може бути застосовано до всіх різновидів RLS-алгоритмів включаючи сходові адаптивні алгоритми без лінійних обмежень.

Рис. 3.1свідчить про значні успіхи в області адаптивної обробки сигналів, досягнутих протягом всієї історії її розвитку. Ці досягнення не могли пройти повз виробників сучасні засобів програмування і моделювання, таких як MATLAB. LabVIEW і SystemVue, а також виробників сучасних ЦОС, які реалізували в своїх прикладних бібліотеках деякі різновиди адаптивних фільтрів і їх додатків. Ряд програмних реалізацій адаптивних фільтрів представлений в роботах. Питання моделювання адаптивних фільтрів висвітлюються в деяких сучасних книгах по ЦОС.

Нижче розглядаються адаптивні фільтри, представлені в зазначених і ряді інших джерел інформації.

3.1 Моделювання адаптивних фільтрів за допомогою додатків DSP System Toolbox мови MATLAB

Мова MATLAB на сьогоднішній день є основним програмним інструментом для моделювання алгоритмів, пристроїв і систем, що використовують ЦОС. Його лідируюча роль підтверджена і тим, що такі засоби розробки, як LabVIEW і SystemVue, підтримують можливість спільної роботи з мовою MATLAB. Крім того, в цих програмних продуктах містяться урізані ядра мови MATLAB (MathScript в LabVIEW і MathLang в SystemVue), в яких реалізовані основний синтаксис і набір базових функцій, що дозволяють проводити спільне моделювання програм на мові MATLAB в середовищі LabVIEW або SystemVue без установки мови MATLAB на персональному комп'ютері.

Тому не дивно, що в стандартному додатку DSP System Toolbox мови MATLAB, де зосереджені алгоритми ЦОС, також є близько тридцяти різних різновидів адаптивних алгоритмів (див. Табл. 3.1), реалізованих у вигляді об'єктів. Ці об'єкти можуть бути використані для моделювання різних адаптивних додатків. Зокрема, вони використані в адаптивних еквалайзерах стандартного додатка Communication Toolbox.

Таблиця 3.1

Різновиди адаптивних алгоритмів в MATLAB

Конструктор	Алгоритм
	Семейство LMS-алгоритмов
adaptfilt.adjlms	Adjoint LMS-алгоритм (зв'язаний)
adaptfilt.blms	Блоковий LMS-алгоритм
adaptfilt.blmsfft	Блоковий LMS-алгоритм в частотної області із застосуванням БП
adaptfilt.dims	Delayed LMS-алгоритм (з затримкою оновлення ВК адаптивного фільтра)
adaptfilt.filtxlms	Filtered-x LMS-алгоритм (з додатковою фільтрацією вихідного сигналу фільтра перед формуванням сигналу помилки)
adaptfilt.lms	LMS-алгоритм (класичний)
adaptfilt.nlms	NLMS-алгоритм

Продовження таблиці 3.1

Різновиди адаптивних алгоритмів в MATLAB

Конструктор	Алгоритм
adaptfilt.sd	Sign-Data LMS-алгоритм з використанням для адаптації тільки знаків даних, що містяться в лінії затримки адаптивного фільтра (замість $x_N(k)$використовується sign $\{x_N(k)\}$)
adaptfilt.se	Sign-Error LMS-алгоритм з використанням для адаптації тільки знака сигналу помилки (замість$\alpha(k)$ використовується sign $\{\alpha(k)\}$)
adaptfilt.ss	Sign-Sign LMS-алгоритм з використанням для адаптації тільки знаків сигналу помилки і даних, що містяться в лінії затримки адаптивного фільтра (комбінація двох попередніх варіантів)
	Сімейство RLS-алгоритмів
adaptfilt.ftf	Швидкий RLS-алгоритм(FTF)
adaptfilt .hrls	RLS-алгоритм з використанням перетворення Хаусхолдера
adaptfilt.hswrls	RLS-алгоритм зі змінним вікном і використанням перетворення Хаусхолдера
adaptfilt.qrdrls	RLS-алгоритм з використанням QR-розкладання
adaptfilt.rls	RLS-алгоритм (класичний, на базі MIL)
adaptfilt.swftf	Швидкий RLS-алгоритм зі змінним вікном
adaptfilt.swrls	RLS-алгоритм зі змінним вікном
	Алгоритми афінних проекцій
adaptfilt.ap	Алгоритм афінних проекцій з прямим зверненням матриці
adaptfilt.apru	Алгоритм афінних проекцій з рекурсивним оновленням оберненої матриці
adaptfilt.bap	Блоковий алгоритм афінних проекцій
	Алгоритми адаптації в частотної області
adaptfilt.fdaf	LMS-алгоритм в частотної області (на базі БПФ) з індивідуальною нормування розміру кроку в кожному частотному каналі
adaptfilt.pbfdaf	Нормований LMS-алгоритм в частотної області (на базі БПФ), який використовує поділ сигналу на блоки малого розміру в тимчасовій області
adaptfilt.pbufdaf	NLMS-алгоритм в частотної області (на базі БПФ), який використовує поділ сигналу на блоки малого розміру в тимчасовій області, без обмеження довжини еквівалентної імпульсної характеристики
adaptfilt.tdafdet	Адаптивний фільтр, який використовує LMS-алгоритм після попереднього застосування до вхідного сигналу дискретного косинусного перетворення

Продовження таблиці 3.1

Різновиди адаптивних алгоритмів в MATLAB

Конструктор	Алгоритм
adaptfilt.tdafdft	Адаптивний фільтр, який використовує LMS-алгоритм після попереднього застосування до вхідного сигналу дискретного перетворення Фур'є
adaptfilt.ufdaf	Нормований LMS-алгоритм в частотної області (на базі БПФ), без обмеження довжини еквівалентної імпульсної характеристики
	Адаптивні алгоритми для сходових фільтрів
adaptfilt.gal	Gradient-Adaptive Lattice LMS (алгоритм адаптації для сходового фільтра, заснований на градієнтному спуску)
adaptfilt.lsl	Сходовий RLS-алгоритм
adaptfilt.qrdlsl	Сходовий RLS-алгоритм на базі QR-розкладання

Для створення об'єкта адаптивного фільтра служить функція adaptfilt. При її виклику необхідно вказати необхідний алгоритм адаптивної фільтрації з табл. 2 як

ha = adaptfilt. algorithm (...).

Набір вхідних параметрів конструктора, який вказується в дужках, залежить від використовуваного алгоритму. Обробка сигналів адаптивним фільтром здійснюється за допомогою функції [y, e] = filter(ha, x, d), де ha об’єкт адаптивного фільтра, x – вектор відліків вхідного сигналу, d - вектор відліків необхідного сигналу.

Результатами роботи функції є вектори відліків вихідного сигналу *y* і сигналу помилки фільтрації e.

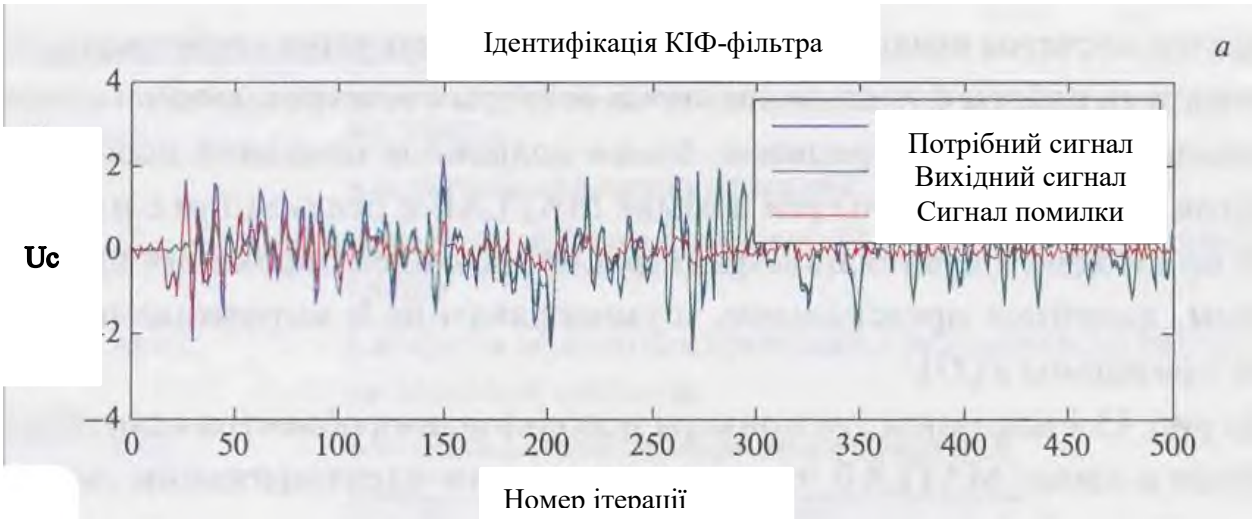
На рис. 3.4 показані два приклади використання об'єктів адаптивних алгоритмів в мові MATLAB при вирішенні задачі ідентифікації імпульсного відгуку КИХ-фільтра з 32 ВК. Рис. 3.4 відображає одне з розглянутих в розділах 5 і 6 порівняльних властивостей LMS- і RLS-алгоритмів, а саме: більш короткий перехідний процес (див. Криву «Сигнал помилки») в разі останнього алгоритму. На малюнках «Необхідний сигнал» - це сигнал адаптивного фільтра *d (k)*, «Вихідний сигнал» - сигнал адаптивного фільтра *y (k)*, «Сигнал помилки» - сигнал *α (k)*, «КІХ-фільтр» - ВК ідентифікованого імпульсного відгуку та «Адаптивний фільтр» - ВК адаптивного фільтра h_n на останній 500-й ітерації, де n = 1, ..., N - номери ВК, а N = 32.

Програмний код для отримання графіків на рис. 15.4а наведено нижче.

```
randn (* state ', 100);
x = randn (1,500); % Вхідний сигнал фільтра
b = firl (31,0.5); % Ідентифікованих КІХ-фільтр
n = 0.1 * randn (1,500); % Адитивний шум
d = filter (b, l, x) + n; % Необхідний сигнал
mu = 0.008; % Крок збіжності LMS-алгоритму
ha = adaptfilt.lms (32, mu);
[y, e] = filter (ha, x, d);
subplot (2,1,1); plot (l: 500, [d; y; e]);
title ('Ідентифікація КИХ-фільтра');
legend ('Необхідний сигнал', 'Вихідний сигнал', 'Сигнал помилки');
xlabel ('Номер ітерації'); ylabel ('Значення сигналу');
subplot (2,1,2); stem ([b. ‘, Ha. coefficients. ']);
legend ('КІХ-фільтр', 'Адаптивний фільтр');
xlabel ('Номер вагового коефіцієнта'); ylabel ('Значення вагового коефіцієнта'); grid on;
```

Цей програмний код дає уявлення про порядок використання об'єктів (див. Табл. 3.1). Програмний код для отримання аналогічних малюнків при використанні інших алгоритмів адаптивної фільтрації, реалізованих на мові MATLAB, наведені в «Довідкової системі» додатка DSP System Toolbox.

Адаптивна фільтрація



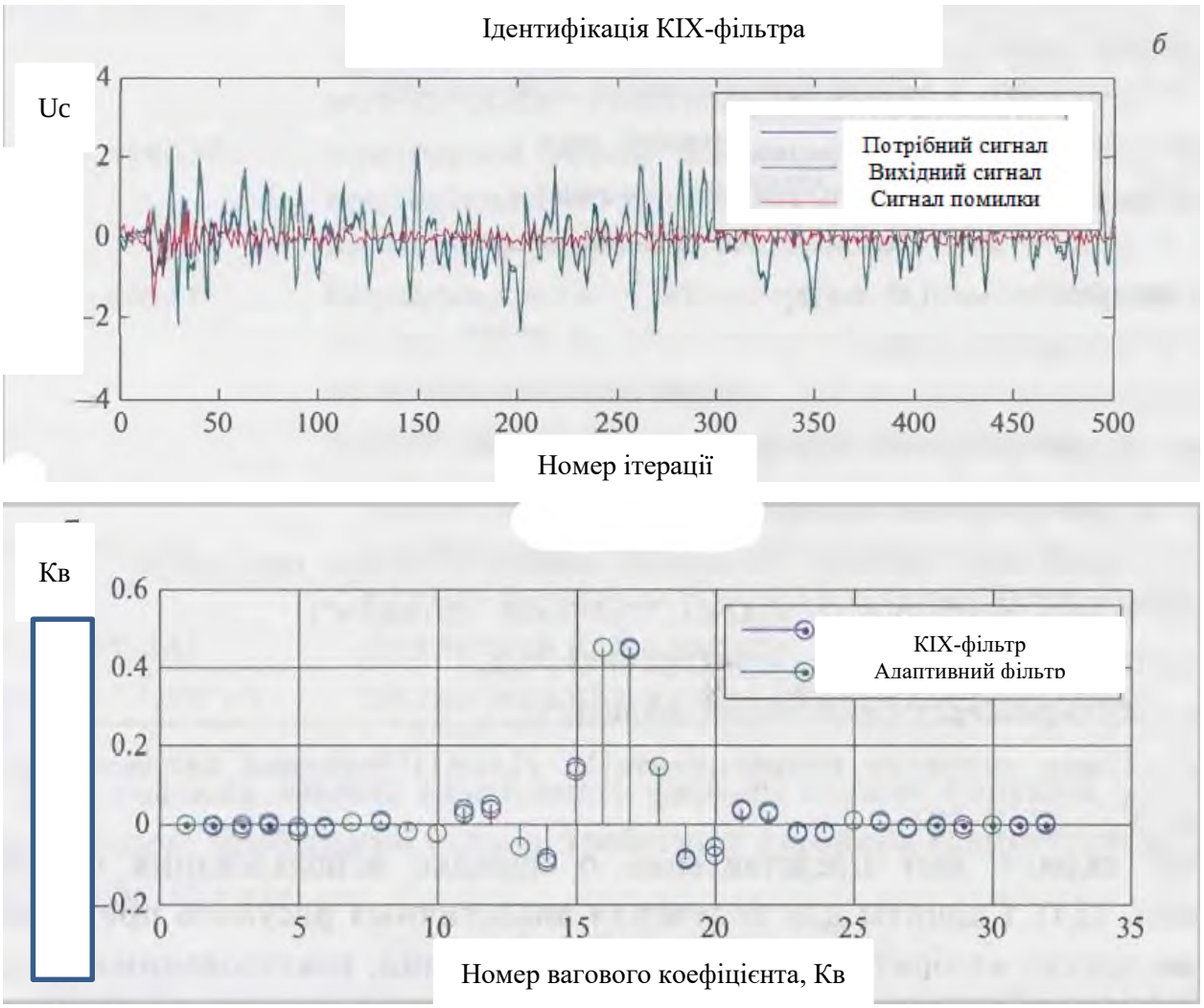


Рис. 3.2 Моделювання адаптивних фільтрів: а) на базі LMS-алгоритму; б) на базі RLS-алгоритму

Незважаючи на велику популярність і широке поширення мови MATLAB, реалізація в ньому адаптивних алгоритмів у вигляді об'єктів має ряд недоліків, що обмежують використання цих алгоритмів при моделюванні деяких додатків. Цих недоліків позбавлена розглянута далі бібліотека алгоритмів адаптивної фільтрації.

3.2 Нестандартні програмні засоби для моделювання адаптивних фільтрів на мові MATLAB

Бібліотека включає практично всі різновиди алгоритмів адаптивної фільтрації, показані на рис. 3.1, для одноканальних і багатоканальних адаптивних фільтрів з дійсними і комплексними ВК. Всі графіки, наведені в цій роботі, отримані шляхом моделювання на мові MATLAB з використанням елементів цієї бібліотеки. Всі алгоритми бібліотеки реалізовані у вигляді програм, а не об'єктів

або функцій. Така реалізація зручна при дослідженні властивостей алгоритмів або перевірці їх працездатності, так як в цьому випадку є доступ до всіх «внутрішніх» змінних алгоритму. Її також зручно використовувати при перенесенні алгоритмів на мову Assembler потрібного ЦСП, так як алгоритми бібліотеки запрограмовані на поітераціонну, а не векторну обробку сигналів.

Велика частина розроблених адаптивних алгоритмів інтегрована в графічний інтерфейс користувача (ГІК), показаний на рис. 3.3. За допомогою цієї програми можна досліджувати властивості потрібного нам алгоритму адаптивної фільтрації, який функціонує під впливом внутрішніх або зовнішніх тестових сигналів. В останньому випадку використовуються сигнали, що передаються у вигляді файлів даних. ГІК дозволяє вибирати потрібний користувачу алгоритм, визначати число каналів адаптивного фільтра і тип арифметики (дійсна або комплексна), а також задавати параметри, що залежать від обраного алгоритму. Вхідні або вихідні сигнали моделювання можуть бути збережені в файлах для використання в якості тестових векторів при перенесенні адаптивних алгоритмів на потрібні мови програмування і обчислювальні платформи.

Ряд алгоритмів адаптивної фільтрації на мові MATLAB також реалізований в бібліотеці «FREE-ASPT for MATLAB». Однак безкоштовно розповсюджується демо-версія цієї бібліотеки може бути використана тільки для моделювання адаптивних фільтрів з обмеженим числом ВК. Крім того, програмний код цих алгоритмів є закритим, що не дозволяє знайомитися з особливостями реалізації алгоритмів і є незручним при дослідженні їх властивостей.

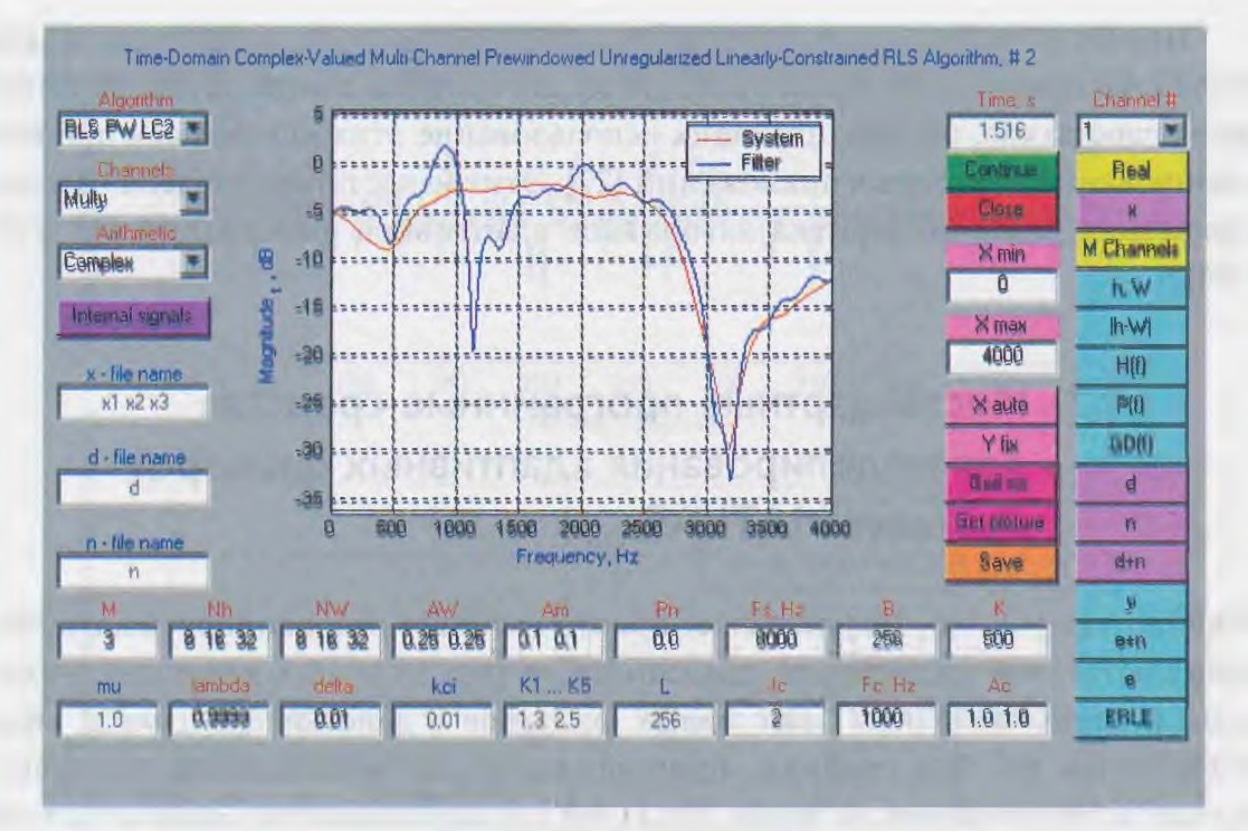


Рис. 3.3 ГІП алгоритмів адаптивної фільтрації

3.3 Моделювання додатків адаптивної фільтрації за допомогою Adaptive Filter Toolkit середовища розробки LabVIEW

Іншим засобом, широко використовуваним сьогодні для моделювання і створення різних додатків, серед яких і додатки ЦОС, є середовище розробки LabVIEW. Існує дві основні відмінності LabVIEW від більшості інших мов програмування.

По-перше, LabVIEW реалізує концепцію графічного програмування мови G, тому вихідний код є блок-діаграму, тобто з'єднані один з одним блоки (піктограми) елементів мови.

Незважаючи на такий підхід, в мові G використовуються ті ж конструкції і методи програмування, що і в інших мовах: типи даних, цикли, змінні, рекурсія, обробка подій і об'єктно-орієнтоване програмування.

По-друге, LabVIEW підтримує виконання коду, написаного на мові G, в режимі потоку даних (потокове програмування), в той час як традиційні текстові мови (наприклад C та C ++) забезпечують виконання коду у вигляді послідовності команд. В основі мов

потокового програмування (таких як G, Agilent VEE, Microsoft Visual Programming Language і Apple Quartz Composer) лежить концепція потоку даних, який визначає послідовність виконання функціональних вузлів програми.

Прилад, який реалізується засобами LabVIEW, складається з двох основних компонентів: лицьовій панелі і блок-діаграми, між якими існує однозначна взаємозв'язок. Лицьова панель являє собою ГІП і служить для введення або виведення цифрових, логічних і графічних даних. Блок-діаграма містить графічний код лицьовій панелі (блоки її елементів), а також інші елементи програми відповідно до реалізованим алгоритмом.

Графічні програми в LabVIEW називаються віртуальними приладами (Virtual Instruments, VI). Кожен блок графічної програми виконується тоді, коли на всіх його входах присутні необхідні дані, після чого вихідні дані блоку передаються на інші блоки. Що використовується в LabVIEW потокове програмування дозволяє автоматично розпаралелювати виконання коду. На відміну від мов з послідовним виконанням команд, графічні мови спочатку містять в собі інформацію про те, які частини коду слід виконувати паралельно. Паралелізм стає все більш важливим способом збільшення продуктивності програм, які не можуть ефективно працювати на останніх моделях багатоядерних процесорів через послідовного виконання коду.

Крім підтримки багатопоточності на багатоядерних системах, середа LabVIEW дозволяє створювати додатки для паралельних обчислень на ПЛІС, в яких виконання незалежних ділянок коду організовується абсолютно незалежними ділянками мікросхеми, що не впливають на продуктивність один одного.

Зазначені особливості, а також великий набір різних блоків, наявних сьогодні в LabVIEW, дозволяють створювати графічні програми як для моделювання, так і для обробки сигналів, що надходять в реальному часі від зовнішніх об'єктів.

Блоки для створення адаптивних КІХ-фільтрів і деякі з їхніх програм зосереджені в Adaptive Filter Toolkit (див. Табл. 3.2)

Таблиця 3.2

Блоки для КІХ-фільтрів

Алгоритм	Комплексна арифметика	Додатки			
		Шумоочистка	Компенсація ехо сигналів	Активне придушення шуму	Вирівнювання каналів зв'язку
LMS	+	+	+	+	+
NLMS	+	+	+	+	+
Sign-Error LMS	-	+	+	+	-
Блочний LMS в частотній області (на базі БПФ)	-	+	+	-	-
Filtered-x LMS	-	-	-	+	-
RLS	+	-	-	-	+
QR RLS	+	-	-	-	+
FTF	+	+	+	-	+

Adaptive Filter Toolkit і модуль LabVIEW FPGA дозволяють генерувати код для ПЛІС (Field-Programmable Gate Array, FPGA) і створювати на них прототипи адаптивних LMS КІХ-фільтрів в цілочисельні арифметиці. Такі адаптивні фільтри можуть обробляти сигнали з частотою дискретизації до декількох сотень кілогерц, що залежить від числа ВК адаптивного фільтра, числа розрядів вхідних і внутрішніх даних, типу використовуваної ПЛІС і її тактової частоти.

Проектування адаптивних фільтрів під ПЛІС здійснюється в три етапи: моделювання на хост-машині в арифметиці з плаваючою точкою, моделювання в арифметиці з фіксованою точкою і власне генерація FPGA-коду.

Моделювання в арифметиці з плаваючою точкою дозволяє визначити параметри адаптивного алгоритму і діапазон можливих значень його ВК, що потрібно для визначення точності представлення ВК в арифметиці з фіксованою точкою або в кінцевому підсумку в цілочисельні арифметиці в FPGA.

За допомогою моделювання в арифметиці з фіксованою точкою можна перевірити, чи задовольняють параметри цілочисельні представлення даних при реалізації адаптивного фільтра в FPGA (рис. 3.6). На цьому етапі можна приймати компромісні рішення між числом розрядів арифметичних операцій (а значить, і

необхідними ресурсами для FPGA-продажу) і точністю роботи адаптивного фільтра.

У разі задовільних результатів моделювання отримані параметри можна зберегти і створити FPGA-код адаптивного фільтра, що використовує ці параметри.

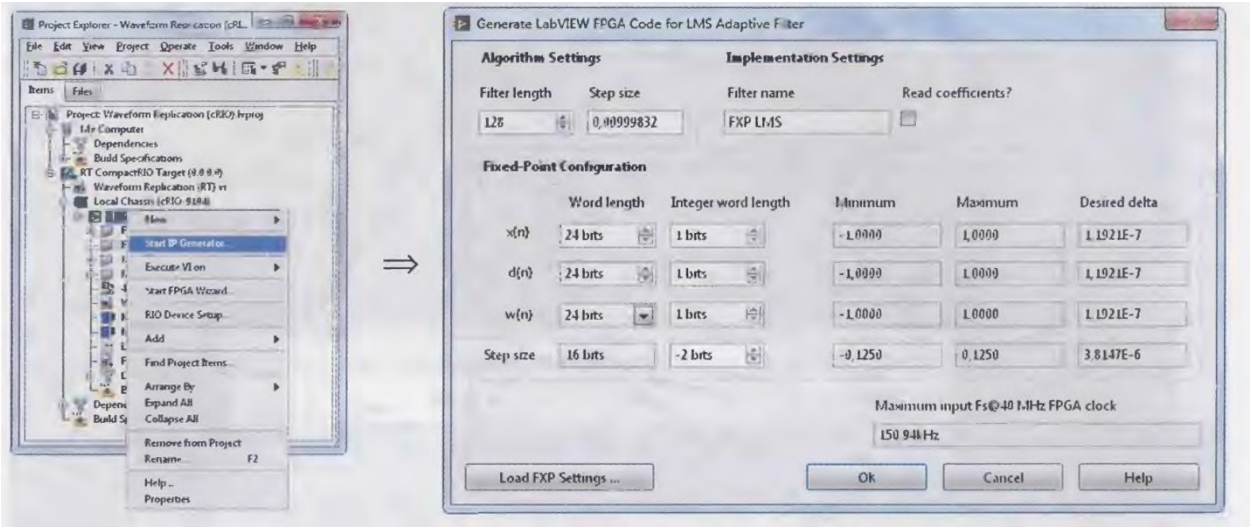


Рис . 3.4 Параметри для цілочисельні FPGA-реалізації адаптивного фільтра

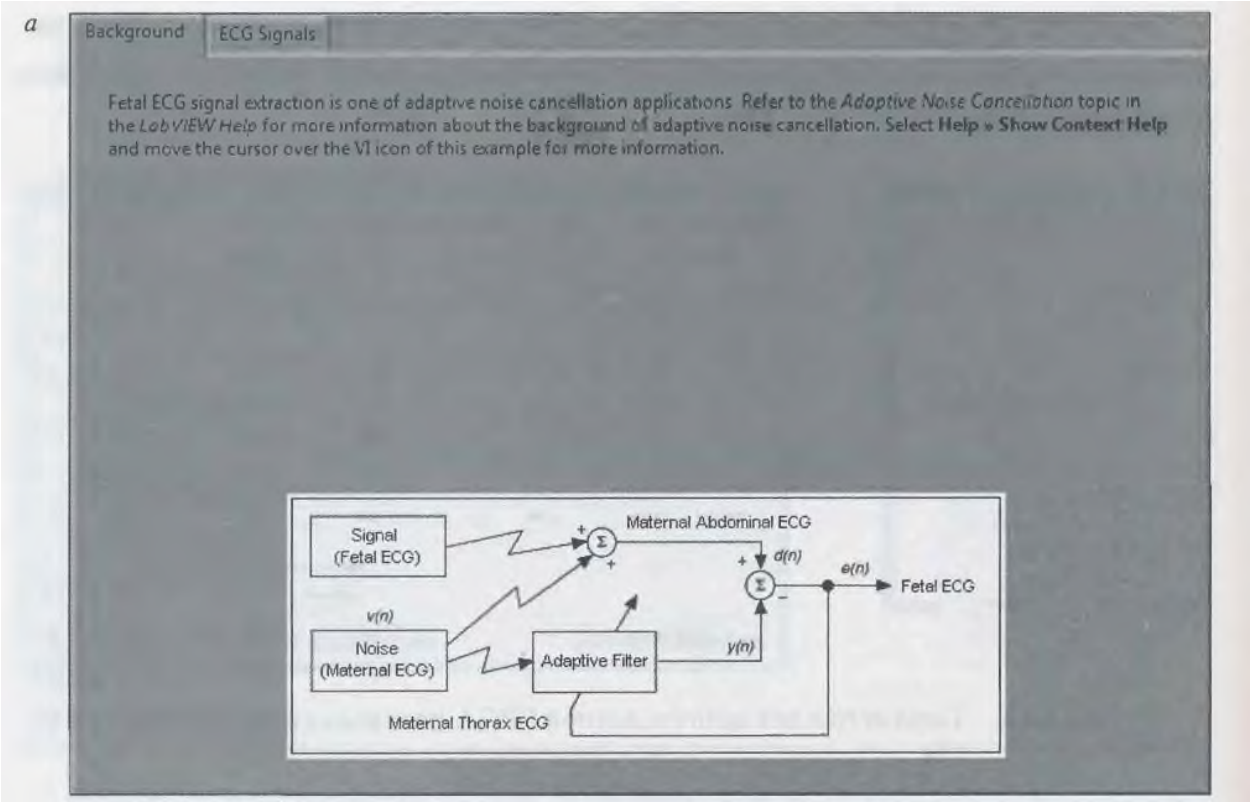
Як випливає з прикладу (див. Рис. 3.6), адаптивний фільтр на базі LMS алгоритму з числом ВК N = 128, з 24-розрядних поданням вхідних даних і ВК, а також 16-розрядних поданням кроку збіжність може обробляти вхідні сигнали з частотою дискретизації 150.94 кГц при використанні ПЛІС Virtex-Il (3000000 вентилів), що працює на тактовій частоті 40 МГц. Такий фільтр вимагає приблизно 3% вентилів від їх загального числа в зазначеній ПЛІС.

При компіляції коду може з'явитися можливість помножити тактову частоту і отримати, наприклад, 80 МГц замість 40 МГц. При цьому частота дискретизації оброблюваних сигналів також подвоїться.

При проектуванні FPGA-код компілюється в VHDL-код. Компілятор оптимізує VHDL-код таким чином, щоб програма максимально ефективно виконувалася на ПЛІС. Параметрами оптимізації є число задіяних логічних осередків, швидкість виконання програми, задіяна оперативна пам'ять на ПЛІС і так далі. Результати оптимізації, тобто задіяні ресурси ПЛІС, виводяться у вигляді звіту. У додатку Adaptive Filter Toolkit проект адаптивного фільтра на ПЛІС, зокрема, використовується при вирішенні прикладної задачі шумозаглушення в реальному масштабі часу. Приклади розв'язання з допомогою Adaptive FilterToolkit інших прикладних задач, таких як виділення адаптивна компенсація

ехо-сигналів, адаптивна ідентифікація системи, адаптивне вирівнювання каналу зв'язку, адаптивне зворотне управління, адаптивне лінійне передбачення, активне придушення шуму, і ряд інших приведені в «Довідкової системі» середовища LabVIEW. Результати виконання цих прикладів показані на рис. 3.5-3.10.

До стандартних безкоштовно поширюваним адаптивним додатків LabVIEW також відноситься програма LMS Adaptive Filter Lab Demo, за допомогою якого можна досліджувати адаптивний фільтр на базі LMS-алгоритму при вирішенні задачі ідентифікації лінійної системи. Це ж додаток дозволяє проводити порівняльне моделювання адаптивного фільтра, що використовує різні варіанти LMS-алгоритму: класичний LMS-алгоритм, блоковий LMS алгоритм, Sing-Error LMS-алгоритм і NLMS-алгоритм. Приклади результатів використання цього додатка показані на рис. 3.11-3.12. Вони дають уявлення про те, як виглядають графічні програми в середовищі LabVIEW.



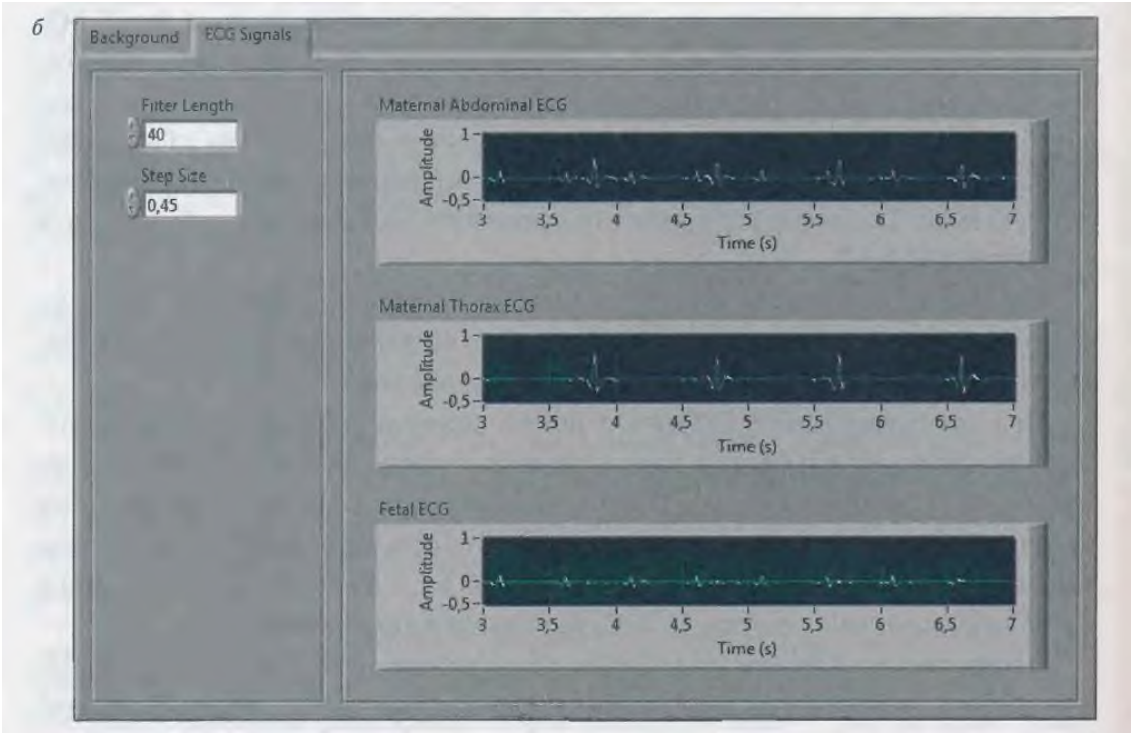


Рис. 3.5 Шумозаглушення: а) принцип; б) віртуальний прилад

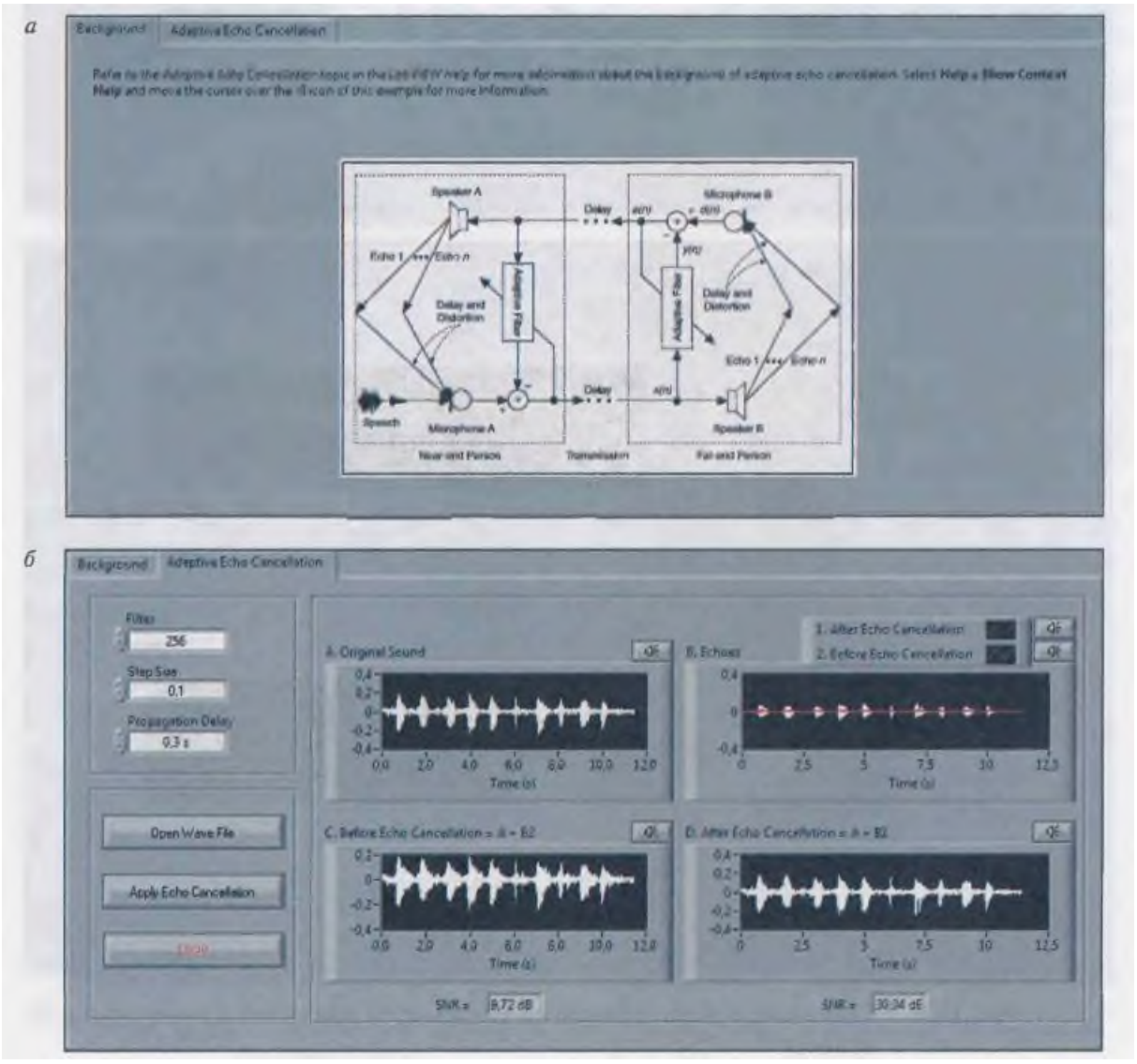


Рис. 3.6 Адаптивна компенсація exo-сигналів: а) принцип; б) віртуальний прилад

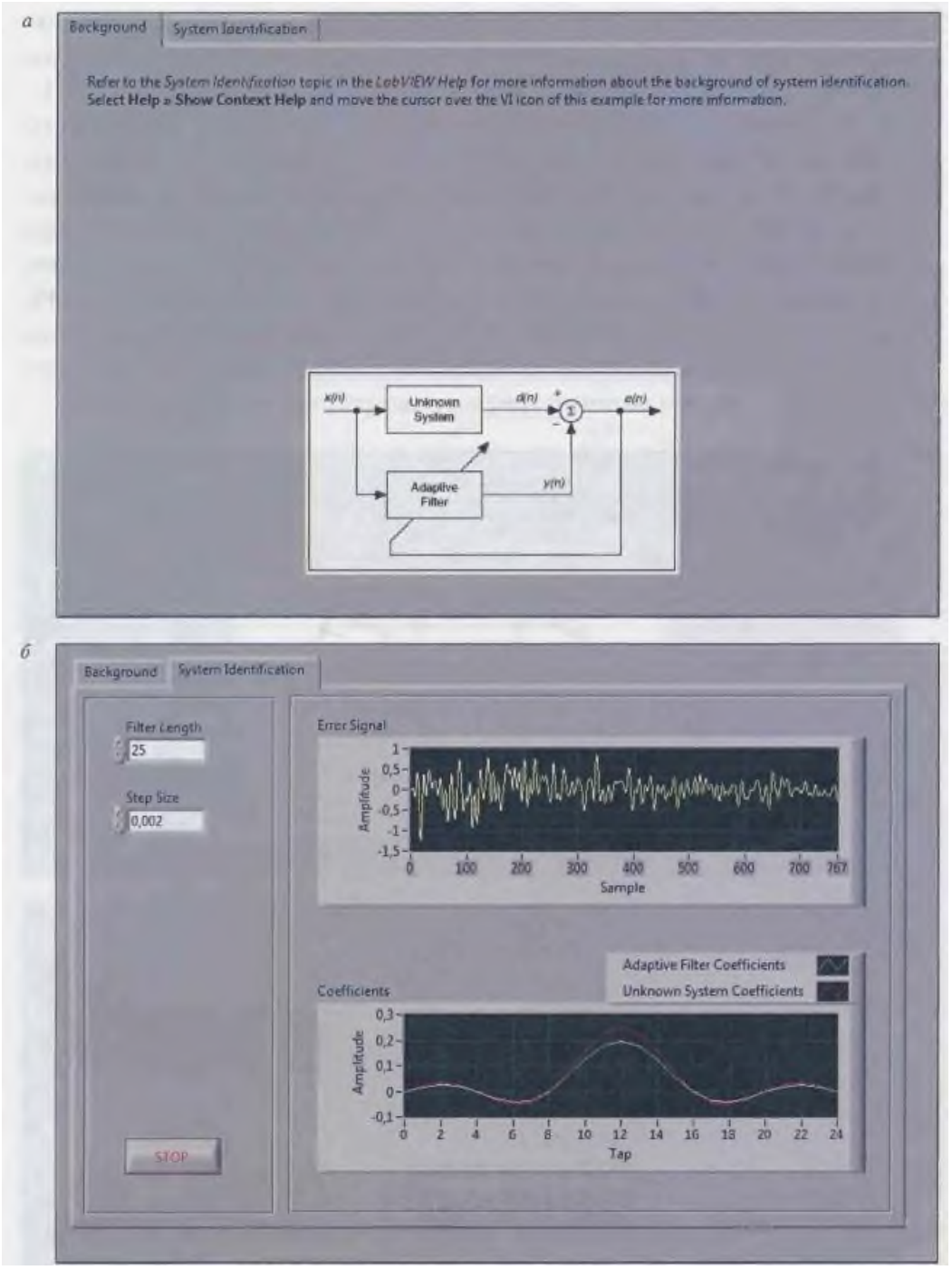


Рис. 3.7 Адаптивна ідентифікація системи: а) принцип; б) віртуальний прилад

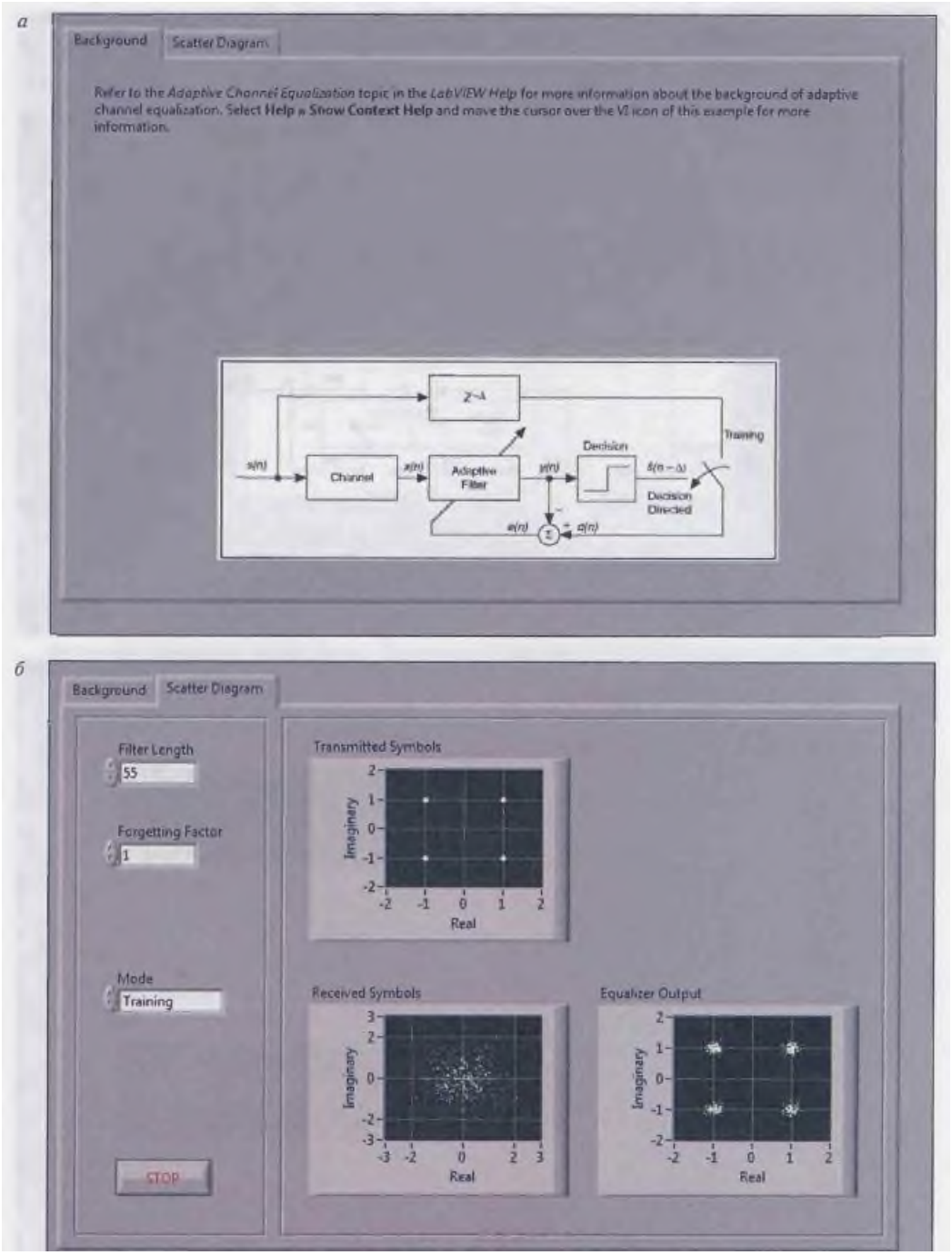


Рис. 3.8 Адаптивне вирівнювання каналу зв'язку: а) принцип; б) віртуальний прилад



Рис. 3.9 Адаптивне зворотне управління: а) принцип; б) віртуальний прилад

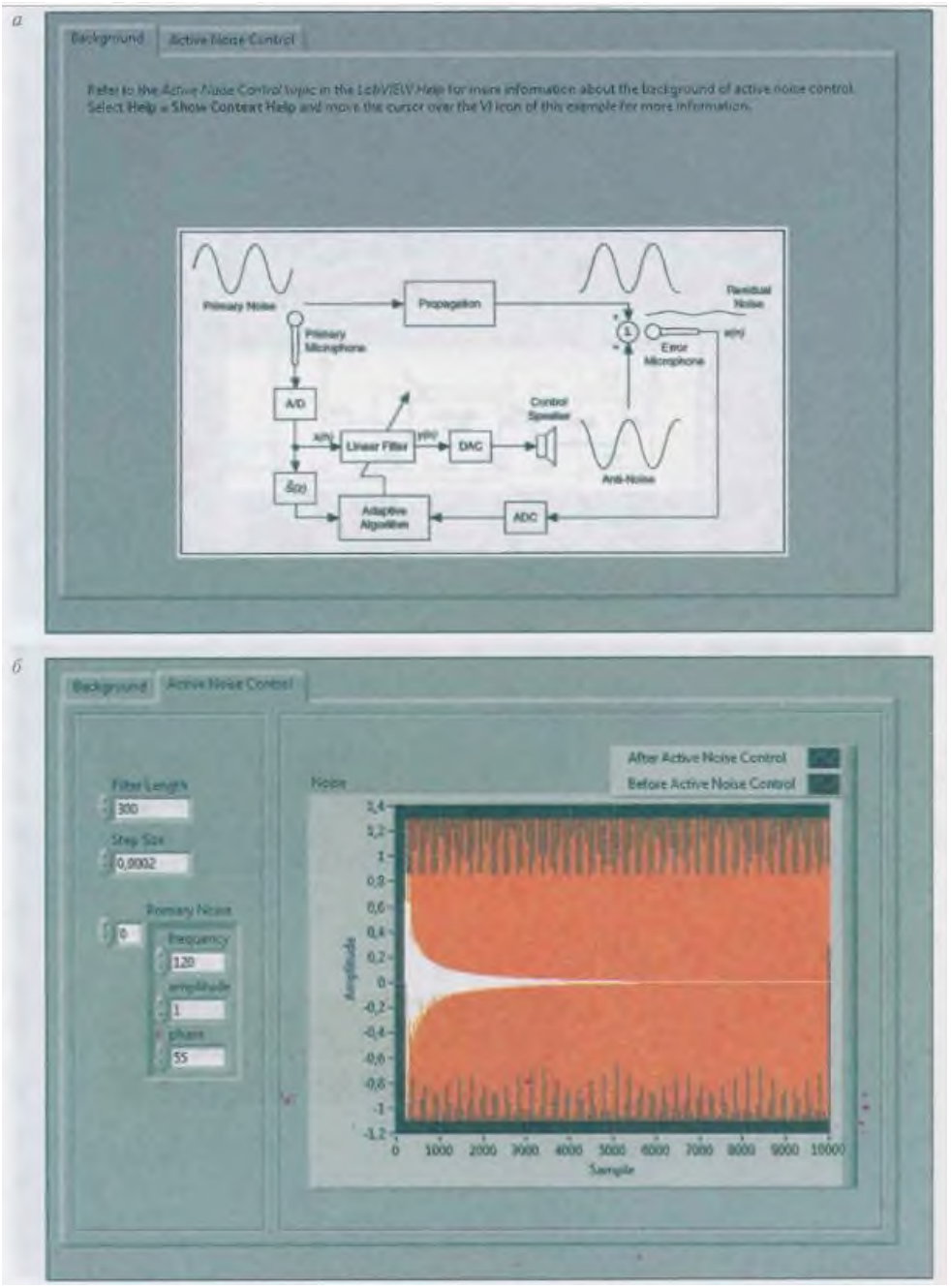


Рис. 3.10 Активне придушення шуму: а) принцип; б) віртуальний прилад

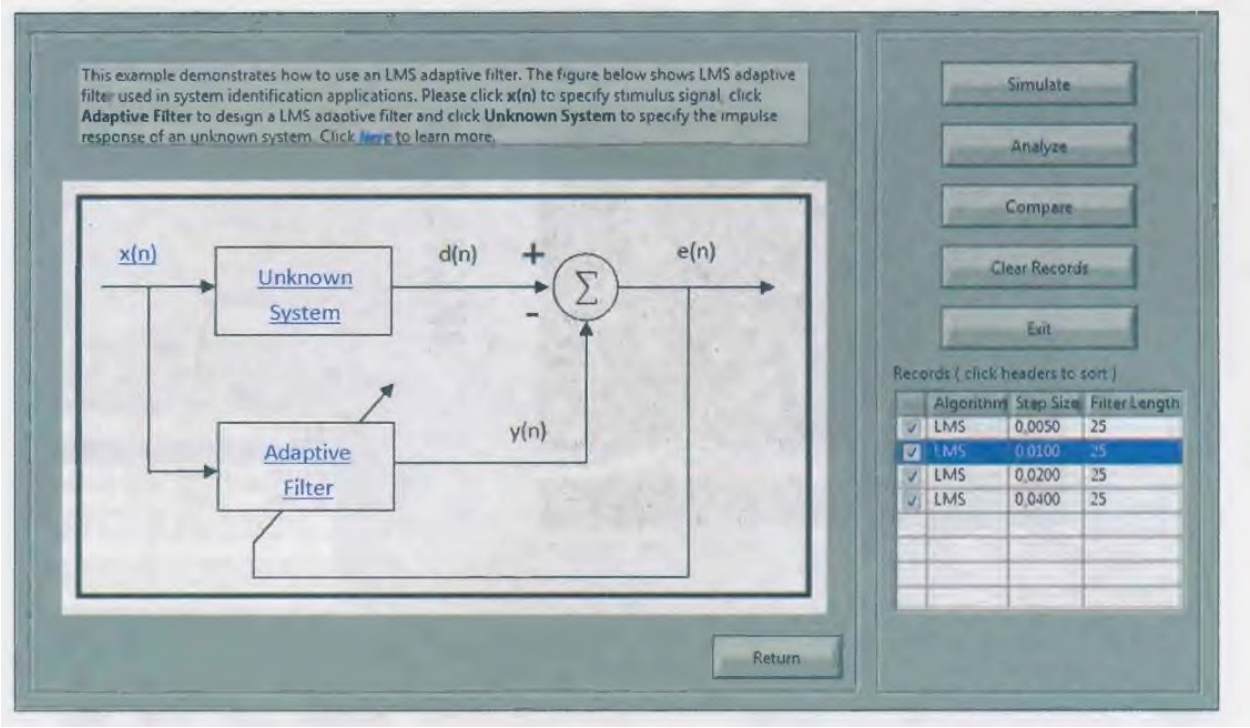


Рис. 3.11 LMS Adaptive Filter Lab Demo: принцип

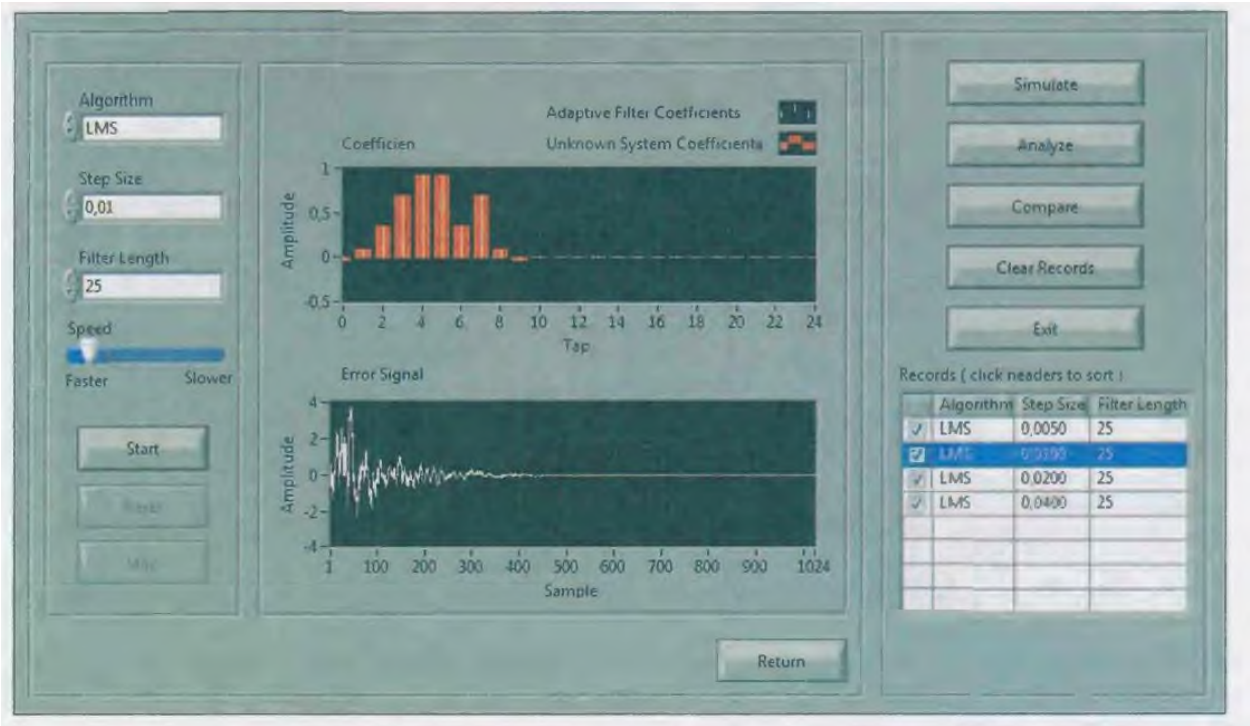
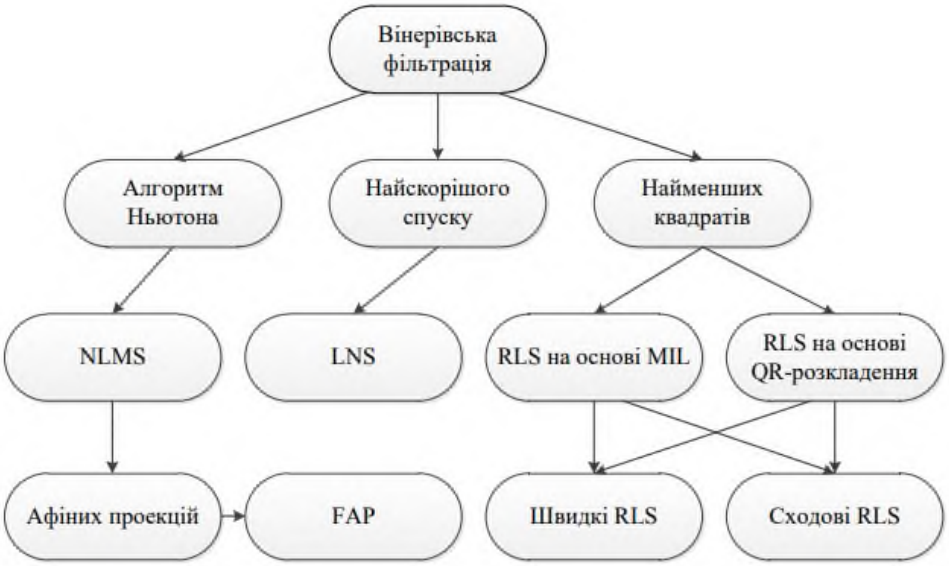


Рис. 3.12 LMS Adaptive Filter Lab Demo: перехідний процес

Таким чином, середовище розробки LabVIEW має бібліотеку основних різновидів алгоритмів адаптивної фільтрації (див. Табл. 2), за допомогою яких можна проводити дослідження різних адаптивних пристроїв, а також обробляти сигнали, що надходять за допомогою обладнання компанії National Instruments з фізичних об'єктів навколишнього світу



ВИСНОВКИ

У процесі виконання даної магістерської роботи було досліджено адаптивні фільтри та їх використання, зокрема на приймальному каналі модему передачі даних. Було приведено приклади розрахунків алгоритмів та показані схеми для одноканальних та багатоканальних адаптивних фільтрів. Також було показано як можна проектувати і тестувати адаптивні пристрої в середовищах MATLAB та LabVIEW.

Виходячи з проведених досліджень у роботі ми отримали важкодоступну інформацію про адаптивну фільтрацію сигналів та про адаптивну фільтрацію на приймальному каналі модему передачі даних. Ця інформація важкодоступна для українських людей. Так як більшість інформації було взято з англомовних джерел. За допомогою цього може бути покращено і полегшено вивчення адаптивної фільтрації та адаптивних фільтрів. Також ми дізнались про користь і необхідність в адаптивній фільтрації. Більшість пристроїв зараз використовують адаптивні фільтри. Від складних пристроїв, наприклад ЕКГ(електрокардіограма) в вузько спрямованому спектрі, до массового використання наприклад, телевізори.

Адаптивна корекція сигналу має низку переваг. Наприклад:

- Варіативність в використані алгоритмів.
- Різні види адаптивної фільтрації.
- Різна складність адаптивної фільтрації.
- Існування багатьох пристроїв для адаптивної корекції сигналів.

В результаті отримуємо прийом та передачу сигналу з високою якістю та надійністю. Звісно, кожна система може дати збій через незліченну кількість факторів, але за допомогою адаптивної фільтрації можна вирішити велику кількість проблем цифрової обробки сигналів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/adaptive-equalizer

2.https://www.facebook.com/DarkCABL/posts/icfr-icfr-stands-for-in-channel-frequency-response-icfr-describes-the-flatness-o/643561362410859/

3. https://broadbandlibrary.com/how-adaptive-equalization-works/

4. https://studfile.net/preview/3545679/

5. https://fs.guap.ru/dissov/maslakov_ml/full.pdf

6. https://scask.ru/a_book_zip.php?id=111

7. https://patents.google.com/patent/US3829780

8. Тяжев А.И. Адаптивный цифровой корректор амплитудно-частотных характеристик каналів 2016

9. Джиган В. И. Библиотека алгоритмов адаптивной фильтрации // Доклады 6-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применения (DSPA-2004)» (Российская академия наук: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, 31 марта — 2 апреля 2004 г.). — Москва, 2004. - Том 1. - С. 89-94

10. Джиган В. И. Многоканальные линейно-ограниченные RLS алгоритмы со скользящим окном // Радиотехника. — 2005. — №10. — С. 32—36.

11. Уидроу Б., Стирнз С. Д. Адаптивная обработка сигналов. Пер. с англ, под ред. Шахгильдяна В. В. — М.: Радио и связь, 1989. — 440 с

12. Regalia P. A. Adaptive HR filtering in signal processing and control. — New York: Marcel Dekker, Inc., 1995. — 678 p.

13. Джиган В. И. Адаптивные фильтры и их приложения в радиотехнике и связи. Часть 1 // Современная электроника. — 2009. — №9. — С. 56—63.

14. Джиган В. И. Адаптивные фильтры и их приложения в радиотехнике и связи. Часть 2 // Современная электроника. — 2010. — №1. — С. 72—77

15. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы – 2016

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

« ПОБУДОВА АДАПТИВНОГО КОРЕКТОРА МОДЕМУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ПРИЙМАЛЬНОГО КАНАЛУ

Виконав: студент гр. ТСДМ-63 Осифляк Д.П.

Керівник: КТН, доцент Малюженко М.В.

Київ-2025

Актуальність

Адаптивні фільтри завжди будуть актуальні коли фільтри з фіксованими параметрами не можуть впоратись. Зараз існує велика кількість пристроїв, які без адаптивної фільтрації не змогли б нормально працювати. Наприклад в адаптивні компенсатори шумів, також адаптивні фільтри використовуються при регулюванні параметрів електронного каналу.

Об’єкт дослідження

- Адаптивні фільтри в приймальному каналі модема.

Предмет дослідження

- Використання адаптивних фільтрів в модемах та решті пристроїв.

Мета дослідження

- Дослідження роботи адаптивних фільтрів на приймальному каналі модему передачі даних.

Завдання дослідження:

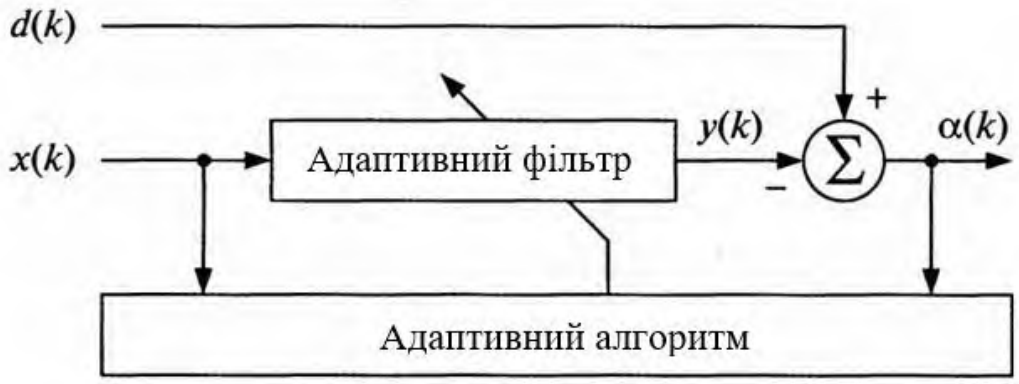
- дослідити історію адаптивної корекції в цифровій обробці сигналів;
- проаналізувати різновиди адаптивних фільтрів та їх алгоритми і основи підрахунків;
- Розглянути як відбувається моделювання адаптивних фільтрів за допомогою MatLab та LabVIEW;
- проаналізувати існуючі методи та засоби адаптивної фільтрації та її використання в сучасному світі;

Загальна схема адаптивного коректора

У загальному випадку одноканальний адаптивний фільтр являє собою пристрій, показане на рис. 1.1. Тут x (k) - вхідний сигнал, d (k) -потрібний сигнал (який використовується в позначенні символ «d» відбувається від англійського слова «desired», тобто потрібного), y (k) - вихідний сигнал, a (k) = d (k) -y (к) - сигнал помилки, k - індекс дискретного часу або номер відліку оброблюваного сигналу. Ці відліки зазвичай рівномірно розподілені на осі часу як t = kTs = k / Fs, де Ts - період дискретизації, а Fs - частота дискретизації оброблюваних сигналів.

Тривалість однієї ітерації адаптивного алгоритму, таким чином час, протягом якого здійснюється розрахунок ВК, використовуваних для обчислення вихідного сигналу адаптивного фільтра на наступній ітерації, в більшості випадків дорівнює одному періоду дискретизації. Якщо розрахунок ВК ведеться повільно, тобто протягом декількох періодів дискретизації, то формування сигналу y (k) все одно необхідно здійснювати на кожному періоді дискретизації для задоволення вимог теореми Котельникова.

Для роботи адаптивного фільтра, як правило, недостатньо інформації, одержуваної тільки з вхідного сигналу. Джерелом інформації, якої бракує зазвичай служить необхідний сигнал d (k), фізична природа якого визначається конкретним додатком адаптивного фільтра. Додаток є одним з факторів, що визначають вимоги, що пред'являються до адаптивного фільтру на етапі його проектування.

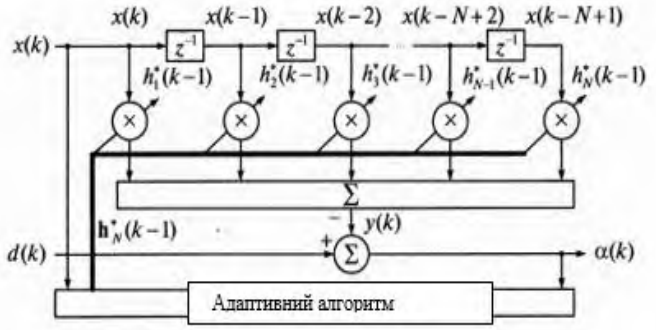


Одноканальний адаптивний фільтр

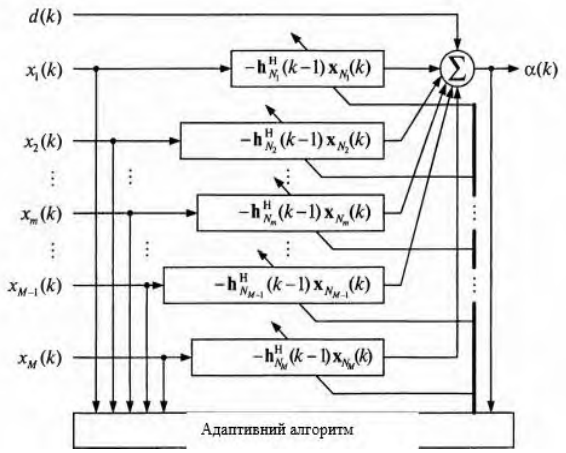
Вимоги до адаптивних фільтрів

1. Додатки. Тип додатка визначається сигналами, які надходять з навколишнього середовища в якості вхідного x (k) і необхідного d (k) сигналів. Найбільш відомими і широко використовуваними застосуваннями адаптивних фільтрів є вже згадувані ехо компенсатори, еквалайзери, адаптивні решітки і ряд інших пристроїв.

2. Структури адаптивних фільтрів. Подібно фільтрам з фіксованими ВК, існують дві основні структури адаптивних фільтрів. Це фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ), або трансверсально, і фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (НІХ), або рекурсивні. Структура одноканального адаптивного КІХ-фільтра наведена на слайді. В адаптивних антенні решітках (ААР) або ехо компенсаторах і еквалайзерах обладнання цифрових систем зв'язку з квадратурної модуляцією обробляються комплексні сигнали. Це природним чином призводить до необхідності використання адаптивних фільтрів з комплексними ВК. У загальному випадку адаптивні КІХ-фільтри можуть бути багатоканальними і при цьому утримувати неоднакове число ВК в каналах вектор ВК такого М-канального адаптивного фільтра



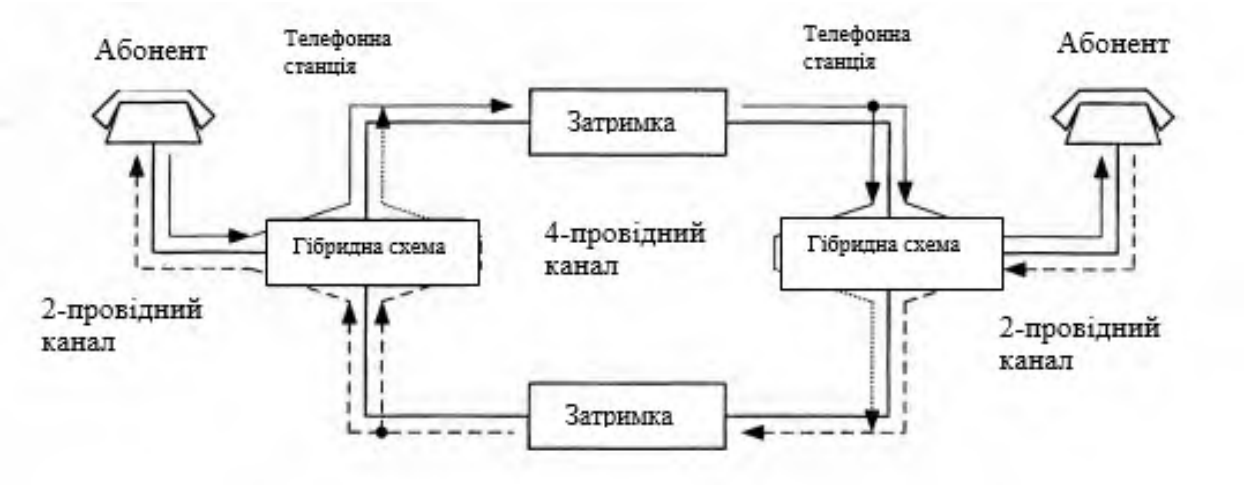
Структура одноканального КІХ фільтра



Багатоканальний КІХ фільтр

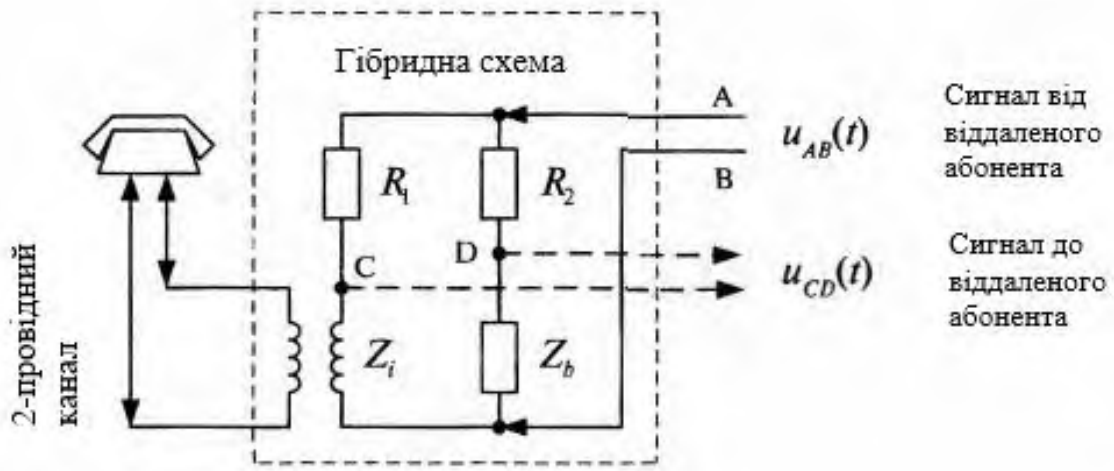
3. Алгоритми. Адаптивний алгоритм - це процедура обчислення ВК, що забезпечують мінімізацію цільової функції адаптивного фільтра, тобто виконання критерію його роботи. Алгоритм характеризується видом використовуваної цільової функції, методом пошуку оптимального рішення і природою сигналів помилок. В адаптивних алгоритмах, як правило, використовуються арифметичні операції як над апріорними, так і над апостеріорними помилками.

Придушення сигналів електричного exo

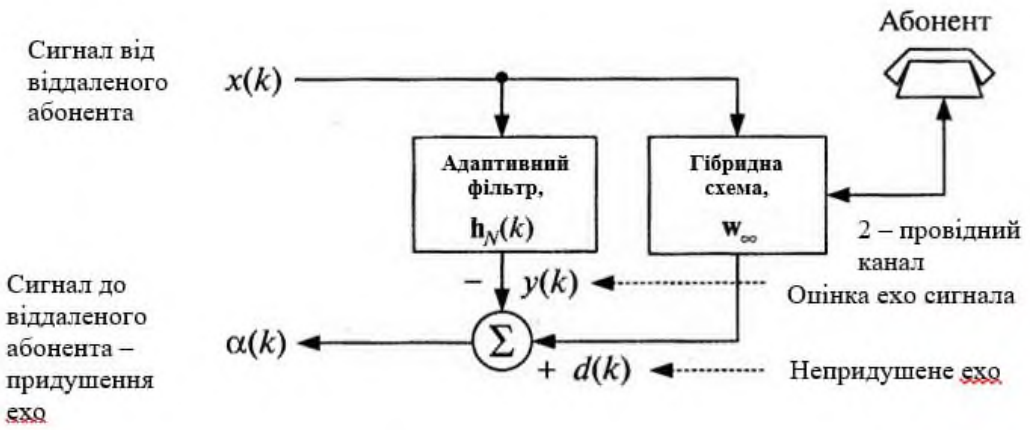


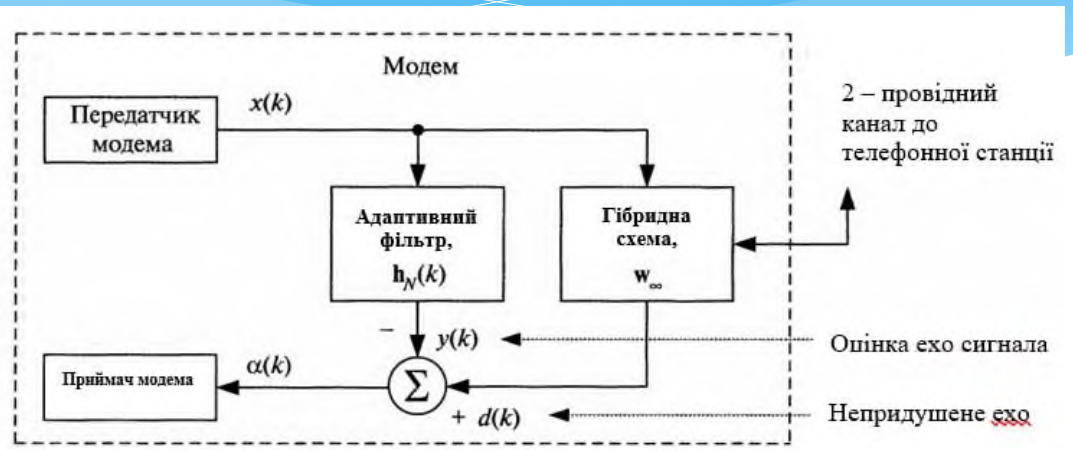
Так історично склалося, що через економію провідників двонаправлений зв'язок між телефонним апаратом абонента і комутаційним устаткуванням телефонної станції здійснюється за допомогою двопровідного каналу зв'язку без посилення сигналів, так як ця ділянка телефонної мережі в усьому світі зазвичай не перевищує кількох кілометрів і втрати (ослаблення) сигналів через опір використовуваних провідників є несуттєвими або допустимими.

Зв'язок же між телефонними станціями здійснюється на значно більші відстані, а значить, сигнали схильні до помітного ослаблення. Тому що передаються між станціями сигнали необхідно посилювати, чому зв'язок на цій ділянці мережі може бути тільки односпрямований. Вона здійснюється за двома односпрямованими двопровідними каналами, тобто по чьотирьохпровідному каналу. Перехід між двох і чотирьохпровідними каналами здійснюється за допомогою так званих гібридних або диференціальних схем («hybrid circuits»). Один з можливих варіантів такої схеми показаний на слайді



Придушення сигналів електричного exo в модемах



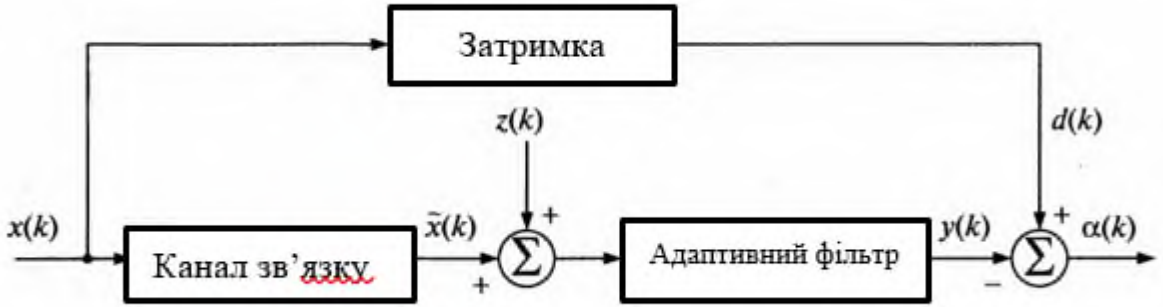


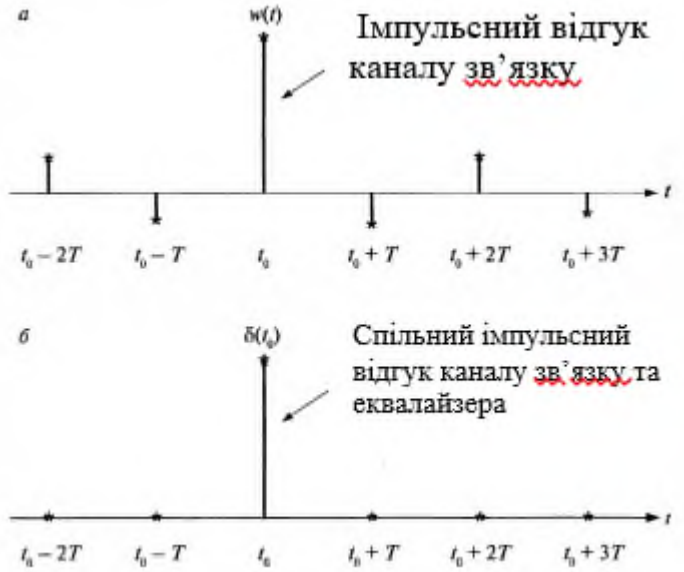
Прийнятий віддаленим абонентом власний затриманий і ослаблений сигнал називається сигналом електричного exo. Для забезпечення комфортної розмови при зв'язку exo сигналу необхідно чим більша затримка, тим більше необхідно подавляти

Відомо, що гібридна схема моделюється лінійним КІХ-фільтром. Тому завдання придушення сигналів електричного луни формалізується як завдання ідентифікації імпульсного відгуку цього фільтра (рис. 2.4).

Аналогічно вирішується завдання придушення сигналів електричного exo в модемах дротових систем зв'язку, де також потрібно розділяти сигнали між дво- і чотирьохпровідними каналами, що утворюють канали прийому та передачі даних

Вирівнювання АЧХ та вирівнювання електричного каналу звязку

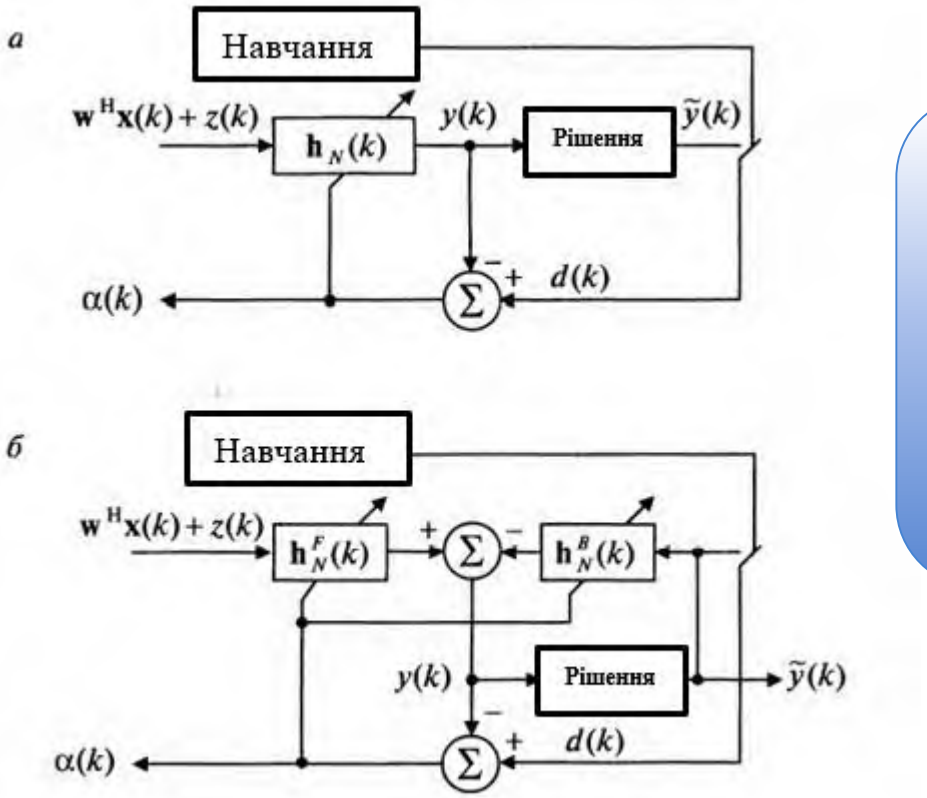




Іншим прикладом використання адаптивних фільтрів є завдання зворотної ідентифікації об'єкта. Вирішення цього завдання широко використовується для вирівнювання характеристик електричних каналів зв'язку за допомогою адаптивних еквалайзерів. Необхідність вирівнювання каналу зв'язку виникає через те, що при передачі цифрових даних по каналах з обмеженою пропускною здатністю виникає явище, зване міжсимвольною інтерференцією.

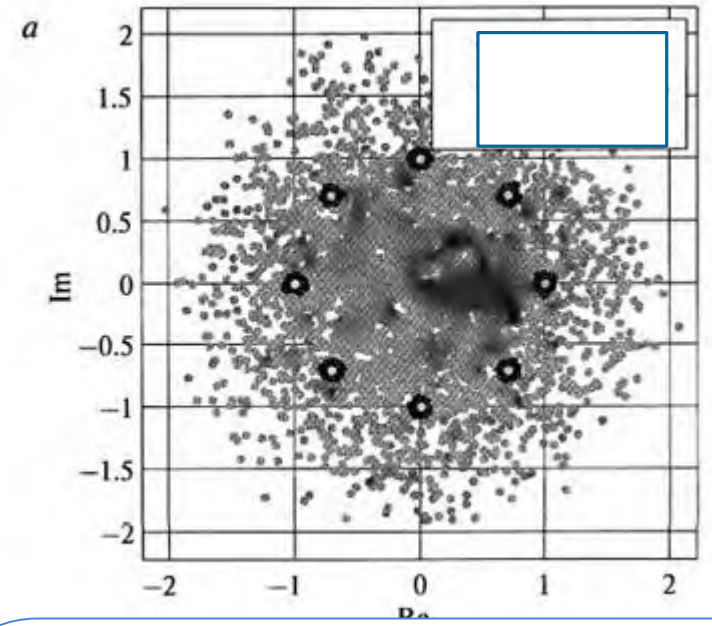
Міжсимвольна інтерференція, поряд з шумом каналу z (k) позначається на правильності рішення про відповідність прийнятого інформаційного символу x(k) символу x(k), переданому по каналу зв'язку. Якби цей канал був просто лінією затримки на час, то сигнал який приймається (Інформаційні символи) можна було б легко оцінювати (розрізняти). Однак більшість каналів зв'язку з математичної точки зору представляють собою КІХ-фільтр(кінцева імпульсна характеристика) з імпульсним відгуком.

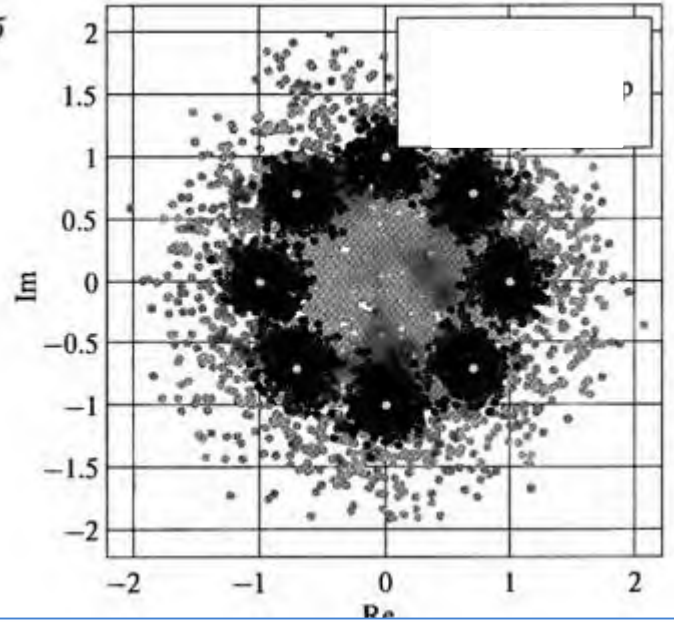
Еквалайзери без та з зворотним зв’язком

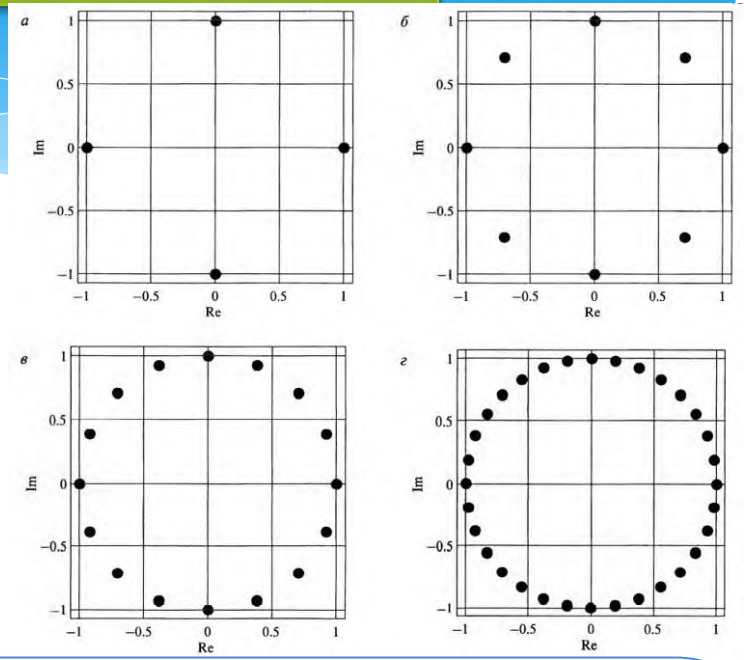


Існує два типи еквалайзерів: без зворотного зв'язку і зі зворотним зв'язком. Адаптивний фільтр еквалайзера зі зворотним зв'язком можна розглядати як двоканальний адаптивний фільтр. Еквалайзери зі зворотним зв'язком забезпечують більш якісне вирівнювання характеристик каналу, так як вихідний сигнал такого еквалайзера після навчання частково формується з уже раніше прийнятих «правильних» символів.

Еквалайзери на базі NLMS та RLS алгоритмі







Якщо ж порівняти поведінку розглянутих, еквалайзерів з еквалайзерами на базі NLMS-алгоритму, то в обох випадках результати будуть гіршими. Еквалайзер на базі цього алгоритму вимагає в десятки разів перевищує по тривалості тренувальну послідовність для забезпечення збіжності, а також деякого мистецтва при виборі оптимального значення параметра p, Це також свідчить про перевагу адаптивних фільтрів на базі обчислювально-складних RLS-алгоритмів перед фільтрами на базі простих градієнтних алгоритмів.

Слід також зазначити, що для вирівнювання каналів зв'язку можуть застосовуватися і так звані сліпі еквалайзери тобто ті які не потребують тренувальних послідовностей. Один з можливих способів побудови таких пристроїв ґрунтується на використанні CM-критерію (Constant Modulus, критерій сталості модуля інформаційних символів). В разі, якщо передані інформаційні символи задовольняють цьому критерію. Адаптивні алгоритми на основі CM-критерію застосовуються для обробки PSK сигналів, а також інших сигналів, що характеризуються постійним значенням модуля інформаційних символів.

Рекомендації щодо застосування методів та засобів розслідування кіберінцидентів в корпоративній інформаційній системі

Алгоритм	Комплексна арифметика	Додатки			
		Шумоочистка	Компенсація exo сигналів	Активне придушення шуму	Вирівнювання каналів зв'язку
LMS	+	+	+	+	+
NLMS	+	+	+	+	+
Sign-Error LMS	-	+	+	+	-
Блочний LMS в частотній області (на базі БПФ)	-	+	+	-	-
Filtered-x LMS	-	-	-	+	-
RLS	+	-	-	-	+
QR RLS	+	-	-	-	+
FTF	+	+	+	-	+

Крім підтримки багатопоточності на багатоядерних системах, середа LabVIEW дозволяє створювати додатки для паралельних обчислень на ПЛІС, в яких виконання незалежних ділянок коду організовується абсолютно незалежними ділянками мікросхеми, що не впливають на продуктивність один одного.

Зазначені особливості, а також великий набір різних блоків, наявних сьогодні в LabVIEW, дозволяють створювати графічні програми як для моделювання, так і для обробки сигналів, що надходять в реальному часі від зовнішніх об'єктів.

Блоки для створення адаптивних КІХ-фільтрів і деякі з їхніх програм зосереджені в Adaptive Filter Toolkit

Adaptive Filter Toolkit і модуль LabVIEW FPGA дозволяють генерувати код для ПЛІС (Field-Programmable Gate Array, FPGA) і створювати на них прототипи адаптивних LMS КІХ-фільтрів в цілочисельні арифметиці. Такі адаптивні фільтри можуть обробляти сигнали з частотою дискретизації до декількох сотень кілогерц, що залежить від числа ВК адаптивного фільтра, числа розрядів вхідних і внутрішніх даних, типу використовуваної ПЛІС і її тактової частоти.

Висновки

У процесі виконання даної дипломної роботи було досліджено адаптивні фільтри та їх використання, зокрема на приймальному каналі модему передачі даних. Було приведено приклади розрахунків алгоритмів та показані схеми для одноканальних та багатоканальних адаптивних фільтрів.

Виходячи з проведених досліджень у роботі ми отримали важкодоступну інформацію про адаптивну фільтрацію сигналів та про адаптивну фільтрацію на приймальному каналі модему передачі даних. Ця інформація важкодоступна для українських людей. Так як більшість інформації було взято з англомовних джерел.

Звісно, кожна система може дати збій через незліченну кількість факторів, але за допомогою адаптивної фільтрації можна вирішити велику кількість проблем цифрової обробки сигналів.