

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

ЖАРОВСЬКИЙ РУСЛАН ОЛЕГОВИЧ



УДК 550.34:519.218

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА
СЕЙСМІЧНИХ СИГНАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ОРТОГОНАЛЬНОЇ
ФІЛЬТРАЦІЇ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Тернопіль – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник : доктор технічних наук, професор,
лауреат Державної премії України
в галузі науки і техніки
Щербак Леонід Миколайович,
Приватний вищий навчальний заклад
«Київський міжнародний університет»,
завідувач кафедри комп'ютерних наук.

Офіційні опоненти : доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Владимирський Олександр Альбертович,
Інститут проблем моделювання в енергетиці
імені Г.Є. Пухова НАН України (м. Київ),
провідний науковий співробітник;

доктор технічних наук, доцент
Сверстюк Андрій Степанович,
Тернопільський національний медичний університет
імені І.Я. Горбачевського,
доцент кафедри медичної інформатики.

Захист відбудеться " 09 " квітня 2021 року о 14:00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради **Д58.052.01** в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001 м. Тернопіль, вул. Руська 56.

Автореферат розісланий " 5 " березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Б.Г. Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Науково – технічні проблеми розвідки корисних копалин, включаючи запаси нафти і газу, є стратегічними проблемами кожної країни і в повній мірі відносяться до нашої держави.

Основним методом геофізичної розвідки корисних копалин, що базується на дослідженні структури поверхні земної кори, є сейсмічний. Такий метод є найбільш використовуваним і відноситься до найбільш достовірних і надійних методів розвідки. При дослідженні структури геологічного середовища в сейсморозвідці використовують поздовжні і поперечні пружні хвилі, які несуть інформацію про розміщення корисних копалин в товщі землі. Вивчаючи поширення цих хвиль, визначають форму границь, на яких вони виникли, а також отримують дані про пружні характеристики шарів земної кори. Актуальними задачами сейсморозвідки є виявлення сейсмічних сигналів, які є корисними сигналами і несуть інформацію про структуру геофізичного середовища при дії різного роду завад, які виникають при розповсюдженні пружних хвиль.

Результати опублікованих праць свідчать, що при обробці та інтерпретації сейсмічних даних все більшого значення набуває використання статистичних методів. Вагомий внесок у розвиток таких методів в сейсморозвідці зробили Гольцман Ф. М., Нахамкін Н. А., Козлов Е.А., Гольдін С.В., Яновський А. К., Робінсон Е. А. і інші. Одним із методів статистичної обробки зашумлених сигналів є кореляційний метод, який полягає у процесі виділення і розпізнавання сейсмічних хвиль на сейсмограмах і часових розрізах. Результати таких досліджень опубліковані у ряді наукових праць, в тому числі Бендат Дж., Пірсол А., Яглом А. М., Драган Я.П., Марченко В.Б., Яворський І.М., Троян В.Н., Шериф Р., Гурвіч І. І. та інші.

Значна кількість сейсмічних систем працює в умовах, коли інтенсивність корисного сейсмічного сигналу перевищує рівень завад, в основному завдяки використанню вибухових джерел формування пружних хвиль. Однак впровадження в сучасній сейсморозвідці екологічно чистих вібраційних методів досліджень приводить до зниження інтенсивності корисних сигналів і відповідно зменшення відношення сигнал/завада на входах сейсмодатчиків. Тому задачі вимірювання характеристик сейсмічних сигналів слабкої інтенсивності за наявності завад набувають значної актуальності. На перший план виносяться задачі з підвищення точності, завадостійкості і достовірності результатів досліджень, а також розробки ефективних методів їх розв'язку з використанням завадостійких кореляційних і ортогональних методів. Використання сучасних засобів обчислювальної техніки в сейсмічних системах дає нові потенціальні можливості реалізації цифрових методів обробки сейсмічних сигналів, які на сьогодні в повній мірі не використовуються.

Тому наукова задача вдосконалення математичних моделей сейсмічних сигналів і кореляційного методу з застосуванням ортогональної обробки з подальшим створенням відповідного алгоритмічного і програмного забезпечення для реалізації цифрових методів обробки сигналів в системах сейсморозвідки є актуальною і важливою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності з дослідженнями, які проводились у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя і є складовою частиною науково-дослідницької теми №0112U002203 «Математичне моделювання, методи обробки та імітації біометричних циклічних сигналів в інформаційних системах».

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є обґрунтування математичної моделі сейсмічних сигналів і розробка статистичного методу їх кореляційної обробки з попередньою ортогональною фільтрацією для підвищення ефективності кореляційних систем сейсмозв'язки.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Провести аналіз відомих публікацій з проблем сучасної сейсмозв'язки, методів побудови і структури сучасних кореляційних сейсмічних систем, методів ортогональної і цифрової обробки сигналів. На основі проведеного аналізу обґрунтувати актуальність науково-технічної задачі дослідження і визначити перелік завдань для її розв'язання.

2. Обґрунтувати математичні моделі сейсмічних корисних сигналів і завад з використанням лінійних випадкових процесів, визначити їх основні характеристики в рамках кореляційної теорії.

3. Розробити алгоритми та програмне забезпечення для статистичної обробки експериментальних даних сейсмічних сигналів, а також для комп'ютерного моделювання реалізацій сейсмічних сигналів на базі запропонованих математичних моделей корисних сигналів і завад.

4. Обґрунтувати вибір дискретних ортогональних фільтрів для їх використання в кореляційних системах для розв'язку задач виявлення сейсмічних сигналів при дії завад.

5. На основі результатів порівняльного аналізу роботи типової кореляційної системи і кореляційної системи з вхідними ортогональними фільтрами при статистичній обробці сейсмічних сигналів обґрунтувати ефективність роботи кореляційної системи з вхідними ортогональними фільтрами.

6. Розробити адаптивний метод фільтрації для збільшення відношення сигнал/завада при статистичній обробці сейсмічних сигналів на основі використання складних дискретних ортогональних фільтрів в кореляційних системах, як перспективний метод подальшого розвитку досліджень кореляційної ортогональної обробки сейсмічних сигналів і створити відповідне програмне забезпечення для ортогональної кореляційної обробки сейсмічних сигналів.

7. Розробити практичні рекомендації застосування кореляційних систем з вхідними ортогональними фільтрами в системах сейсмозв'язки за результатами виконаних досліджень.

Об'єкт дослідження – фізичні процеси формування, розповсюдження та статистична оцінка характеристик корисних сигналів в сучасних системах сейсмозв'язки при дії завад.

Предмет дослідження – математичні моделі та статистичні методи обробки сейсмічних сигналів в кореляційних системах з вхідними ортогональними фільтрами.

Методи дослідження базуються на методах теорії випадкових процесів при обґрунтуванні моделей сейсмічних завад, математичної статистики і статистичної сейсморозвідки для обґрунтування моделі корисного сейсмічного сигналу, основ побудови сучасних кореляційних систем, цифрової обробки та ортогональної фільтрації сигналів при обґрунтуванні вибору та визначенні характеристик фільтрів Лагерра для підвищення співвідношення сигнал/завада на виході кореляційних систем.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Отримано подальший розвиток моделі сейсмічних сигналів у виді суми затухаючих гармонічних коливань і завад у виді лінійного стаціонарного процесу, характеристики яких визначаються за результатами статистичної обробки експериментальних даних, що дало можливість врахувати фізичний механізм їх формування при розповсюдженні сейсмічних хвиль.

2. Удосконалено метод лінійної фільтрації сейсмічних сигналів на основі використання ортогональних фільтрів Лагерра дискретного аргументу, які мають характерні властивості, що дозволяють забезпечити збільшення співвідношення сигнал/завада при функціонуванні в кореляційних системах в умовах дії завад.

3. Вперше отримані результати порівняльного аналізу роботи типової кореляційної системи і кореляційної системи з вхідними ортогональними фільтрами Лагерра дискретного аргументу, які дали можливість збільшити відношення сигнал/завада і обґрунтувати ефективність роботи системи при статистичній обробці сейсмічних сигналів.

4. Вперше обґрунтовано використання адаптивного методу фільтрації при статистичній обробці сейсмічних сигналів на основі використання складних ортогональних фільтрів Лагерра дискретного аргументу в кореляційних системах сейсморозвідки, що дало можливість підвищити відношення сигнал/завада за рахунок вибору коефіцієнтів складного ортогонального фільтру, адаптованих до кореляційної функції завад.

Практичне значення результатів дисертації:

1. На основі результатів дисертації запропоновано використовувати новий клас кореляційних систем сейсморозвідки – кореляційних систем з вхідними ортогональними фільтрами Лагерра дискретного аргументу для підвищення ефективності вирішення задач сейсморозвідки.

2. Отримані практичні рекомендації вибору характеристик і параметрів ортогональних фільтрів Лагерра дискретного аргументу для їх використання в кореляційних системах.

3. Розроблені алгоритми і програмне забезпечення комп'ютерного моделювання сейсмічних сигналів і завад дало можливість провести аналіз широкого кола варіантів комбінацій корисних сейсмічних сигналів і завад в кореляційних системах з вхідними ортогональними фільтрами Лагерра дискретного аргументу при розв'язку задач виявлення сейсмічних сигналів.

4. Використання кореляційної системи із вхідними ортогональними фільтрами Лагерра дискретного аргументу на основі адаптивного методу збільшення сигнал/завада дає можливість вирішити широке коло задач виявлення сейсмічних сигналів слабкої інтенсивності при дії завад.

Результати дисертації впроваджені в ПАТ «Тернопільміськгаз», ПАТ «Тернопільгаз».

Особистий внесок здобувача. Нові наукові та практичні результати, що ввійшли до дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У працях опублікованих у співавторстві, автором дисертації у роботі [1] - обґрунтування можливості використання білого шуму в якості породжуючого при моделюванні лінійних випадкових процесів; у [3] - обґрунтовується використання класу лінійних випадкових процесів для моделювання сейсмічних завад; у [5] - створення системи комп'ютерних програм для дослідження роботи кореляційної системи з вхідними ортогональними фільтрами при дії завад; у [6] - обґрунтовано математичну модель корисних сейсмічних сигналів на базі полігармонічних затухаючих сигналів. Визначено її основні характеристики в рамках кореляційної теорії. Розглянуто роботу кореляційної системи з попередньою ортогональною фільтрацією і проведено аналіз співвідношення сигнал/завада; у [7] - обґрунтування роботи кореляційних систем з використанням складних ортогональних фільтрів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались на наступних міжнародних та національних конференціях: 4 міжнародна науково – практична конференція «Становлення сучасної науки» (м. Прага, 2008 р.), XXVIII науково-технічна конференція «Моделювання» (Інститут проблем моделювання в енергетиці ім.Г.Є.Пухова, м. Київ, 2009 р.), всеукраїнська наукова конференція Тернопільського державного технічного університету (м. Тернопіль, 2009 р.), міжнародна науково-технічна конференція «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» (м. Тернопіль, 2010 р.), науково-технічна конференція «Обчислювальні методи і системи перетворення інформації» (Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, 2010 р.), III, IV, V науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології» (м. Тернопіль, 2013, 2014, 2018 pp.), VI Inter University Conference of Students, PhD Students and Young Scientists «Engineer of XXI Century» (Bielsko-Biala, Poland, 2016), XX наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2017 р.)

Результати дисертації обговорювались на семінарах кафедри комп'ютерної інженерії, семінарі кафедр геофізичних методів досліджень свердловин, польової нафтогазової геофізики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, семінарі відділу теоретичної електротехніки (№12) Інституту електродинаміки НАН України, науковому тематичному семінарі «Математичне моделювання та обчислювальні методи» ТНТУ імені Івана Пулюя.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані в 17 публікаціях, 7 із них – статті в наукових фахових виданнях (1 – в закордонному виданні, 1 внесена до наукометричної бази Inspec, 1 внесена до наукометричної бази Scopus), 10 – тези доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел із 116 найменувань, містить 42 рисунки, 2 таблиці, 4 додатки. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 166 сторінок, основний текст роботи займає 128 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено зв'язок роботи з науково-дослідними темами, визначена мета і завдання досліджень, сформульований об'єкт, предмет, і методи дослідження, наведені основні наукові результати виконаних досліджень, їх практичне значення, а також висвітлені основні результати апробації результатів дисертації в наукових працях і науково-технічних конференціях.

В першому розділі проведений аналіз наукових публікацій в напрямку геофізичних досліджень земної кори з метою розвідки корисних копалин.

Базуючись на меті і завданнях дисертації визначено, що в подальшому будуть розглядатись сейсмічні методи дослідження, які є одними з основних видів дослідження геологічної структури верхніх шарів земної кори, заснованих на поширенні штучно збуджених пружних хвиль (рис.1) у вказаних структурах.

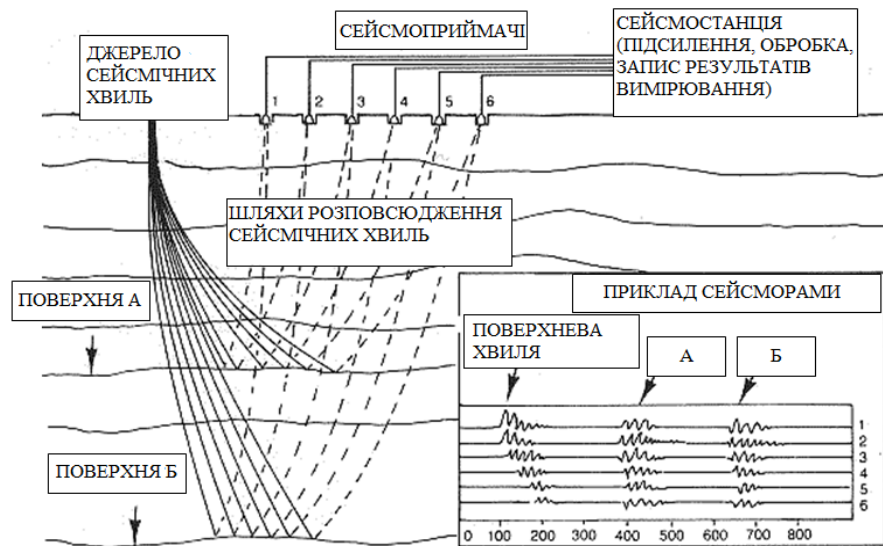


Рис.1. Спрощена схема проведення сейсмічного експерименту

На основі проведеного аналізу сейсмічних методів дослідження визначено, що в якості корисних пружних сейсмічних хвиль використовуються: поздовжні, поперечні, поверхневі хвилі.

До сейсмічних завад відносяться: мікросейсмічні коливання ґрунту, звукові хвилі, що виникають при вибуху, вібраціях, розсіяні хвилі, випадкові завади в електронних трактах систем сейсмозвідки, інші випадкові завади.

На рисунку 2 наведена структура процесу формування сейсмограми з врахуванням впливу сейсмічних завад.

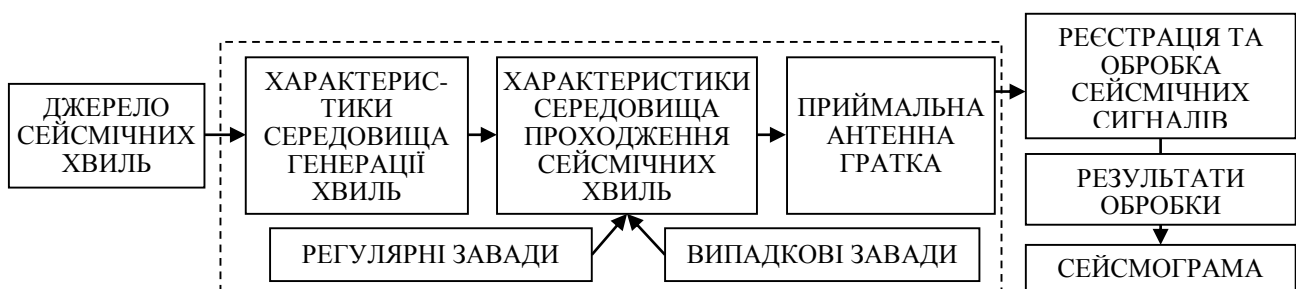


Рис.2. Структура процесу формування сейсмограми

На основі проведеного аналізу технічних засобів сейсмозв'язки визначено, що використовуються два підходи до обробки результатів геофізичних спостережень: детермінований і статистичний.

Використання детермінованих методів при обробці сейсмічних сигналів і інтерпретації їх результатів можна вважати виправданим, якщо проводяться перетворення і аналіз інтенсивних сигналів, наприклад при використанні вибухових джерел сейсмічних хвиль. Такі умови дають можливість визначити розміри, форми і глибину залягання корисних копалин в задачах сейсмозв'язки.

Сучасна сейсмозв'язка базується в основному на використанні статистичних методів дослідження у зв'язку з впровадженням невибухових (екологічних) генераторів сейсмічних хвиль. При цьому суттєво зменшується інтенсивність корисних сигналів, а відповідно зменшується відношення сигнал/завада, тому виникає необхідність при обробці сейсмічних сигналів використовувати ефективні завадостійкі методи виявлення сигналів в основному кореляційні.

Проаналізовані відомі класи сейсмічних сигналів і завад і визначені їх основні характеристики генерації і реєстрації. З врахуванням вирішення завдань дисертації і результатів аналізу відомих математичних моделей сейсмічних сигналів сформульовані наступні вимоги:

1. Модель повинна адекватно описувати сейсмічний сигнал, найбільш характерні особливості його формування, розповсюдження в земній корі і перетворення в електронних ланках сейсмічних систем.

2. Модель не повинна мати значної кількості параметрів, що підлягають статистичній оцінці при обмеженому об'ємі експериментальних даних.

3. Повинна бути передбачена можливість визначення характеристик, параметрів, а також окремих компонент моделі, які мають фізичну інтерпретацію, а їх числові значення можуть бути отримані шляхом прямих або непрямих вимірювань

4. При дослідженні моделі можуть бути використані як відомі так і запропоновані методи обробки і аналізу експериментальних даних вимірювань сейсмічних сигналів.

5. При дослідженні і моделюванні реалізацій моделі повинен бути вказаний клас допустимих операцій і відношень.

Виконання цих вимог забезпечує можливість обґрунтувати математичну модель сейсмічних сигналів при вирішенні завдань наведених в дисертації.

В якості системи обробки сейсмічних сигналів обґрунтовано використання кореляційних систем. Для підвищення ефективності кореляційних систем обґрунтовується застосування ортогональної кореляційної обробки сейсмічних сигналів.

У **другому розділі** наведені основні результати теоретичних досліджень дисертації.

Для отримання результатів використано теоретичний апарат гармонічного аналізу і лінійних випадкових процесів, які дали можливість логічно поєднати проведення досліджень в рамках кореляційної теорії як детермінованих, так і випадкових процесів, які описують сейсмічний сигнал, та його перетворення в кореляційних системах.

Обґрунтовано модель випадкового сейсмічного сигналу у вигляді адитивної суми корисного сейсмічного сигналу і випадкової завади:

$$x(t) = Q(t) + \xi(t), t \in (0, \infty), \quad (1)$$

де $Q(t)$ - корисний сейсмічний сигнал, $\xi(t)$ - випадкова завада.

Цю модель можна застосувати як частинний випадок при дослідженні структури хвильового поля, що реєструється датчиками сейсмічних систем. В кожному випадку необхідно визначити параметри корисних хвиль і хвиль-завад, детерміновані і статистичні складові сейсмограми, їх динамічні і кінематичні характеристики.

Корисні сигнали в сейсмозв'язці, що формуються з використанням вібраторів або ударних методів, на вході сейсмодатчиків мають форму окремих затухаючих імпульсів. Тому, враховуючи фізичний механізм розповсюдження корисного сигналу в земній корі, в якості моделі корисного сейсмічного сигналу запропоновано використовувати полігармонічний затухаючий сигнал, який представлено в наступному вигляді:

$$Q(t) = \sum_{m=1}^n A_m e^{-\alpha_m t} \sin(\omega_m t + \theta_m), A_m \geq 0, t \in [0, T], \theta_m \in [0, 2\pi], \quad (2)$$

де A_m - амплітуда m -ї гармоніки сигналу $Q(t)$, ω_m - кутова частота сигналу $Q(t)$, θ_m - початкова фаза сигналу $Q(t)$, α_m - коефіцієнт згасання гармонічних коливань, n - число гармонічних компонент.

Модель (2) задовольняє перерахованим вище вимогам до моделей сигналу, оскільки входні в модель параметри мають геофізичний зміст амплітуди, частоти і початкової фази гармонічних коливань. Крім того, множина цих функцій замкнута щодо операцій додавання, множення, інтегрування, диференціювання, згортки і інших лінійних операцій в теорії гармонічного аналізу.

Аналіз результатів досліджень та попередня статистична обробка експериментальних вимірювань сейсмічних завад підтвердила статистичну гіпотезу про стаціонарність в широкому сенсі завад. Це дало можливість використати при дослідженні завади модель стаціонарного лінійного випадкового процесу виду

$$\xi(t) = \int_0^{\infty} \varphi_0(t - \tau) \zeta(\tau) d\tau, t \in (0, \infty), \quad (3)$$

де $\varphi_0(t)$ - імпульсна характеристика лінійного формуючого фільтра, $\zeta(t)$ - породжуючий випадковий процес із незалежними (некорельованими) значеннями (білий шум). Використання в якості математичної моделі шумових завад стаціонарного лінійного випадкового процесу дає можливість не використовувати фізично нереалізований процес білого шуму, як заваду. Стаціонарний лінійний випадковий процес по аналогії з назвою білого шуму називають моделлю забарвленого шуму і має чітку фізичну інтерпретацію і тим самим описує реальні шумові завади. Стаціонарний лінійний випадковий процес є відгуком лінійного формуючого фільтра при дії випадкового процесу білого шуму, як єдиного еталонного породжуючого процесу. В подальшому будемо розглядати стаціонарний лінійний випадковий процес з нульовим математичним сподіванням, який задовольняє статистичній гіпотезі ергодичності.

На основі статистичного аналізу експериментальних даних завод систем сейсмозвідки, результатів опублікованих праць по цьому напрямку досліджень, обґрунтовані наступні характеристики процесу (3):

- закон розподілу процесу білого шуму є гауссовим,
- характеристики шумових завод визначаються характеристиками різних видів формуючих фільтрів, які є детермінованими функціями, а їх випадковість (стохастичність) характеризується інтенсивністю і законом розподілу вхідного породжуючого процесу. Імпульсні перехідні функції $\varphi_0(t)$ формуючих фільтрів описуються наступними виразами:

а) "забарвленого" шуму (рівномірний):

$$\varphi_0(t) = \frac{u \sin \omega_0 t}{\pi t} U(t); 0 < \omega_0 < \pi, \quad (4)$$

б) RC-шуму (низькочастотний широкополосний):

$$\varphi_0(t) = u e^{-\alpha t} U(t); \alpha > 0, \quad (5)$$

в) RLC – шуму (високочастотний вузькосмуговий):

$$\varphi_0(t) = u e^{-\alpha t} \sin \theta \cdot t \cdot U(t); t \in (0; \infty); \alpha > 0; \theta \neq \pi k; k \in (0; \infty), \quad (6)$$

де $U(t)$ – функція Хевісайда

На основі використання конструктивної моделі завод виду (3) отримуємо процеси "забарвленого шуму", RC-шуму, RLC-шуму, а структурна схема моделювання реалізацій таких завод наведено на рисунку 3.

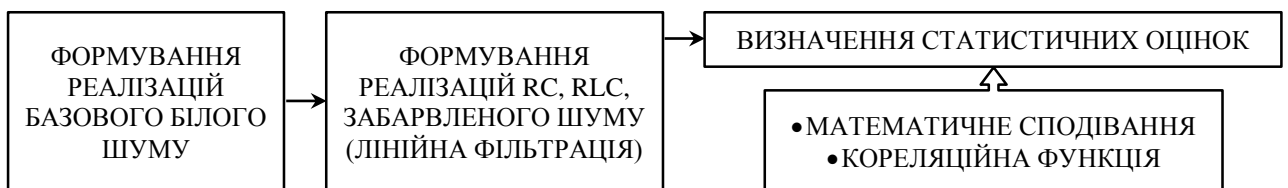


Рис.3. Схема формування реалізацій сейсмічних завод, та визначення їх статистичних оцінок

Вирази (1), (2) і (3), задовольняють вимогам до моделей сигналу, оскільки параметри моделі мають геофізичний зміст і відповідну фізичну інтерпретацію. Так коефіцієнт затухання характеризує степінь затухання інтенсивності корисного сигналу по мірі його розповсюдження в залежності від структури шарів земної кори.

Досліджувана кореляційна система обробки сейсмічних сигналів реалізує наступний алгоритм обробки вхідних сигналів у виді:

$$R_s(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x_1(t) x_2(t + \tau) dt, \quad (7)$$

тобто визначає взаємну кореляційну функцію двоканальної кореляційної системи, на вхід якої поступають $x_1(t)$ і $x_2(t)$

Взаємна кореляційна функція лінійних випадкових процесів $\xi_1(t)$ та $\xi_2(t)$ визначається наступним чином

$$R_z(\tau) = \kappa_2 \int_0^{\infty} \varphi_1(t) \varphi_2(t + \tau) dt, \quad (8)$$

де $\kappa_2 = \mathbf{D}\zeta(t)$, $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$ - відповідні імпульсні характеристики формуючих фільтрів

Для дискретного випадку інтегральні вирази (7-8) замінюються відповідними сумами, а дискретні ЛВП - відповідними стохастичними часовими рядами або лінійними випадковими послідовностями.

Отримані в даному розділі результати дослідження моделі сейсмічного корисного сигналу і завад з різними вказаними характеристиками дає можливість розглянути використання кореляційних систем сейсмозв'язки у різних районах проведення сейсмічних експериментів.

Розглянута унікальна властивість фільтрів Лагерра, які на відміну від інших ортогональних фільтрів, дозволяють при дії стаціонарного білого шуму отримати некорельовані відгуки на півосі їх взаємного зсуву по часу, як послідовність некорельованих лінійних стаціонарних випадкових процесів.

В третьому розділі наводяться результати комп'ютерного моделювання та статистичної обробки сейсмічних сигналів досліджуваними кореляційними системами. Розглядається два варіанта кореляційних систем: типова і з вхідними ортогональними фільтрами Лагерра. Загальна структура досліджуваних кореляційних систем обробки сигналів зображена на рис.4.

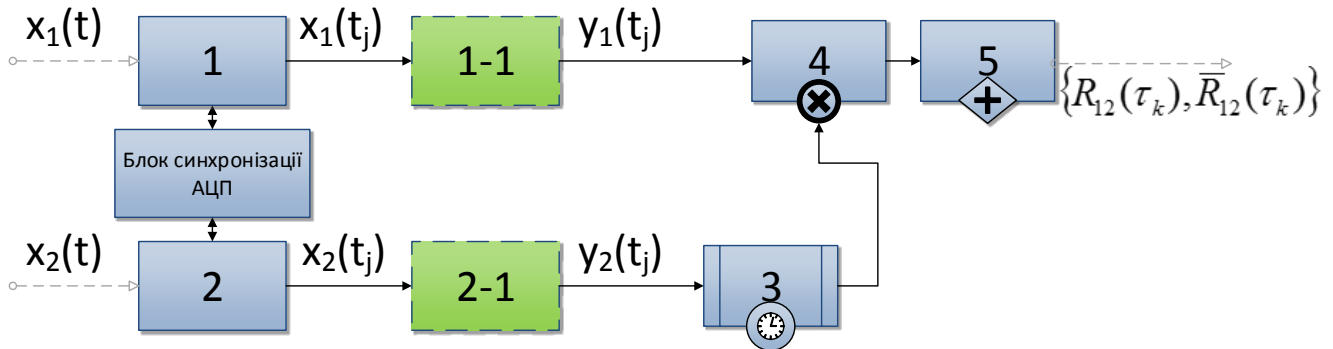


Рис.4. Загальна структура досліджуваних кореляційних вимірювальних систем 1, 2 – АЦП неперервних сейсмічних сигналів, 1-1, 2-1 – дискретні ортогональні фільтри Лагерра, 3 – модуль зсуву по часу сигналів з дискретним аргументом; 4 – модуль множення сигналів; 5 – модуль сумування (інтегратор) добутоків сигналів

Кореляційна ортогональна система, як система з попередньою ортогональною фільтрацією досліджуваних сигналів, відрізняється від типової введенням додаткових лінійних фільтрів 1-1 і 2-1, які є фільтрами Лагерра дискретного аргументу, а їх відгуки позначаються відповідно для типової $R_{12}(\tau_k)$, а ортогональної $\bar{R}_{12}(\tau_k)$.

Обґрунтовано вибір фільтрів Лагерра, які в порівнянні з іншими ортогональними фільтрами мають характеристики, які забезпечують ефективне використання в кореляційних системах. До таких характеристик належать:

- забезпечення ортогональності відгуків фільтрів отриманих при дії білого шуму некорельованих не тільки в одній точці їх взаємного зсуву, а на всій півосі їх взаємного зсуву,

- амплітудно-частотні характеристики різних фільтрів Лагерра є однакові, що дає можливість проводити аналіз сейсмічних сигналів в одному частотному діапазоні.

Оскільки в сейсмічних дослідженнях в основному розглядається цифрова обробка сейсмічних сигналів, то в даній роботі буде проведено дослідження дії кореляційного оператора для дискретних сигналів, які задаються на рівномірній ґратці $\{t_j = j\Delta t, j = \overline{1, m}, t_j \in T\}$. В даному випадку відгук кореляційної системи описується виразом

$$R_{12}(\tau_k) = \frac{1}{m-k} \sum_{j=1}^{m-k} x_1(j\Delta t) x_2((j+k)\Delta t), k \in (\overline{0, l}), l < m, \tau_k = k\Delta t, \quad (9)$$

де $\{x_i(t_j) = x_i(j\Delta t), i = (\overline{1, 2})\}$ вхідні сигнали з дискретним часом.

В якості дискретних ортогональних фільтрів використані фільтри Лагерра, імпульсні перехідні функції яких, у загальному випадку, описані виразом

$$\varphi_n(t_j) = (-1)^n e^{-\lambda t_j / 2} L_{n-1}(t_j),$$

де $L_n(t_j)$ – поліном Лагерра, $\lambda > 0$ - параметр фільтрів Лагерра, який визначає імпульсну перехідну функцію. Використовуються функції Лагерра першого і другого порядку взаємне кореляційне перетворення яких визначається з виразу:

$$h_{12}(\tau_l) = (e^\lambda - 1) \tau_l e^{-\frac{\lambda}{2}(\tau_l - 1)}. \quad (10)$$

Проаналізуємо роботу кореляційної ортогональної системи при надходженні на її вхід суми дискретного корисного сигналу і завади

$$x_1(t_j) = \sum_{m=1}^n A_m^{(1)} e^{-\alpha_m^{(1)} t_j} \sin(\omega_m^{(1)} t_j + \theta_m^{(1)}) + \sum_{l=0}^N \varphi_0(t_j - \tau_l) \zeta(\tau_l)$$

$$x_2(t_j) = \sum_{m=1}^n A_m^{(2)} e^{-\alpha_m^{(2)} t_j} \sin(\omega_m^{(2)} t_j + \theta_m^{(2)}) + \sum_{l=0}^N \varphi_0(t_j - \tau_l) \zeta(\tau_l).$$

На виході дискретної кореляційної ортогональної системи з врахуванням виразів (9, 10) отримаємо

$$\begin{aligned} \bar{R}_{12}(\tau_k) &= \sum_{l=0}^N h_{12}(\tau_l) R_S(\tau_k - \tau_l) + \\ &+ \frac{1}{m-k} \sum_{j=1}^{m-k} \sum_{s_1=1}^N \sum_{s_2=1}^N \left[\varphi_1(s_1) \mathcal{Q}_1(t_j - s_1) \varphi_{02}(t_j + \tau_k - s_2) \zeta(s_2) + \right. \\ &\left. + \varphi_2(s_2) \mathcal{Q}_2(t_j + \tau_k - s_1) \varphi_{01}(t_j - s_1) \zeta(s_1) + \varphi_{01}(t_j - s_1) \zeta(s_1) \varphi_{02}(t_j + \tau_k - s_2) \zeta(s_2) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

Функція $\bar{R}_{12}(\tau_k)$ складається з чотирьох компонент, перша з яких характеризує дію корисного сигналу, а друга і третя зумовлені статистичним зв'язком корисного сигналу і завади, а четверта – тільки завади. Оскільки завада є центрованим ергодичним процесом, то друга і третя компоненти $\bar{R}_{12}(\tau_k)$ при $m \rightarrow \infty$ асимптотично прямує до нуля (їх математичне сподівання дорівнює нулю). Четверта компонента визначає взаємне кореляційне перетворення завади.

Якщо на вхід ортогональних фільтрів надходить стаціонарний білий шум, для якого кореляційна функція з урахуванням одиничного імпульсу $\delta(\tau_k)$ представлена у вигляді $R_\zeta(\tau_k) = \kappa_2 \delta(\tau_k)$, отримаємо

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = \kappa_2 \sum_{l=0}^N \varphi_{01}(\tau_l) \varphi_{02}(\tau_l + \tau_k), \quad (12)$$

де κ_2 – інтенсивність породжуючого білого шуму. Тому остаточно запишемо

$$\bar{R}_{12}(\tau_k) = \sum_{l=0}^N h_{12}(\tau_l) R_S(\tau_k - \tau_l) + \bar{R}_Z(\tau_k). \quad (13)$$

В останньому виразі, в оцінці кореляційної функції з'являється зсув (оцінка зсуву), величина якого $\bar{R}_Z(\tau_k)$ залежить від τ_k і пропорційна інтенсивності породжуючого білого шуму κ_2 .

Запишемо формулу (12) в іншому вигляді, а саме:

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = \sum_{l=0}^N h_{12}(\tau_l) R_Z(\tau_k - \tau_l), \quad (14)$$

де $R_Z(\tau_k)$ – кореляційна функція вхідної завади; $h_{12}(\tau_l)$ – взаємне кореляційне перетворення дискретних ортогональних фільтрів Лагерра.

Оскільки значення $R_Z(\tau_k)$ будемо визначати для чотирьох моделей завод, а саме білий, забарвлений, RC-, RLC-шуми, потрібно визначити відповідні вирази $\bar{R}_Z(\tau_k)$ для кореляційної системи з дискретними ортогональними фільтрами Лагерра.

У випадку дії на вхід розглянутої кореляційної вимірювальної системи з дискретними ортогональними фільтрами Лагерра визначених шумових завод, на виході отримаємо:

а) для білого шуму

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = \sum_{l=0}^N h_{12}(\tau_l) R_Z(\tau_k - \tau_l) = \kappa_2 h_{12}(\tau_k),$$

а з урахуванням (10)

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = \kappa_2 (e^\lambda - 1) \tau_k e^{-\lambda/2(\tau_k+1)},$$

де κ_2 – інтенсивність дискретного білого шуму в точці спостереження.

б) для забарвленого шуму:

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = \frac{\kappa_2 u^2 (e^\lambda - 1)}{\pi e^{\lambda/2}} \sum_{l=0}^N \frac{\tau_l \sin[\omega_0(\tau_k - \tau_l)]}{(\tau_k - \tau_l)} e^{-\frac{\lambda \tau_l}{2}}.$$

в) для RC-шуму:

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = \kappa_2 \sum_{l=0}^N \frac{u^2 e^{-\alpha|\tau_k - \tau_l|}}{1 - e^{-2\alpha}} e^{-\frac{\lambda}{2}(\tau_l+1)} (e^\lambda - 1) = \frac{\kappa_2 u^2 (e^\lambda - 1)}{e^{\lambda/2} (1 - e^{-2\alpha})} \sum_{l=0}^N \tau \exp\left(-\alpha|\tau_k - \tau_l| - \frac{\lambda \tau_l}{2}\right).$$

Просумувавши ряд при $\tau_k \leq 0$, отримаємо

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = \frac{\kappa_2 u^2 (e^\lambda - 1)}{(1 - e^{-2\alpha}) (e^{(\alpha+\lambda)/2} - e^{-\alpha/2})^2} e^{-\alpha|\tau_k|}, \quad \tau_k \in (-\infty, 0).$$

г) для RLC –шуму:

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = R(0) \sum_{l=0}^N e^{-\alpha|\tau_k - \tau_l|} \left[\cos(\tau_k - \tau_l) \theta + E(\theta, \alpha) \sin(\theta|\tau_k - \tau_l|) \right] e^{-\frac{\lambda}{2}(\tau_l+1)} (e^\lambda - 1).$$

Після сумування ряду при $\tau_k \leq 0$ отримаємо

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = R(0) e^{-\alpha|\tau_k|} (A \cos \theta \tau_k + B \sin \theta |\tau_k|), \quad \tau_k \in (-\infty, 0).$$

Результати порівняльного аналізу відгуків типової і ортогональної

кореляційної систем наведені на рисунках 5-6.

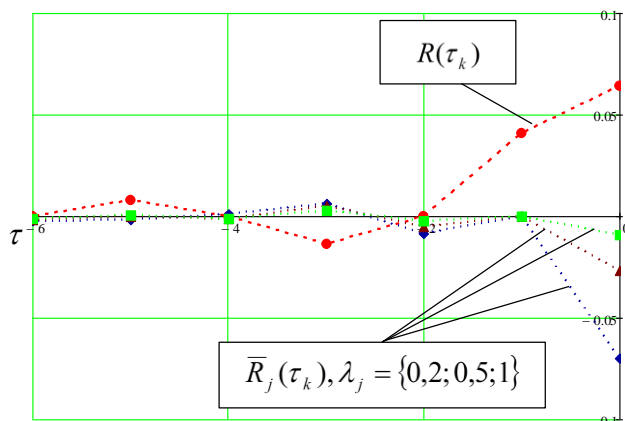


Рис.5. Порівняння відгуків типової і ортогональної кореляційної систем при дії забарвленого шуму

$R(\tau_k)$ - типова кореляційна система,

$\bar{R}_j(\tau_k)$ - ортогональна кореляційна

система з параметрами фільтрів Лагерра $\lambda = 0.2, 0.5, 1, \omega_0 = 3\pi/4$

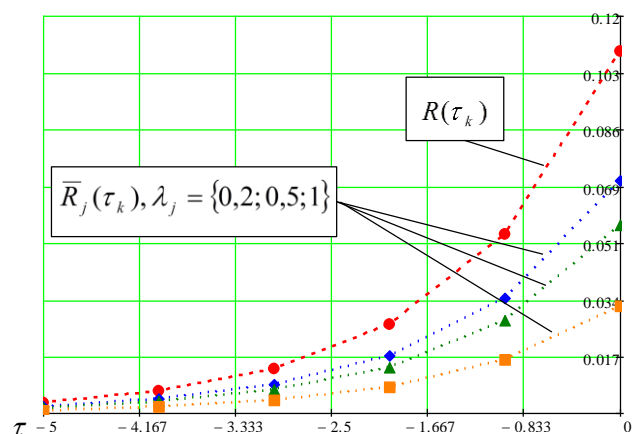


Рис.6. Порівняння відгуків типової і ортогональної кореляційної систем при дії RC-шуму

$R(\tau_k)$ - типова кореляційна система,

$\bar{R}_j(\tau_k)$ - ортогональна кореляційна

система з параметрами фільтрів Лагерра $\lambda = 0.2, 0.5, 1, \alpha = 0.1$

Аналіз проходження адитивної суми затухаючого полігармонічного сигналу з різними видами шумів, що описуються лінійним випадковим процесом, через кореляційну вимірювальну систему з вхідними дискретними ортогональними фільтрами Лагерра показав наступне:

1. При розширенні смуги шуму з рівномірною спектральною щільністю, починаючи з деякої граничної частоти, спостерігається ослаблення завади в системі з простими ортогональними фільтрами Лагерра, чого не спостерігається при роботі кореляційної системи без попередньої фільтрації.

2. Ступінь послаблення завади залежить як від виду кореляційної функції завади, так і від вибору імпульсних перехідних характеристик ортогональних фільтрів Лагерра дискретного аргументу.

3. Для системи з ортогональними фільтрами Лагерра спотворення сигналів, викликане використанням цих фільтрів, може бути скомпенсованим.

4. При роботі в умовах широкосмугових завод типу білого шуму, дискретні ортогональні фільтри Лагерра теоретично на негативній півосі зсувів забезпечують мінімальне спотворення оцінки кореляційної функції.

У четвертому розділі наведені результати створення програмного комплексу для моделювання і обробки сигналів сейморозвідки структурна схема якого наведена на рис. 7. Який реалізує комп'ютерне моделювання статистичної обробки досліджуваної типової і ортогональної кореляційної системи сейсмічних сигналів з вхідними дискретними ортогональними фільтрами Лагерра.

В основу роботи даного програмного комплексу використані результати математичного моделювання та процесів обробки сигналів наведених в попередніх розділах. На рисунку 8 наведено фрагмент сейсмограми при дії RLC-шуму і

відповідну їй корелограму.

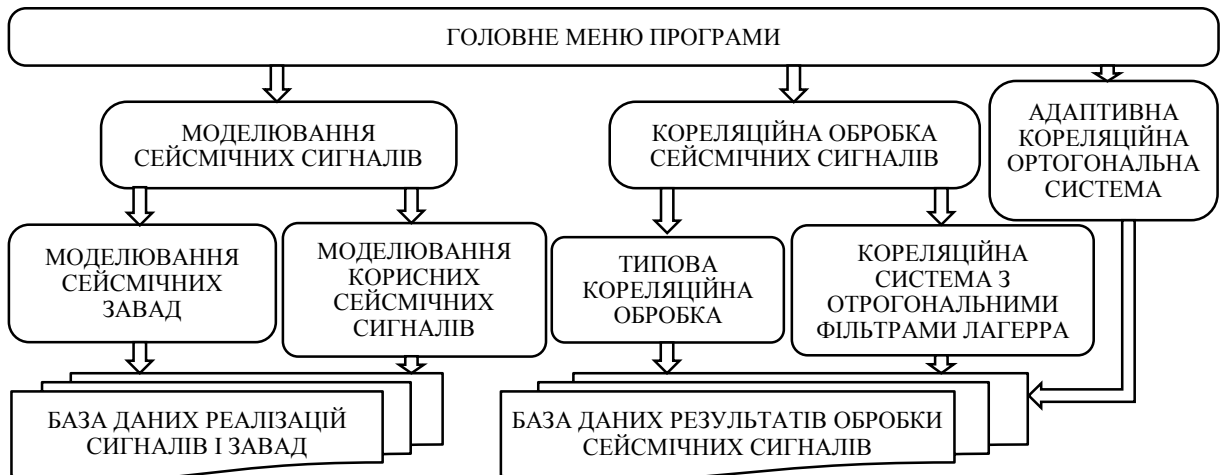


Рис. 7. Структурна схема програмного комплексу для моделювання і обробки сигналів сейсмозвідки.

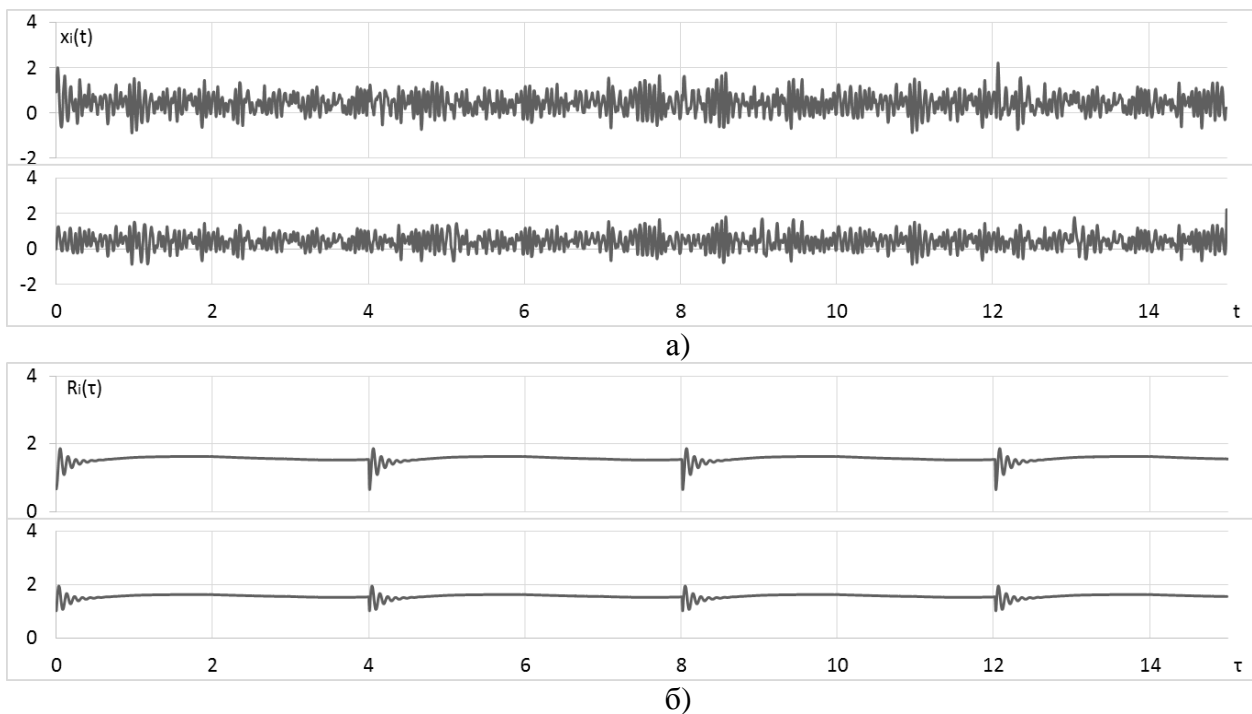


Рис.8. Результат роботи кореляційної ортогональної системи при дії сейсмічних сигналів і RLC-шуму.

а) вхідний сигнал, б) обробка кореляційною ортогональною системою

Аналізуючи корелограми можна визначити час надходження корисного сигналу і побудувати шарову структуру земної кори в місці дослідження.

В дисертаційній роботі для визначення ефективності роботи кореляційної системи з дискретними ортогональними фільтрами Лагерра в порівнянні з типовою кореляційною системою використано відношення сигнал/завада, а саме $\bar{R}_s(0)/\bar{R}_z(0)$, $R_s(0)/R_z(0)$.

Для отримання результатів роботи кореляційної системи з дискретними ортогональними фільтрами Лагерра і типової кореляційної системи було проведено комп'ютерне моделювання вхідних сигналів і завад з використанням розробленого

програмного комплексу.

Було проведено значну кількість комп'ютерних моделюючих експериментів при різних співвідношеннях сигнал/завада на вході досліджуваних систем. В якості прикладу результатів проведених комп'ютерних експериментів наведені графіки на рис. 9 для п'яти експериментів $n \in \overline{1,5}$.

Були використані наступні характеристики корисних сигналів і завад: корисні сигнали представляли собою суму чотирьох гармонічних сигналів з різними амплітудами і частотами. Дисперсія, тобто $R_z(0)$, для різного виду завад вибиралась постійною при всіх проведених експериментах. Це давало змогу формувати різні співвідношення сигнал/завада на вході досліджуваних кореляційних систем з подальшим визначенням відповідного співвідношення на їх виході.

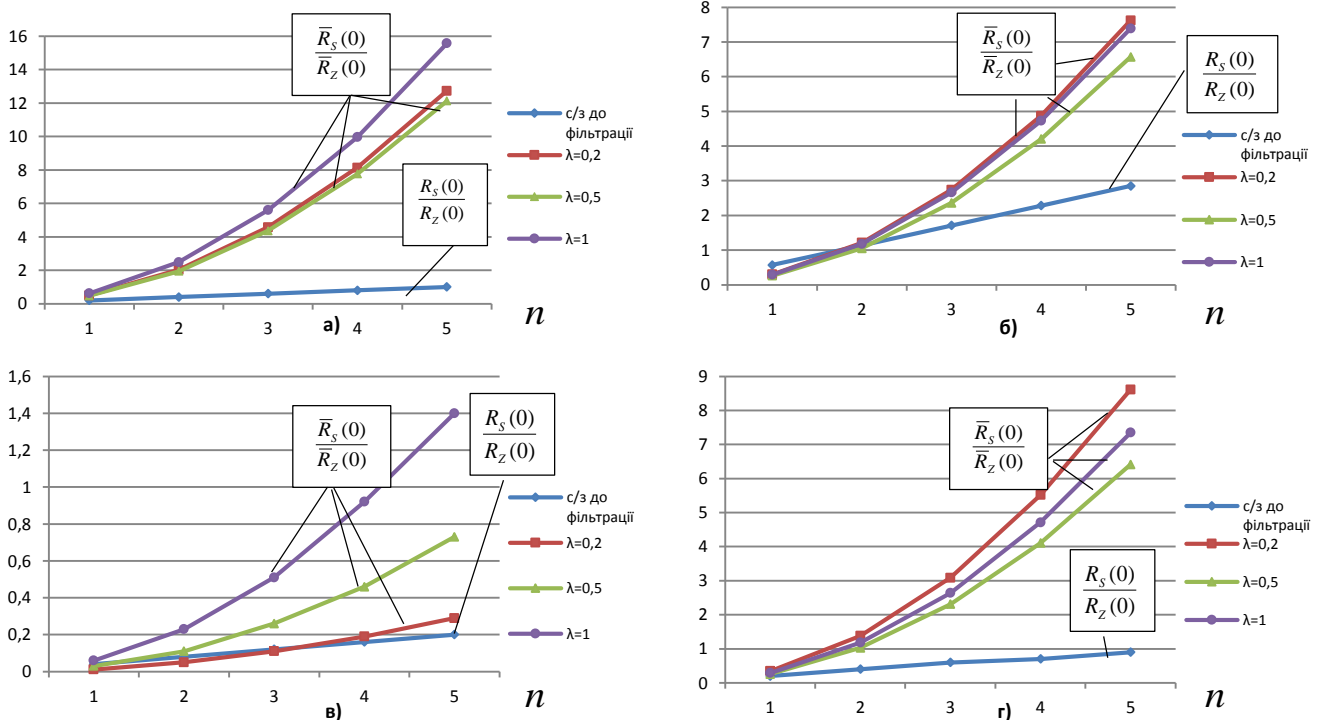


Рис. 9. Результати моделюючих досліджень співвідношень сигнал/завада на виході досліджуваних кореляційних систем.

а) білий шум, б) забарвлений шум, в) RC-шум, г) RLC-шум

В розділі наведено також результати реалізації подальших перспективних розробок кореляційних ортогональних систем на базі ортогональних фільтрів Лагерра дискретного аргументу. В основі даного методу лежить використання складних ортогональних фільтрів, імпульсна перехідна функція яких представляє собою суму імпульсних перехідних функцій Лагерра, які задовольняють умові ортогональності.

Необхідною умовою реалізації цього методу є попереднє задання кореляційної оцінки завади, або по крайній мірі задана її статистична оцінка. Тільки при цих умовах може бути використаний адаптивний метод фільтрації в ортогональній кореляційній системі, який по суті є адаптивним до кореляційної функції завади. При цьому не визначені умови необхідних перетворень корисного сигналу, що в свою чергу викликає при дослідженні адаптивного методу необхідність враховувати

корекцію амплітудно- і фазово-частотних характеристик корисних сигналів.

Розглянуто конкретний випадок використання адаптивного методу збільшення співвідношення сигнал/завада на виході ортогональної кореляційної системи, якщо відома кореляційна функція завади. При цьому використано апарат дослідження лінійних випадкових процесів, які описують заваду в рамках кореляційної теорії.

Складний ортогональний фільтр Лагерра складається із послідовності лінійних фільтрів Лагерра, що з'єднані між собою послідовно і в кожному з них незалежно формуються відгуки при дії завади. Структурно-логічна схема кореляційної системи з складним ортогональним фільтром Лагерра представлена на рисунку 10.

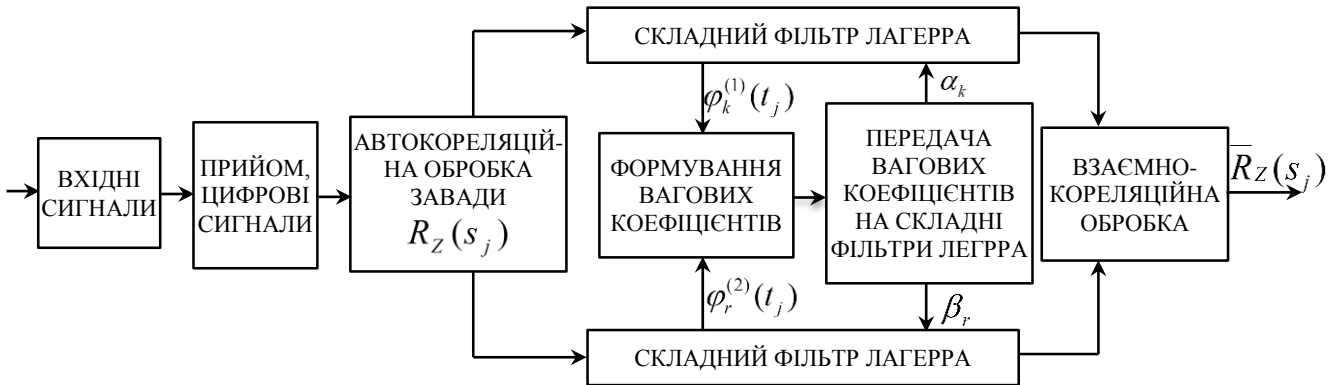


Рис. 10. Структурно-логічна схема кореляційної системи при реалізації адаптивного методу

В ідеальному випадку відгуки таких фільтрів можуть асимптотично наближатись до нуля, але на практиці вирішення такої задачі є статистичною оцінкою нульового значення і відрізняється від нього.

Використання адаптивного методу на практиці передбачає етап навчання, який полягає в наступному. При заданій кореляційній функції завади визначається частотний діапазон шляхом знаходження спектральної щільності завади і вибираються відповідні параметри α фільтрів Лагерра. Обґрунтовується і задається послідовність значень відгуків кореляційної ортогональної системи які необхідно зменшити до нульового значення. Ця послідовність в свою чергу використовується для формування порядку складного ортогонального фільтру Лагерра в залежності від кількості точок занулення, тобто визначається число компонент складного ортогонального фільтру Лагерра.

Математично формування некорельованих відгуків ортогональних фільтрів Лагерра при дії завади описується наступним чином.

На структурній схемі ортогональної кореляційної системи (рис.10) фільтри Лагерра описуються наступними виразами:

$$\psi_1(t_j) = \sum_{k=1}^m \alpha_k \varphi_k^{(1)}(t_j), \quad (15)$$

$$\psi_2(t_j) = \sum_{r=1}^n \beta_r \varphi_r^{(2)}(t_j), \quad (16)$$

де $\{\varphi_k^{(1)}(t_j), \varphi_r^{(2)}(t_j), k \in \overline{[1, m]}, r \in \overline{[1, n]}\}$ - система ортонормованих функцій Лагерра

дискретного аргументу, $\{\alpha_k, \beta_r, k \in \overline{[1, m]}, r \in \overline{[1, n]}\}$ - дійсні вагові коефіцієнти.

Взаємне кореляційне перетворення двох імпульсних перехідних характеристик фільтрів Лагерра визначається таким чином:

$$h_{k,r}^{(1,2)}(\tau_i) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \varphi_k^{(1)}(t_j) \varphi_r^{(2)}(t_j + \tau_i), i \in \overline{(-\infty, \infty)}. \quad (17)$$

На виході ортогональної кореляційної системи з такими фільтрами

$$\bar{R}_Z(s_j) = \sigma_\delta^2 \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^n \alpha_k \beta_r h_{k,r}^{(1,2)}(\tau_i) R_Z(s_j - \tau_i), j \in \overline{(-\infty, \infty)}. \quad (18)$$

В загальному виді вираз (18) є алгоритмом функціонування кореляційної системи з вхідними складними фільтрами Лагерра при дії вхідної шумової завади, яка описується стаціонарним ЛВП у вигляді (3).

З метою зменшення впливу шумової завади необхідно послідовність значень взаємнокореляційної функції $\bar{R}_Z(s_j)$ прийняти за 0 на заданій множині точок часового зсуву $s_j \in \overline{[-K, K]}$.

Після цього необхідно визначити вагові коефіцієнти α_k і β_r у виразах (15) і (16), виходячи з умови, що $K \leq m(n-1)$. Для цього необхідно розв'язати систему рівнянь (18) при $s_j \in \overline{[0, K]}$ відносно невідомих α_k і β_r , підбираючи m і n таким чином, щоб кількість рівнянь дорівнювала числу невідомих. Така кореляційна система з ортогональними фільтрами дає можливість забезпечити для вхідної шумової завади на множині зсувів $s_j \in \overline{[-K, K]}$ зменшені значення $\bar{R}_Z(s_j)$.

В роботі наведено приклад використання адаптивного методу коли завада описана RLC – шумом. Відмічається також, що практична реалізація адаптивного методу в кожному окремому випадку розглядається як окрема задача, а вхідною дією – сигналом системи (рис. 10) є тільки завада, тобто корисний сигнал відсутній.

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язана актуальна наукова задача підвищення ефективності роботи кореляційних систем статистичної цифрової обробки сигналів в системах сейсмозвідки на основі розробки моделей і методу їх цифрової кореляційної обробки з вхідними ортогональними фільтрами Лагерра. Отримані наступні основні результати:

1. Результати аналізу відомих праць по дослідженню науково-технічних проблем сучасної сейсмозвідки дали можливість обґрунтувати актуальність наукової задачі математичного моделювання і статистичної обробки сейсмічних сигналів з використанням ортогональної фільтрації з метою підвищення ефективності роботи кореляційних систем сейсмозвідки і визначити основні завдання для її вирішення.

2. Отримано подальший розвиток моделі сейсмічних сигналів у виді суми затухаючих гармонічних коливань і завад у виді лінійного стаціонарного процесу характеристики яких визначаються за результатами статистичної обробки експериментальних даних, що дало можливість врахувати фізичний механізм їх формування при розповсюдженні сейсмічних сигналів у земній корі.

3. Удосконалено метод лінійної фільтрації сейсмічних сигналів на основі використання ортогональних фільтрів Лагерра дискретного аргументу, які дають можливість при їх використанні в кореляційних системах в умовах дії завад в порівнянні з іншими ортогональними фільтрами збільшити співвідношення сигнал/завада і обґрунтувати при цьому вибір параметрів фільтрів Лагерра.

4. Вперше отримані результати порівняльного аналізу роботи типової кореляційної системи і кореляційної системи з вхідними ортогональними фільтрами Лагерра дискретного аргументу, які дали можливість збільшити відношення сигнал/завада і обґрунтувати ефективність роботи кореляційної системи при статистичній обробці сейсмічних сигналів.

5. Вперше обґрунтований адаптивний метод фільтрації при статистичній обробці сейсмічних сигналів на основі використання складних ортогональних фільтрів Лагерра дискретного аргументу в кореляційних системах сейсмозв'язки, що дало можливість підвищити відношення сигнал/завада за рахунок вибору коефіцієнтів складного ортогонального фільтру, адаптованих до кореляційної функції завад.

6. Розроблені алгоритми і програмне забезпечення комп'ютерного моделювання сейсмічних сигналів і завад дало можливість провести аналіз широкого кола варіантів комбінацій корисних сейсмічних сигналів і завад в кореляційних системах з вхідними ортогональними фільтрами Лагерра дискретного аргументу при розв'язку задач виявлення сейсмічних сигналів.

7. Отримані результати досліджень дисертації дали можливість розробити практичні рекомендації удосконалення кореляційних систем сейсмозв'язки на базі застосування вхідних ортогональних фільтрів Лагерра дискретного аргументу і створити програмний комплекс моделювання і обробки сейсмічних сигналів для широкого кола різнопланових задач сейсмозв'язки.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Жаровський Р.О., Марченко Б.Г., Марченко Н.Б. Моделювання білого шуму з дискретним часом. Вісник ТДТУ. 2007. №4. С. 152–157.

2. Жаровський Р.О. Комп'ютерне моделювання стаціонарного РС шуму з дискретним часом. Вісник ТДТУ. 2008. Том 13. №1. С. 157–161.

3. Жаровський Р.О., Щербак Л. М. Моделі геофізичних сигналів на основі лінійних випадкових процесів. Вісник ТДТУ. 2009. №1. С. 138–144.

4. Жаровський Р.О. Кореляційні ортогональні системи у задачах оброблення геофізичних сигналів. Науковий вісник НЛТУ України: Збірник науково-технічних праць. Львів: РВВ НЛТУ України. 2010. № 20.7. С. 283–292.

5. Жаровський Р., Щербак Л. Задачі обробки геофізичних сигналів при дії завад дискретною кореляційною системою з вхідними ортогональними фільтрами. Вісник ТДТУ. 2010. Том 15. № 2. С. 172–181. *(індексується в INSPEC)*.

6. Жаровский Р., Щербак Л. Обоснование и исследование математической модели сейсмического сигнала в корреляционных системах с ортогональными фильтрами Лаггера. *Уральский научный вестник*. 2015. № 9. С. 90–96.

7. Kozlovskiy V., Scherbak L., Martyniuk H., Zharovskiy R., Balanyuk Y., Boiko Y. Applying an adaptive method of the orthogonal laguerre filtration of noise interference to increase the signal/noise ratio. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. №2/9(104). Pp. 14-21. (*індексується в SciVerse Scopus, Index Copernicus, DOAJ*).

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Жаровський Р.О. Ортогональні фільтри Лагерра в задачах обробки сигналів. Матеріали 4 міжнародної науково – практичної конференції *Становлення сучасної науки*. Прага. 2008. С. 23-25.

9. Жаровський Р.О. Опис шумових процесів в геофізиці з допомогою моделі дискретного лінійного випадкового процесу. *Моделювання: Матеріали XXVIII науково-технічної конференції Інститут проблем моделювання в енергетиці ім.Г.Є.Пухова*. К.: 2009. С. 27.

10. Жаровський Р.О. Моделювання корисних сейсмічних сигналів Матеріали всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету. Тернопіль. 2009. С. 7.

11. Жаровський Р.О. Задачі обробки геофізичних сигналів кореляційною системою з вхідними ортогональними фільтрами. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій*. Тернопіль. 2010. С. 258.

12. Жаровський Р.О. Математичне моделювання геофізичних сигналів і шумів. Матеріали науково-технічної конференції *Обчислювальні методи і системи перетворення інформації* Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів. 2010. С. 108 - 110.

13. Жаровський Р.О. Інформаційна система моделювання і обробки сейсмічних сигналів. Матеріали III науково-технічної конференції *Інформаційні моделі, системи та технології*. Тернопіль. 2013. С. 21.

14. Жаровський Р.О. Побудова моделі корисного сейсмічного сигналу. IV Науково-технічна конференція *Інформаційні моделі, системи та технології*. Тернопіль. 2014. С. 7.

15. Zharovskiy R., Scherbak L. Research of the correlation system with Laguerre orthogonal filters in action low intensity seismic signals. VI Inter University Conference of Students, PhD Students and Young Scientists *Engineer of XXI Century* Bielsko-Biala, Poland. 2016. С. 913-916.

16. Жаровський Р.О., Шаблій Н.Р., Щербак Л.М. Адаптивний метод фільтрації в ортогональній кореляційній системі при обробці сейсмічних сигналів. Матеріали XX наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Тернопіль. 2017. С. 4.

17. Жаровський Р.О. Оптимальний підбір параметрів ортогонального фільтру Лагерра в кореляційній системі при обробці сейсмічних сигналів. Матеріали V науково-технічної конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя *Інформаційні моделі, системи та технології*. Тернопіль. 2018. с. 8.

АНОТАЦІЯ

Жаровський Р. О. Математичне моделювання і статистична обробка сейсмічних сигналів з використанням ортогональної фільтрації – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - Математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки) - Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2021.

Дисертація присвячена актуальній задачі математичного моделювання і статистичної обробки сейсмічних сигналів з використанням ортогональної фільтрації. Розроблено нову удосконалену математичну модель сейсмічного сигналу у виді адитивної суми затухаючого полігармонічного сигналу і випадкової завади. Це дало можливість обґрунтувати характеристики генерування сейсмічних сигналів і врахувати їх зміни при розповсюдженні в шарових структурах земної кори. Представлення сейсмічних завад у вигляді стаціонарного лінійного випадкового процесу дало можливість врахувати специфіку і характерні особливості проведення сейсмічних експериментів. Обґрунтовано ефективність кореляційної ортогональної системи обробки сейсмічних даних на базі ортогональних фільтрів Лагерра. Отримані результати підвищення рівня сигнал/завада такої системи в порівнянні з типовою кореляційною системою. В якості перспективного методу розвитку кореляційних ортогональних систем статистичної обробки сейсмічних сигналів запропонований адаптивний метод фільтрації зменшення впливу сейсмічних завад, шляхом використання складних ортогональних фільтрів Лагерра. Сформульовані основні наукові і практичні результати математичного моделювання і статистичної обробки сейсмічних сигналів в кореляційних ортогональних системах.

Ключові слова: сейсмозв'язка, сигнал, завади, лінійний випадковий процес, кореляційна обробка, ортогональний фільтр, імітаційне моделювання.

АННОТАЦИЯ

Жаровский Р. О. Математическое моделирование и статистическая обработка сейсмических сигналов с использованием ортогональной фильтрации – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 - математическое моделирование и вычислительные методы (технические науки) - Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2021.

Диссертация посвящена проблемам разработки математической модели, а также методов корреляционной ортогональной обработки сейсмических сигналов. В диссертации построена новая усовершенствованная математическая модель сейсмического сигнала получаемого на входе измерительной аппаратуры в виде аддитивной суммы полезного сигнала и помехи.

Проведенный обзор математических моделей сейсмических сигналов и их характеристик позволил сформулировать требования к разрабатываемой математической модели сейсмического сигнала с учетом специфики и особенностей распространения сейсмических сигналов.

Построенная модель полезных сейсмических сигналов переставлена в виде полигармонического затухающего сигнала. Анализ результатов исследований, и предварительная статистическая обработка экспериментальных измерений сейсмических помех подтвердил статистическую гипотезу о стационарности в

широком смысле помех. Это дало возможность использовать известный метод линейных формирующих фильтров и описать исследуемые помехи в виде стационарного линейного случайного процесса. В качестве моделей сейсмических помех выбрано три вида линейных случайных процессов, а именно окрашенный шум, RC -шум и RLC -шум. Таким образом, разработанная в работе математическая модель сейсмических сигналов и помех позволяет описать в точке приема сейсмическую волну, полученную вследствие многократных внутренних отражений от неоднородных границ исследуемой среды.

В работе рассматривается два варианта корреляционных систем: типичная и с входными ортогональными фильтрами Лагерра. При использовании ортогональных фильтров Лагерра удалось уменьшить влияние шумовых помех с различными корреляционно-спектральными характеристиками и увеличить соотношение сигнал/помеха на выходе корреляционной системы.

В работе также рассмотрен адаптивный метод корреляционной ортогональной обработки сейсмических сигналов с использованием сложных фильтров Лагерра, который может быть использован в случае, когда нет априорных данных по корреляционным характеристикам сейсмических помех, и они имеют большую мощность. На основании предложенной модели разработано программное обеспечение моделирования и статистической обработки сейсмических сигналов для проведения имитационных экспериментов.

Ключевые слова: сейсморазведка, сигнал, помехи, линейный случайный процесс, корреляционная обработка, ортогональный фильтр, имитационное моделирование.

ANNOTACION

Zharovskyi R.O. Mathematical modeling and statistical analysis of seismic signals using orthogonal filtering – Manuscript.

The thesis for the Scientific Degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 01.05.02 - Mathematical modeling and computational methods (technical sciences) - Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2021.

The thesis is devoted to the problem of mathematical modeling and statistical analysis of seismic signals using orthogonal filtering. A new improved mathematical model of the seismic signal in the form of additive amount poliharmonic fading signal and random noise. This makes it possible to prove properties of generating seismic signals and take them into account as well as their changes in the distribution layer structures in the crust. Different types of seismic noise described by a stationary linear random process make it possible to take into account the specifics and characteristics of seismic experiments in different places. The efficiency of correlation orthogonal seismic data processing system based on orthogonal filters camp. The results improve the signal noise ratio of the system compared to the typical correlation system. A corresponding algorithmic and software statistical analysis of seismic signals, making it possible to carry out a wide range of computer simulation experiments. As a promising method of correlation orthogonal statistical analysis of seismic signals, an adaptive method was proposed to reduce the influence of seismic noise by using complex orthogonal Laguerre filters. The basic scientific and practical results of mathematical modeling and statistical analysis of seismic signals in correlation orthogonal systems were proposed.

Key words: seismic signal, noise, linear stochastic process correlation processing.

Підписано до друку 26.02.2021. Формат 60×90, 1/16.
Друк лазерний. Папір офсетний. Гарнітура TimesNewRoman.
Умовно-друк. арк. 0,9. Наклад – 100 прим.
Замовлення № 26022021

Друк ФОП Паляниця В. А.
Свідоцтво ДК №4870 від 20.03.2015 р.
м. Тернопіль, вул. Б. Хмельницького, 9а, оф.38.
тел. (0352) 528-777.