

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Жаровський Руслан Олегович

УДК 550.34:519.218

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

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи
(шифр і назва спеціальності)

05 «Технічні науки»
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник:
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,
доктор технічних наук, професор
Щербак Леонід Миколайович

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

/Б. Г. Шелестовський/

Тернопіль – 2021

АНОТАЦІЯ

Жаровський Р. О. Математичне моделювання і статистична обробка сейсмічних сигналів з використанням ортогональної фільтрації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 01.05.02 «Математичне моделювання та обчислювальні методи» (05 – Технічні науки). – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2021.

Підготовка здійснювалась на кафедрі комп'ютерних систем та мереж Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Спеціалізована вчена рада Д 58.052.01 при Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Дисертація присвячена актуальній задачі математичного моделювання і статистичної обробки сейсмічних сигналів з використанням ортогональної фільтрації. Розроблено нову удосконалену математичну модель сейсмічного сигналу і у виді адитивної суми затухаючого полігармонічного сигналу і випадкової завади, які описуються стаціонарним лінійним випадковим процесом. Це дало можливість обґрунтувати характеристики генерування сейсмічних сигналів і врахувати їх зміни при розповсюдженні в шарових структурах земної кори.

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.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показано наукову новизну отриманих результатів, їх практичне

значення, визначено зв'язок роботи з науковими темами, а також подано відомості про апробації результатів дисертації та їх висвітлення в наукових працях.

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 особливостях поширення штучно збуджених пружних хвиль у земній корі.

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 основі проведеного аналізу технічних засобів сейсмозвідки визначено, що використовуються два підходи до обробки та інтерпретації результатів геофізичних спостережень: детермінований і статистичний.

Сучасна сейсмозвідка 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.

З врахуванням вирішення завдань дисертації і результатів аналізу відомих математичних моделей сейсмічних сигналів сформульовані вимоги до математичної моделі сейсмічного сигналу.

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

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

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

Обґрунтовано модель випадкового сейсмічного сигналу у вигляді суми корисного сейсмічного сигналу і випадкової завади. На основі аналізу фізичних особливостей формування сейсмічних сигналів обґрунтована модель корисного сейсмічного сигналу у виді полігармонічного затухаючого сигналу. 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 завад модель стаціонарного лінійного випадкового процесу. В якості моделей сейсмічних завад використано процеси білого, забарвленого, RC і RLC - шуму

В **третьому розділі** наводяться результати комп'ютерного моделювання та статистичної обробки сейсмічних сигналів досліджуваними кореляційними системами.

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

Розглядається два варіанта кореляційних систем: типова і з вхідними ортогональними фільтрами Лагерра, при дії різних комбінацій сейсмічних сигналів і завад.

В **четвертому розділі** обґрунтовано ефективність кореляційної ортогональної системи обробки сейсмічних даних на базі ортогональних фільтрів Лагера. Отримані результати дослідження такої системи в порівнянні з типовою кореляційною системою, які показали підвищення рівня сигнал/завада.

Розроблено відповідне алгоритмічне і програмне забезпечення статистичної обробки сейсмічних сигналів, що дало можливість провести широке коло

комп'ютерних моделюючих експериментів. В якості перспективного методу розвитку кореляційних ортогональних систем статистичної обробки сейсмічних сигналів запропонований адаптивний метод зменшення впливу сейсмічних завад, шляхом використання складних ортогональних фільтрів Лагера дискретного аргументу.

Сформульовані основні наукові і практичні результати математичного моделювання і статистичної обробки сейсмічних сигналів в кореляційних ортогональних системах.

Практичне значення результатів дисертації полягає в тому, що на основі результатів дисертації запропоновано використовувати новий клас кореляційних систем сейсмозвідки – кореляційних систем з вхідними ортогональними фільтрами Лагера дискретного аргументу для підвищення ефективності вирішення задач сейсмозвідки. Отримані практичні рекомендації вибору характеристик і параметрів ортогональних фільтрів Лагера дискретного аргументу для їх використання в кореляційних системах. 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 Лагера дискретного аргументу при розв'язку задач виявлення сейсмічних сигналів. Використання кореляційної системи із вхідними ортогональними фільтрами Лагера дискретного аргументу на основі адаптивного методу збільшення сигнал/завада дає можливість вирішити широке коло задач виявлення сейсмічних сигналів слабкої інтенсивності при дії завад.

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, 7 індексуються в Google Scholar), 10 – тези доповідей на науково-технічних конференціях.

Ключові слова: сейсмозвідка, сейсмічні сигнали, завади, кореляційна обробка, ортогональний фільтр Лагера.

ANNOTATION

Zharovskyi R.O. Mathematical modeling and statistical analysis of seismic signals using orthogonal filtering - Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 01.05.02 – Mathematical modeling and computational methods. – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopol, 2021.

The training was carried out at the Department of Computer Systems and Network of the Ternopil Ivan Puluj National Technical University of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

Specialized Academic Council D 58.052.01 at the Ternopil Ivan Puluj National Technical University of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

The dissertation is devoted to the actual scientific problem of mathematical modeling and statistical processing of seismic signals using orthogonal filtering. A new improved mathematical model of the seismic signal is developed in the form of the additive sum of the attenuating polyharmonic signal and the random noise, which are described by a stationary linear random process. This made it possible to substantiate the characteristics of the generation of seismic signals and take into account their changes during propagation in the layered structures of the earth's crust.

Object of research: physical processes of formation, propagation and statistical evaluation of the characteristics of useful signals in modern seismic systems by the action of noise.

Subject of research: mathematical models and statistical methods of seismic signal processing in correlation systems with input orthogonal filters.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the dissertation, formulates the purpose and main objectives of the study, defines the object, subject and methods of research, shows the scientific novelty of the results, their practical significance, determines the relationship with scientific topics, and provides information on testing results of the dissertation and their coverage in scientific works.

In the **first chapter** the analysis of scientific publications in the direction of geophysical researches of a crust for the purpose of prospecting of minerals is carried out.

Based on the purpose and objectives of the dissertation, it is determined that in the future seismic research methods will be considered, which are one of the main types of study of the geological structure of the upper layers of the earth's crust, based on the propagation of artificially excited elastic waves in the earth's crust.

Based on the analysis of seismic research methods, it is determined that the following are used as useful elastic seismic waves: longitudinal, transverse, surface waves.

Seismic disturbances include: microseismic oscillations of the soil, sound waves that occur during an explosion, vibration, scattered waves, accidental interference in the electronic paths of seismic systems, other accidental interference.

Based on the analysis of seismic technical means, it is determined that two approaches to processing and interpretation of the results of geophysical observations are used: deterministic and statistical.

Modern seismic exploration is based mainly on the use of statistical research methods in connection with the introduction of non-explosive (environmental) seismic wave generators. This significantly reduces the intensity of the useful signals, and accordingly reduces the signal-to-noise ratio, so there is a need when processing seismic signals to use effective noise-tolerant methods for detecting signals mainly correlated.

Taking into account the solution of the dissertation problems and the results of the analysis of the known mathematical models of seismic signals, the requirements to the mathematical model of the seismic signal are formulated.

The use of correlation systems is substantiated as a system of seismic signal processing. To increase the efficiency of correlation systems, the use of orthogonal correlation processing is justified.

The **second chapter** presents the main results of theoretical research of the dissertation.

To obtain the results, a theoretical apparatus of linear random processes was used, which made it possible to logically combine research within the framework of correlation

theory of both deterministic and random processes that describe a seismic signal and their transformation in correlation systems.

The model of a random seismic signal in the form of the sum of the useful seismic signal and random interference is substantiated. Based on the analysis of the physical features of the formation of seismic signals, the model of the useful seismic signal in the form of a polyharmonic attenuation signal is substantiated. Analysis of research results and preliminary statistical processing of experimental measurements of seismic disturbances confirmed the statistical hypothesis of stationarity in the broad sense of disturbances. This made it possible to use the model of a stationary linear random process in the study of interference. Processes of white, colored, RC and RLC - noise are used as models of seismic disturbances.

In the **third chapter** presents the results of computer modeling and statistical processing of seismic signals by the studied correlation systems.

The choice of Lagerr filters is substantiated, which in comparison with other orthogonal filters have characteristics that ensure efficient use in correlation systems.

Two variants of correlation systems are considered, typical and with input orthogonal Lagerr filters under the action of different combinations of seismic signals and noise.

In the **fourth chapter** is substantiated the efficiency of the correlation orthogonal system of seismic data processing on the basis of orthogonal Lager filters. The obtained results of increasing the signal interference level of such a system in comparison with a typical correlation system.

Appropriate algorithmic and software for statistical processing of seismic signals have been developed, which has made it possible to conduct a wide range of computer simulation experiments. As a promising method for the development of correlation orthogonal systems for statistical processing of seismic signals, an adaptive method for reducing the impact of seismic interference by using complex orthogonal Lager filters of a discrete argument is proposed.

The main scientific and practical results of mathematical modeling and statistical processing of seismic signals in correlation orthogonal systems are formulated.

The practical values of the results obtained in the work is: based on the dissertation results it is proposed to use a new class of correlation systems of seismic exploration - correlation systems with input orthogonal Lager discrete argument filters to increase the efficiency of seismic problems. Practical recommendations for choosing the characteristics and parameters of orthogonal Lager filters of a discrete argument for their use in correlation systems are obtained. Developed algorithms and software for computer simulation of seismic signals and interference made it possible to analyze a wide range of combinations of useful seismic signals and interference in correlation systems with input orthogonal Lager discrete argument filters in solving seismic signal detection problems. The use of a correlation system with input orthogonal Lager filters of a discrete argument based on an adaptive method of signal / interference magnification makes it possible to solve a wide range of problems of detecting seismic signals of low intensity under interference.

Main results of the investigation represented in the dissertation theses are published in 17 scientific papers: 1 article are in a foreign publication, 6 are in the articles from the list of scientific professional publications of Ukraine on technical sciences (1 of them are in publication registered in science-metric data base with international citation index Inspec, 1 article registered in Scopus, 7 in Google Scholar), and 10 publications in the proceedings of international and all-Ukrainian science-practical and science-technical conferences.

Keywords: seismic, seismic signals, noise, correlation processing, orthogonal Lager filter.

Список публікацій здобувача

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. *(індексується в Google Scholar)*.

2. Жаровський Р.О. Комп'ютерне моделювання стаціонарного РС шуму з дискретним часом. Вісник ТДТУ. 2008. Том 13. №1. С. 157–161. *(індексується в Google Scholar)*.

3. Жаровський Р.О., Щербак Л. М. Моделі геофізичних сигналів на основі лінійних випадкових процесів. Вісник ТДТУ. 2009. №1. С. 138–144. *(індексується в Google Scholar)*.

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. *(індексується в Google Scholar)*.

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 Google Scholar)*.

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. *(індексується в Google Scholar)*.

7. Kozlovskiy V., Scherbak L., Martyniuk H., Zharovskyi 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, CrossRef, Index Copernicus, Applied Science & Technology Source, DOAJ, Google Scholar)*.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Жаровський Р.О. Ортогональні фільтри Лагера 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, 7-8 жовтня 2010 р 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 Лагера 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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ	15
ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1 СЕЙСМІЧНІ СИГНАЛИ І ТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ	22
1.1. Методи і системи проведення експериментальних досліджень сейсмозвідки	22
1.1.1. Основні задачі сейсмозвідки.....	22
1.1.2. Основні структури і характеристики технічних сейсмічних систем.....	25
1.1.3. Методи експериментальних досліджень сейсмозвідки	30
1.2. Сейсмічні сигнали і канали їх розповсюдження.....	33
1.3. Математичні моделі сейсмічних імпульсів	36
1.4. Задачі математичного моделювання і статистичної обробки геофізичних сигналів.....	38
1.4.1. Кореляційні характеристики сейсмічних сигналів.....	40
1.5. Вимоги до математичної моделі сейсмічних сигналів.....	43
1.6. Постановка завдань дослідження дисертації	45
1.7. Висновки до розділу 1	47
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕЙСМІЧНИХ СИГНАЛІВ.....	48
2.1. Математичні моделі сейсмічних сигналів	48
2.1.1. Формування сейсмограм як комбінацій сейсмічних сигналів	48
2.2. Моделі корисних сейсмічних сигналів	49
2.2.1. Моделі сейсмічних сигналів з неперервним часом.	50
2.2.2. Моделі детермінованих сейсмічних сигналів з дискретним часом.	51
2.3. Лінійний випадковий процес, як конструктивна модель сейсмічних завад	58
2.4. Висновки до розділу 2	69
РОЗДІЛ 3 КОРЕЛЯЦІЙНІ СИСТЕМИ З ВХІДНИМИ ОРТОГОНАЛЬНИМИ ФІЛЬТРАМИ В ЗАДАЧАХ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СЕЙСМІЧНИХ СИГНАЛІВ ...	71
3.1. Основні методи обробки сейсмічних сигналів	71

3.1.1. Кореляційні методи обробки	71
3.1.2. Розклад сейсмічних сигналів в ортогональні ряди.....	72
3.2. Структури, характеристики сейсмічних кореляційних систем.....	77
3.2.1. Типова дискретна кореляційна система обробки сейсмічних сигналів.	78
3.2.2. Дискретні кореляційні сейсмічні системи з вхідними ортогональними фільтрами	80
3.3. Формування бази даних реалізацій сейсмічних сигналів	81
3.3.1. Моделювання сейсмічних завад	81
3.4. Аналіз роботи кореляційної системи обробки сейсмічних сигналів.....	94
3.4.1. Аналіз роботи типової кореляційної системи.	94
3.4.2. Аналіз роботи кореляційної системи з вхідними дискретними ортогональними фільтрами.	97
3.5. Обробка зашумлених сейсмічних сигналів кореляційною системою з попередньою ортогональною фільтрацією.....	103
3.5.1. Білий шум.....	107
3.5.2. Забарвлений шум.....	108
3.5.3. RC-шум.....	111
3.5.4. RLC-шум.	114
3.6. Висновки до розділу 3	117
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ОРТОГОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ОБРОБКИ СЕЙСМІЧНИХ СИГНАЛІВ.....	119
4.1. Адаптивний метод кореляційної ортогональної обробки сейсмічних сигналів...	119
4.2. Результати комп'ютерного моделювання адаптивного методу ортогональної лагерровської фільтрації шумових завад.....	124
4.3. Оцінювання ефективності адаптивного методу зменшення впливу шумових завад	131
4.4. Результати використання адаптивного методу ортогональної лагерровської фільтрації.....	132

4.5. Програмний комплекс моделювання і визначення характеристик сигналів сейсмозвідки	134
4.5.1. Результати обробки сигналів кореляційною ортогональною системою	136
4.6. Висновки до розділу 4	140
ВИСНОВКИ	142
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	144
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача.....	156
ДОДАТОК Б Геофізичні методи дослідження земної кори	158
ДОДАТОК В Ортогональні поліноми Лагера дискретного аргументу	162
ДОДАТОК Д Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	165

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

МВХ	метод відбитих хвиль;
ПКВП	періодично корельований випадковий процес;
ПЗ	програмне забезпечення;
ПК	персональний комп'ютер;
ВП	випадковий процес;
SNR	signal-to-noise ratio (відношення сигнал/завада);
$x(t)$	сейсмічний сигнал;
$Q(t)$	корисний сейсмічний сигнал;
$\xi(t)$	випадкові сейсмічні завади;
$\varphi(t)$	імпульсна характеристика стаціонарного формуючого фільтру;
$R_{12}(\tau)$	кореляційне перетворення сейсмічних сигналів;
$\bar{R}_{12}(\tau)$	кореляційне перетворення сейсмічних сигналів після проходження ортогональних фільтрів;
$h_{12}(\tau)$	взаємне кореляційне перетворення;
$\psi(\tau, t)$	гільбертова двовимірна детермінована функція, яка має фізичну інтерпретацію, як імпульсна перехідна функція лінійного фільтра із змінними в часі параметрами;
$\eta(\omega, \tau)$	випадковий процес з незалежними приростами і безмежно подільним законом розподілу;
$\zeta(\omega, \tau)$	узагальнена похідна процесу $\eta(\omega, \tau)$ як випадковий процес білого шуму з незалежними значеннями.
ω	простір елементарних випадкових подій.

ВСТУП

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 ВК-21-06 «Математичне моделювання, методи обробки та імітації біометричних циклічних сигналів в інформаційних системах», ДІ-188-12 «Розробка математичного та програмного забезпечення інформаційних систем діагностики та аутентифікації людини за циклічними біометричними сигналами».

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 сейсморозвідки.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Провести аналіз відомих публікацій з проблем сучасної сейсморозвідки, 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 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 сейсмозвідки – кореляційних систем з вхідними ортогональними фільтрами Лагера дискретного аргументу для підвищення ефективності вирішення задач сейсмозвідки.

2. Отримані практичні рекомендації вибору характеристик і параметрів ортогональних фільтрів Лагера 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 Лагера дискретного аргументу при розв'язку задач виявлення сейсмічних сигналів.

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

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 [41] – створення системи комп'ютерних програм для дослідження роботи кореляційної системи з вхідними ортогональними фільтрами при дії завад; у [53] – обґрунтування роботи кореляційних систем з використанням складних ортогональних фільтрів; у [55] - обґрунтовується використання класу лінійних випадкових процесів для моделювання сейсмічних завад; у [52] - обґрунтування можливості використання білого шуму в якості породжуючого при моделюванні лінійних випадкових процесів, у [1] – обґрунтовано використання складного ортогонального фільтру

Лагера в адаптивній кореляційній системі виявлення сейсмічних сигналів на фоні завад.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались на наступних міжнародних та національних конференціях: науково - практична конференція молодих вчених та аспірантів "Інтегровані інформаційні технології та системи" (м. Київ, 2005 р.), 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 науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології» (м. Тернопіль, 2013 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, 7 індексуються в Google Scholar), 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.

РОЗДІЛ 1

СЕЙСМІЧНІ СИГНАЛИ І ТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

У даному розділі проведено аналіз сейсмічних методів дослідження структури земної кори. Наведено основні характеристики сейсмічних систем, визначено задачі математичного моделювання і статистичної обробки сейсмічних сигналів. Проаналізовані відомі моделі сейсмічних сигналів. Визначені необхідні властивості до розроблюваної математичної моделі сейсмічного сигналу.

1.1. Методи і системи проведення експериментальних досліджень сейсморозвідки

1.1.1. Основні задачі сейсморозвідки

Геофізична розвідка є одним з найбільш прогресивних сучасних засобів дослідження корисних копалин. Вивчення фізичних явищ на поверхні землі, в свердловинах дозволяє робити висновки про структурні особливості і склад гірських порід, наявність покладів корисних копалин. Завдяки своїй оперативності, в порівнянні з іншими методами досліджень, і ефективності геофізична розвідка дає можливість швидко виявляти і розвідувати родовища різних видів мінеральної сировини. Роль геофізичних методів в геологорозвідувальних роботах і на сьогодні безперервно зростає [18, 64].

При цьому продуктивність експериментальних геофізичних робіт значно вища, а вартість у декілька разів менша в порівнянні з розвідкою за допомогою неглибоких (до 100 м) і глибоких (понад 1 км) свердловин. Підвищуючи геологічну і економічну ефективність вивчення надр, геофізичні методи дослідження є найважливішим напрямом прискорення науково-технічного прогресу в геології і гірській справі.

Предметом досліджень геофізичних методів прикладної геофізики є:

- глибинні структури земної кори на суші і в океанах,

- кристалічний фундамент,
- осадовий шар,
- корисні копалини в них,
- верхня частина земної кори, що називається геологічним (геофізичним) середовищем або верхньою частиною розрізу.

Метою геофізики є встановлення будови, складу, історії розвитку цих об'єктів земної кори на основі непрямой інформації про фізичні поля.

Основними завданнями геофізичних досліджень земної кори є наступні [34]:

1. вивчення складу, будови і стану порід, що складають земну кору, а також їх динаміку,
2. виявлення корисних копалини і вивчення геологічного середовища.

Зупинимося на короткій характеристиці фізичних полів Землі, їх параметрів, а також фізичних властивостях середовища, що забезпечують можливість виявлення аномальних і інших об'єктів.

Аномалією в геофізиці вважається відхилення вимірюваних характеристик поля від нормального. При цьому виникнення аномалій пов'язане з тим, що об'єкт пошуків спотворює поле внаслідок відмінностей фізичних властивостей, наприклад, віддзеркалення сейсмічних хвиль від контактів різних товщ. Інтенсивність аномалій визначається контрастністю фізичних властивостей, відносною глибиною об'єкту, а також рівнем завад.

Виявлення геофізичних аномалій – науково геофізична проблема. Дослідження проводяться на фоні різноманітних завад геологічного, природного, техногенного характеру (неоднорідності верхньої частини геологічного середовища, нерівності рельєфу, атмосферні, кліматичні, промислові і інші завади), тобто завжди спостерігається інтерференція полів різної природи. При цьому буває як просте накладення (суперпозиція) параметрів полів, так і їх складні, нелінійні взаємодії.

Вимірюючи фізичні параметри по системах зазвичай паралельних профілів або маршрутів і виявивши аномалії, можна судити як про властивості порід, так і отримати відомості про геологічну будову досліджуваного масиву.

Перелік основних методів розвідувальної геофізики і їх коротка характеристика, які приведені в таблиці 1.1, отримані за результатами аналізу розширеного переліку методів дослідження [101] наведених в додатку Б.

Таблиця 1.1

Методи досліджень в геофізиці і їх коротка характеристика

Фізичне поле	Фізична властивість	Метод дослідження і його різновиди	Вимірюваний параметр
Гравітаційне	Щільність, пористість	Гравіметрична розвідка	Прискорення тяжіння і інші похідні потенціалу тяжіння
Магнітне	Магнітна сприйнятливість Залишкове намагнічення	Магнітна розвідка	Модуль повного вектора магнітного поля, компонента напруженості магнітного поля.
Електричного струму постійного, або змінного	Електричний опір	Електропрофілізація Електрондонування	Розподіл потенціалу ЕП на земній поверхні і усередині свердловин. Електричний і магнітний вектори змінного електромагнітного поля
Пружних (сейсмічних) коливань	Модуль Юнга Коефіцієнт Пуассона Швидкість поширення поздовжніх пружних коливань	Сейсмологічні дослідження будови земної кори. Кореляційний метод заломлених хвиль. Метод заломлених хвиль. Метод відбитих хвиль і ін.	Час і швидкість поширення відбитих і заломлених хвиль від пункту збудження, до пункту прийому коливань.
Термічне	Теплопровідність. Теплоємність	Зйомка земної поверхні в інфрачервоних променях (10-20 мкм)	Радіаційна температура
Електро-магнітне	Радіоактивне випромінювання	Гамма - зйомка	Радіоактивність

Особливої уваги заслуговують методи досліджень на основі поширення в земній корі пружних хвиль (сейсмічні методи) [105]. Сейсмічна розвідка є одним з найважливіших видів геофізичної розвідки і включає сукупність методів досліджень

геологічної будови земної кори, заснованих на вивченні поширення в ній штучно збуджених пружних хвиль.

Вимірюючи час поширення хвиль і вивчаючи характеристики отриманих хвиль, визначають глибину залягання і форму геологічних границь, на яких сталося заломлення або віддзеркалення хвилі, а також судять про склад порід, через які пройшла хвиля, визначають кути нахилу шарів, навіть при великій глибині їх залягання. Тому сейсмічні методи особливо широко використовують при вирішенні структурно-геологічних завдань, особливо при пошуках родовищ нафти і газу.

1.1.2. Основні структури і характеристики технічних сейсмічних систем

Технічні системи сейсмічних методів дослідження в подальшому сейсмічні системи, відображають науково-технічний напрям розвитку загальних технічних систем. Зупинимось на результатах аналізу принципів роботи і структури сейсмічних систем, які описані в матеріалах робіт [34, 67, 90, 113, 116].

Сейсмічні системи, побудовані на використанні механіки, електроніки, автоматики, обчислювальної техніки, тобто способи вимірювання - фізико-технічні (рис. 1.1). При цьому інструментальний рівень дуже високий.

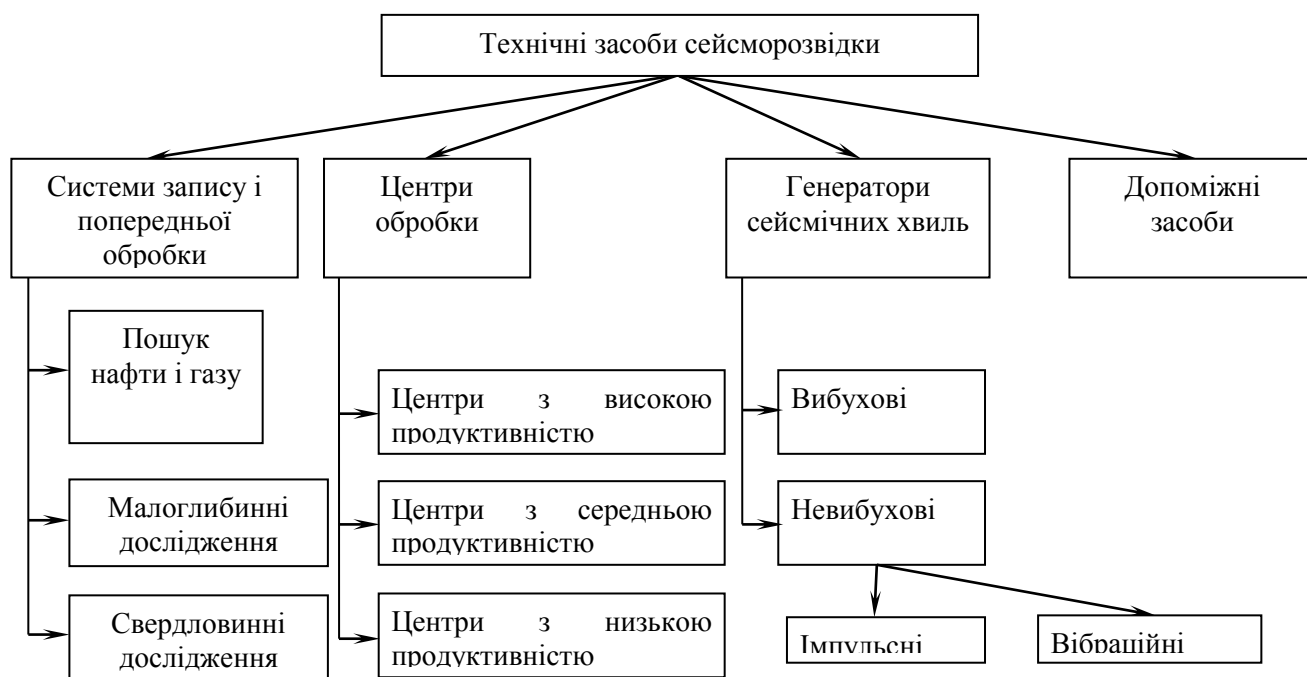


Рис. 1.1. Структура технічних засобів сейсмозвідки

Загальна характеристика сейсмічних систем. Для проведення сейсморозвідки використовуються складні апаратні комплекси, що включають (рис. 1.2):

- джерела збудження пружних хвиль (вибухові і невибухові [115, 116]);
- пристрої, що сприймають пружні коливання і що перетворюють їх в електричні сигнали (сейсмоприймачі або геофони при наземних роботах, п'єзоприймачі і гідрофони при роботах на акваторіях);
- сеймостанції, що включають багатоканальні підсилювачі і реєстратори (аналогові або цифрові);
- комп'ютери для опрацювання інформації;
- допоміжне устаткування.

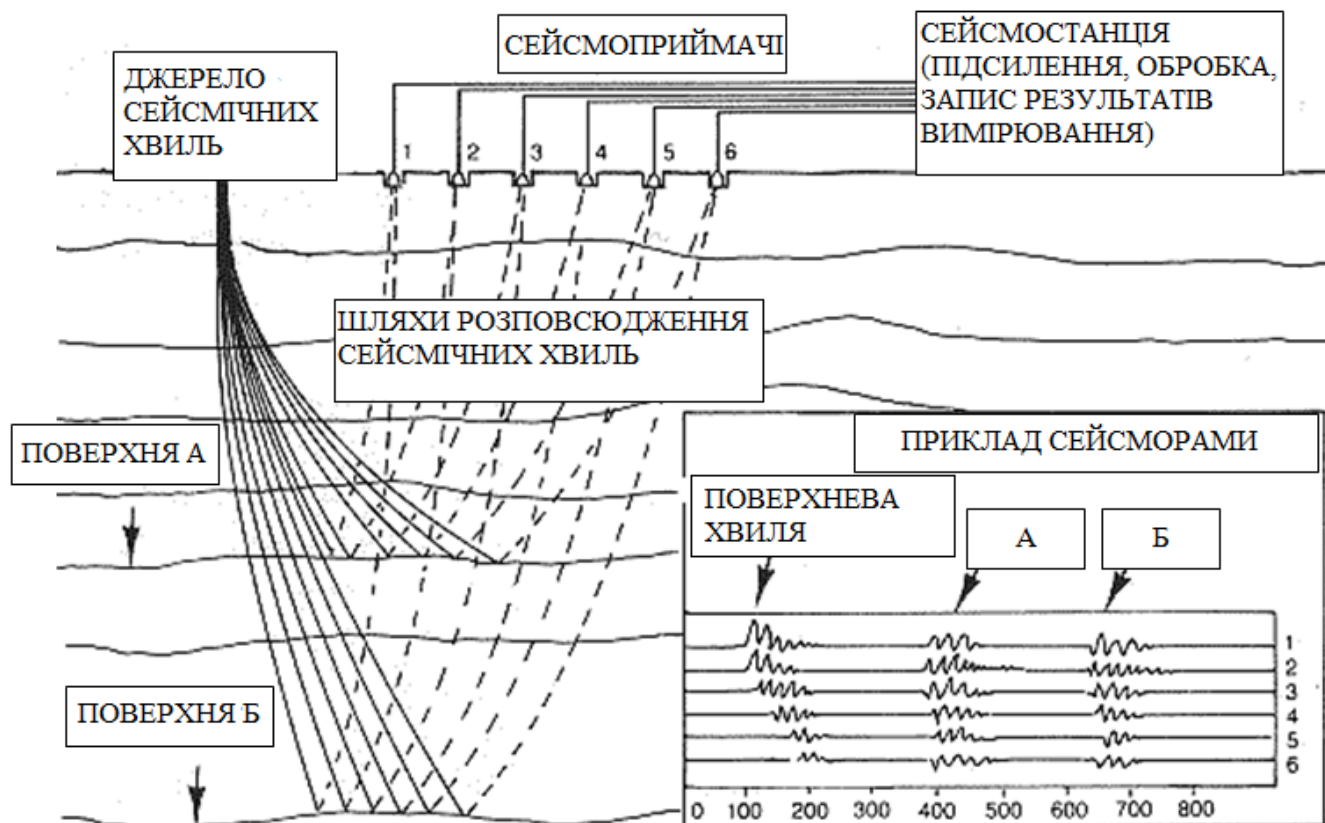


Рис. 1.2. Ілюстративна схема проведення сейсмічного експерименту.

Як видно з рис. 1.2. суть проведення сейсмічного експерименту полягає в наступному. Джерело сейсмічних хвиль генерує сейсмічну хвилю (імпульс), яка поширюється на всі сторони від джерела. Частина хвиль відбивається від окремих

шарів земної кори і реєструється сейсмоприймачами. Після чого отриманий запис надходить на сеймостанцію для подальшої обробки і отримання сейсмограм.

Про технічну складність проблем, що стоять перед сейморозвідувальною апаратурою, свідчать такі чинники, як необхідність:

- вивчати глибини від декількох метрів до сотень кілометрів, що вимагає використання різних джерел збудження пружних хвиль - від вібраторів до потужних вибухів;
- реєструвати зсуви ґрунту амплітудою від 10^{-6} мм. до долі міліметра, що створює перепад в інтенсивності сигналів в мільйони разів і вимагає використання електронних підсилювачів;
- одночасної фіксації хвиль в декількох точках навколо джерела, або в сотнях пунктів від нього, для чого потрібні багатоканальні ідентичні приймальні установки;
- здійснювати фільтрацію отриманої інформації від різноманітних шумів і завад, що виявилось можливим лише завдяки використанню потужних процесорів, вбудованим в сучасні станції;
- обробляти дуже велику кількість інформації, з подальшою інтерпретацією матеріалів на ЕОМ.

Засоби генерування сейсмічних сигналів. Для збудження пружних хвиль на земній поверхні, в неглибоких (до 50 м) свердловинах або у водоймищах використовуються різні джерела. Простими є удари по земній поверхні. Також основним способом створення пружних хвиль було підривання вибухових речовин в свердловинах, водоймищах.

Зважаючи на складність організації і проведення вибухових робіт, а також їх екологічну шкоду останнім часом використовуються різного роду невибухові джерела [115, 116] з імпульсним (10^{-3} - 10^{-1} с) або квазінеперервним (2^{-20} с) збудженням (установка газової детонації, гідравлічні домкрати, електроіскрові джерела і інші).

Сучасні цифрові сейсмостанції - це фактично спеціалізовані комп'ютери з великим числом ідентичних каналів. Вони містять: приймачі, включи набір сейсмодатчиків, і реєструючі блоки, які містять:

1. набір підсилювачів з фільтрами, які відповідають кількості каналів станції,
2. комутатор каналів (мультиплексор), призначений для визначення амплітуд сигналів через певні інтервали часу,
3. перетворювач АЦП для перетворення сигналів в цифрову форму,
4. цифровий реєстратор для запису сигналу на цифрові носії,
5. блоки живлення,
6. контрольно-вимірювальні пристрої.

У сучасних сейсмостанціях застосовується в основному цифрова реєстрація. В цьому випадку сигнал з певним кроком дискретизації вимірюється і кодується у цифровому вигляді в двійковому коді, а потім записується на носій. Переваги цифрового запису перед аналоговим в тому, що до запису практично не вносяться спотворення і її можна опрацьовувати за допомогою ЕОМ. Це дозволяє автоматизувати процес обробки та інтерпретації сейсмічної інформації.

Сукупність сейсмоприймача, підсилювача і реєструючого пристрою носить назву сейсмічного каналу, або каналу запису. У різних сейсмостанціях бувають від 1 до 1000 каналів.

Для сприйняття пружних коливань ґрунту і перетворення їх в електричні сигнали використовуються електродинамічні сейсмоприймачі (геофони). Сейсмоприймачі підключаються до сейсмічних кабелів, а ті до блоку підсилювачів.

Для підсилення електричних сигналів, отриманих в сейсмоприймачі або відтворюючому пристрої, застосовуються електронні підсилювачі, що підсилюють сигнали в 10^6 - 10^7 разів. Окрім підсилення, важлива функція підсилювача підсилювати коливання певних частот, а коливання інших частот послаблювати. Третя операція, яка може здійснюватися за допомогою підсилювача, - це програмне або автоматичне регулювання підсилення. Таке регулювання необхідне для розширення динамічного діапазону сейсмічного каналу. Він служить для більшого

підсилення слабких сигналів і малого підсилення інтенсивних сигналів для того, щоб в цілому запис на сейсмограмах характеризувався однаковим рівнем амплітуд.

Реєструючі пристрої. Для виділення корисних сейсмічних хвиль необхідно бачити форму отриманих сейсмічних сигналів. Тому головне призначення сейсмічних станцій - записати зміну величини сигналу в часі. Це здійснюється за допомогою реєстраторів, що неперервно фіксують величину сигналу в часі. В результаті прямої реєстрації в каналах запису або відтворення отримують сейсмограми. На них записуються коливання, що поступили з підсилювачів, а також маркери часу і відмітка моменту збудження пружних хвиль, аби визначити час їх приходу від пункту збудження до сейсмоприймачів.

Застосовуючи реєстратори (графічні пристрої), цифровий сигнал можна відтворити і записати у видимій формі способом відхилення (графік залежності величини напруги від часу, як це показано на рис. 1.3).

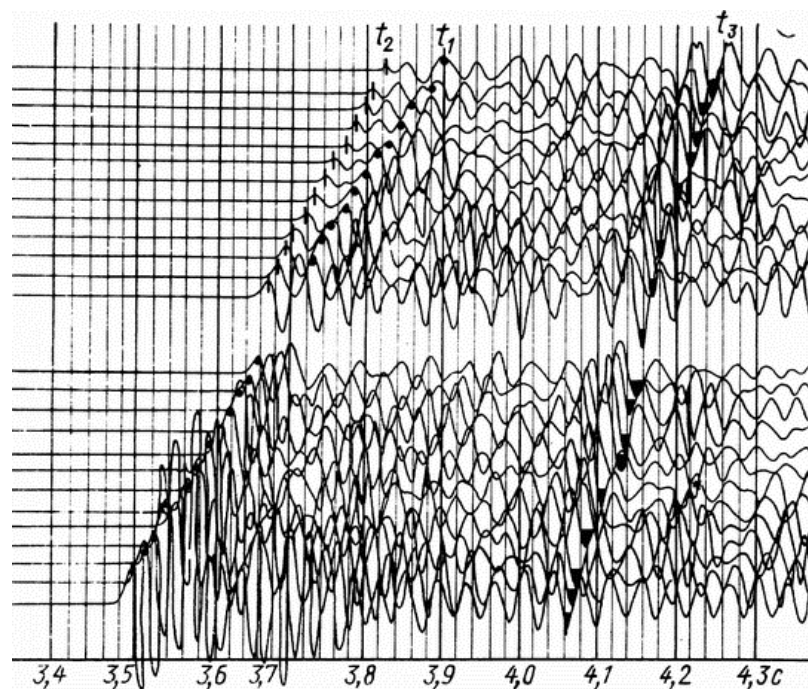


Рис. 1.3. Загальний вигляд багатоканальної сейсмограми

Основне призначення сейморозвідувальної апаратури - вимірювання часу приходу пружних хвиль певного типу, для чого необхідно знати момент збудження

коливань, сприйняти зсуви ґрунту під впливом пружних хвиль, виділити корисні хвилі на фоні хвиль-завад, автоматично зареєструвати їх і оцінити амплітуди.

1.1.3. Методи експериментальних досліджень сейсмозвідки

Методи сейсмозвідки можна класифікувати по різних ознаках: виду використовуваних вторинних хвиль, фізичному типу цих хвиль і так далі.

Основним методом сейсмозвідки, що отримав найбільше практичне використання, є метод відбитих хвиль [34, 35, 102]. За допомогою методу відбитих хвиль проводять спостереження на таких відстанях від джерела, де реєструються переважно хвилі, відбиті від різних границь під різними кутами падіння. За сприятливих умов методом відбитих хвиль можна одночасно вивчати будову осадової товщі багатьох горизонтів, розташованих на різній глибині, що дозволяє робити важливі висновки про геологічну історію району що вивчається. Метод відбитих хвиль має високу роздільну здатність це дозволяє окремо вивчати будову відбиваючих границь розташованих близько одна до іншої. Він дає можливість вивчати будову всієї осадової товщі від невеликих глибин (100—300 м) до основи. Метод відбитих хвиль застосовується при кутах падіння границь до 40—50°, але найкращі результати виходять при кутах нахилу 3—15°. За даними методу відбитих хвиль визначають ефективну швидкість, значення якої у багатьох випадках практично збігається із значенням середньої швидкості хвиль від поверхні землі до відбиваючого горизонту. Таким чином, отримують параметри, необхідні для визначення положення сейсмічних границь. Метод відбитих хвиль також використовують при рішенні різноманітних задач структурної і регіональної геології.

При спостереженнях далеко від джерела на поверхні землі реєструється хвиля, яка унаслідок ефекту заломлення велику частину свого шляху пройшла усередині одного з пластів розрізу, що вивчається. До таких хвиль належать головні, рефраговані і заломлені хвилі. Всі вони мають схожі кінематичні і частково динамічні властивості, що зумовлює спільність методичних і технічних прийомів їх спостереження і інтерпретації, об'єднаних методом заломлених хвиль. Він дозволяє

одночасно вивчати два-три горизонти і не має обмежень відносно глибини досліджень, внаслідок чого знаходить використання при рішенні широкого кола геологічних завдань. Метод заломлених хвиль дозволяє визначати граничну швидкість, яка характеризує фізичні властивості пласта, що вивчається. Знання граничної швидкості у багатьох випадках полегшує стратиграфічну прив'язку сейсмічних границь.

Методи сейсмічної розвідки можна розрізнити також залежно від фізичного типу хвиль, що використовуються для дослідження будови середовища. У сучасній сейсморозвідці широко застосовується метод поздовжніх хвиль, що пов'язаний із здатністю вибухових джерел генерувати поздовжні хвилі.

Застосовуючи спеціальні засоби генерування, вдається отримувати інтенсивні поперечні хвилі, які утворюють вторинні монотипні хвилі при їх відбитті від границі середовища. На їх вивченні засновано метод поперечних хвиль. В порівнянні з методом поздовжніх хвиль цей метод має ряд переваг:

1. Менша швидкість поширення S хвиль дозволяє підвищити відносну точність вимірювання часу пробігу;
2. Менша довжина хвилі (при однаковій частоті) дозволяє підвищувати роздільну здатність методу;
3. Велика однорідність верхньої частини розрізу по відношенню до поперечних хвиль полегшує облік.

Для геологічної розвідки можуть бути використані також поверхневі хвилі. Вивчаючи їх дисперсійні властивості, які тісно пов'язані з шаруватістю розрізу, судять про потужність окремих шарів. Такого роду дослідження проводять в шахтах, при інженерних дослідженнях і при вивченні шаруватої структури морського і океанічного дна. Тому можна говорити ще один метод сейсморозвідки — метод поверхневих хвиль. Його відмінна риса полягає у використанні динамічних особливостей поверхневих хвиль для тлумачення результатів вимірювань.

Залежно від переважаючої частоти коливань розрізняють низькочастотну (менше 20-30 Гц), середньочастотну (30-80 Гц) і високочастотну (більше 80 Гц) сейсморозвідку. За допомогою низькочастотної сейсморозвідки можна вивчати

земну кору на дуже великих глибинах, тому відносно об'єкту досліджень вона близька до сейсмології. Використання високочастотної сейсмозв'язки дозволяє значно підвищити роздільну здатність сейсмічних методів. Проте при переході в область високих частот значно зростають труднощі, що обумовлюються сильним поглинанням високочастотних коливань в геологічних середовищах, особливо у верхній рихлій частині розрізу. Тому високочастотні дослідження, що називаються сейсмоакустичними проводять, коли і джерело і приймач поміщені всередину мало поглинаючого середовища. Сейсмоакустичні, а також ультразвукові дослідження проводять при роботі в гірських виробленнях, свердловинах, при роботах на акваторіях. Частота зареєстрованих коливань може досягати десятків кілогерц.

Для спостереження і вивчення сейсмічних хвиль створено велике число технічних і методичних засобів, методів обробки та інтерпретації спостережень, пристосованих до різних умов проведення сейсмозв'язки, наприклад:

а) метод загальної глибинної точки, що дозволяє за допомогою методики багатократних перекриттів підвищити надійність дослідження сейсмічної границі шляхом багатократного визначення її положення з незалежних спостережень;

б) метод регульованого направленої прийому, призначений для розділення хвиль в умовах сильної інтерференції з метою виділення хвиль, утворених обмеженими ділянками границь або геологічними неоднорідностями;

в) методика невибухової сейсмозв'язки, що використовує ударні або вібраційні джерела;

г) методи сейсмозв'язки, що ґрунтуються на вивченні природних сейсмічних полів, що збуджуються землетрусами, «розтріскуванням» породи, джерелами мікросейсм і так далі.

Перераховані методи і методики володіють різними можливостями відносно глибини, детальності і точності досліджень, дозволяють вивчати різні сейсмічні границі і визначати різні фізичні властивості порід.

1.2. Сейсмічні сигнали і канали їх розповсюдження

У кожному методі сейсморозвідки для вивчення геологічної будови використовують хвилі певного типу і вигляду. Але лише частина з цих хвиль, так звані корисні хвилі, можуть бути використані для вирішення поставленого геологічного завдання.

В сейсморозвідці, корисними є відбиті і заломлені поздовжні хвилі. Всі інші хвилі, які перешкоджають виділенню і дослідженню корисних хвиль, відносяться до категорії завад.

Після генерації пружної хвилі в середовищі виникає зсув, утворюється хвилевий процес. Виникаючи поблизу джерела, він поступово переходить в інші частини середовища шляхом передачі деформацій і напруг за рахунок пружних зв'язків. В результаті в середовищі виникають об'ємні і поверхневі пружні хвилі. Традиційно в сейсморозвідці найбільше використання знайшли об'ємні хвилі: поздовжні (P -хвилі) і поперечні (S -хвилі).

Від пункту генерації поширюються пружні хвилі. Уздовж земної поверхні йдуть поверхневі хвилі, а всередину шару поширюються прямі (поздовжня і поперечна) хвилі (рис 1.4). На границях розділу середовищ з різними швидкостями пружних хвиль за рахунок енергії падаючої хвилі виникають відбиті і заломлені хвилі. При цьому можуть утворитися відбиті і заломлені хвилі як того ж типу, що і падаюча (монотипні, однотипні хвилі), так і іншого типу (змінні хвилі).

Оскільки поздовжні хвилі мають більшу швидкість поширення, ніж поперечні (і тому до пунктів реєстрації приходять першими), а при збудженні пружних хвиль вибухами і багатьма невибуховими джерелами виникають в основному поздовжні хвилі, тому в сейсморозвідці вони використовуються частіше.

Якщо швидкість поширення пружної хвилі в середовищі зростає з глибиною, то промені сейсмічних хвиль викривляються і повертаються на поверхню. Такі хвилі називаються рефрагованими.

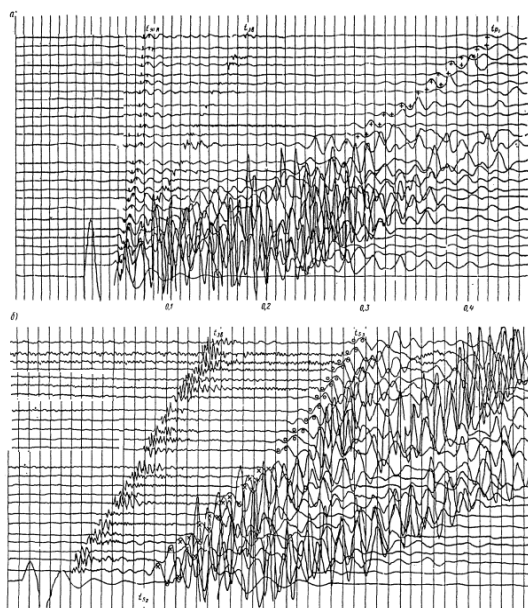


Рис. 1.4. Приклад реальних поздовжніх (а) і поперечних (б) хвиль

При поширенні сейсмічних хвиль в середовищах складної будови (уступи, схили і тому подібне) в зоні тіні для сейсмічних хвиль можуть виникати дифраговані хвилі.

Відомі також поверхневі хвилі, що називаються хвилями Релея (R) і Лява (L) (рис. 1.5, 1.6), які швидко затухають з глибиною.

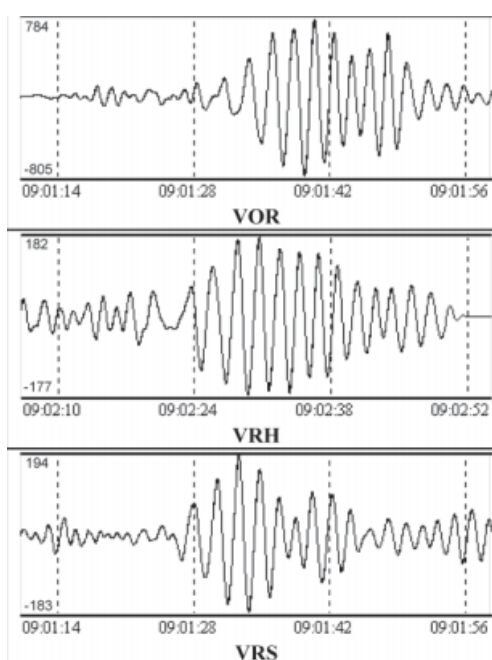


Рис. 1.5. Приклад релеєвських хвиль на сейсмограмах різних станцій, що отримуються в інженерній сейсмозв'язці при промисловому вибуху [38]

Як видно з рисунку 1.6. поверхневі хвилі Релея мають більшу потужність в порівнянні з хвилями Лява.

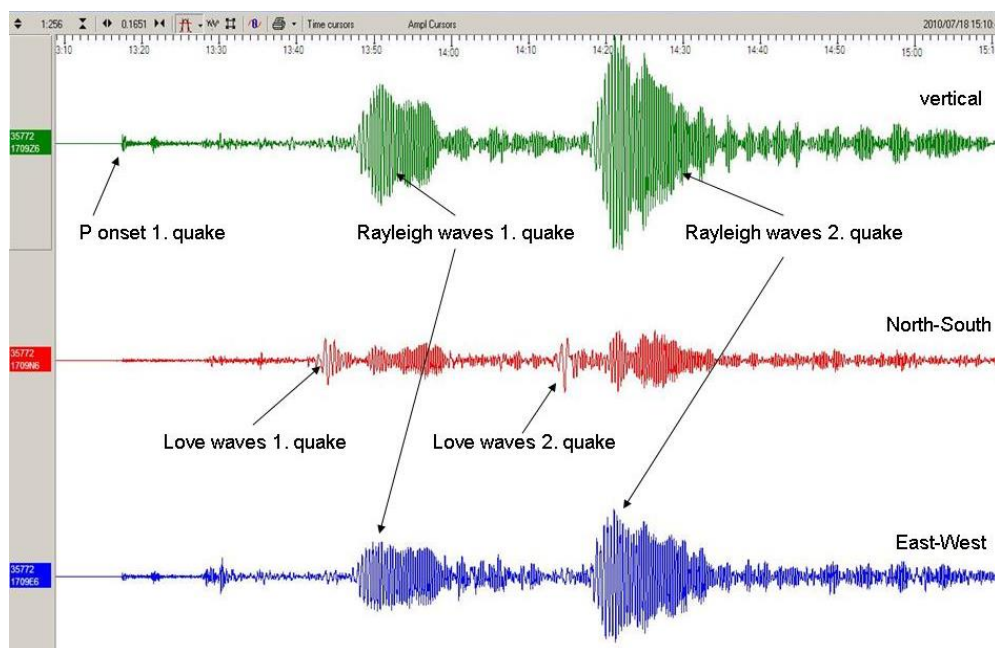


Рис. 1.6. Сейсмограма землетрусу, записана на станції Каліфорнії [4]

Окрім корисних для глибинних досліджень хвиль в природі спостерігаються різні хвилі-завади. До їх числа перш за все належать:

1. Мікросейсмічні коливання ґрунту, що викликаються різними зовнішніми причинами — вітром, дощем, морським прибоєм, роботою машин, транспорту і т. п.
2. Звукові хвилі, що виникають при вибуху.
3. Розсіяні хвилі, що утворюються на дрібних включеннях і не створюють скільки-небудь протяжного фронту.
4. Повно- і неповнократні відбито-заломлені хвилі.
5. Інші випадкові завади.

Крім того, до категорії завад зазвичай відносять хвилі, що мають в місці прийому, інший тип, ніж використовуваний при даному методі розвідки (тобто поперечні хвилі, коли для розвідки використовуються поздовжні хвилі, і навпаки). До завад відносять кратні відбито-заломлені, заломлено-відбиті, кратні відбиті і сумарні хвилі, а також поверхневі інтерференційні, що поширюються вздовж

поверхні ґрунту, з малими швидкостями — від 200 до 1000 м/с. В деяких випадках поверхневі хвилі також відносять до категорії завад.

На підставі викладеного можна сказати, що віднесення тієї або іншої хвилі до категорії корисних хвиль або завад носить умовний характер. Залежно від використовуваного методу розвідки різні хвилі можуть входити в ці категорії.

Велика кількість сейсмічних хвиль, необхідність виділення і розпізнавання природи однієї або десятка корисних хвиль серед сотень інших, що відіграють роль сигналів-завад, представляє дуже складну технічну, методичну і інтерпретаційну проблему в сейсморозвідці. Якщо завади мають значну інтенсивність, то вони сильно утруднюють виділення корисних хвиль і інколи роблять неможливим використання сейсморозвідки. Тому метою даної роботи є розробка (вдосконалення) методів фільтрації завад при реєстрації сейсмічних сигналів.

1.3. Математичні моделі сейсмічних імпульсів

Форма імпульсу реєстрованої хвилі залежить від особливостей джерела, поглинаючих властивостей середовища, явищ на границях і особливостей прийому і реєстрації хвиль. Внаслідок складності будови середовища різних властивостей джерел і умов прийому, форму сейсмічного імпульсу можна в кожному випадку визначити лише експериментально. При цьому часто виникають значні труднощі, що викликаються інтерференційним характером запису хвиль. Зважаючи на це необхідно розробити математичну модель сейсмічного сигналу, яка повинна відображати основні аспекти генерування та просторово – часової структури, а також давати змогу ефективно розв'язувати поставлені задачі сейсморозвідки.

Тому необхідно провести аналіз відомих математичних моделей [93] опису сейсмічних сигналів з метою визначення їх можливостей щодо розв'язання задач сейсморозвідки. Для аналітичного опису сейсмічних коливань у вигляді функції часу найбільш часто використовують моделі Н.Н. Пузирьова, Ріккера, а також модель затухаючих коливань.

Розглянемо модель форми сейсмічного імпульсу, що називається імпульсом Берлаге [60]. Математично цей імпульс описується виразом (1.1).

$$f(t) = \alpha t^\beta e^{-\alpha t} \sin \omega t, t \in (0, \infty), \alpha > 0, \quad (1.1)$$

де α і β - параметри, що визначають конкретний вигляд огинаючої функції.

Неважко бачити, що вказаний формула (1.1) по суті визначає параметричне сімейство функцій, яке можна визначити по заданих a, α, β, ω . Сума, різниця, добуток в сімействі даних функцій, так само як і функції від цих функцій (за умови, що їх область визначення і область значень існують), мають сенс. Проте цей клас не замкнений щодо вказаних операцій. Маючи довільний елемент функціонального простору (1.1), завжди можна записати чотири рівняння, з яких однозначно визначені чотири параметри: a, α, β, ω .

Подібні міркування можна повторити і у разі опису сейсмічних хвиль за допомогою затухаючих коливань

$$f(t) = \alpha e^{-\beta^2 t^2} \sin(\omega_0 t + \varphi), t > 0. \quad (1.2)$$

Такий імпульс неперервний разом зі всіма своїми похідними. Вибором параметрів β^2 і φ можна отримати хвилі з різним характером огинаючої. Амплітудний множник α служить для приведення інтенсивності коливань до заданого рівня.

В якості нуль-фазового коливання, симетричного відносно моменту $t = 0$, часто використовують імпульс Ріккера:

$$f(t) = \alpha \left(1 - \frac{\omega_0^2 t^2}{2} \right) e^{-\frac{\omega_0^2 t^2}{4}}.$$

Він складається з трьох видимих напівперіодів – центрального позитивного і бічних негативних.

Недоліками даних моделей є те, що вони враховують лише параметри генерування сигналу. Тому необхідно розробити математичну модель сейсмічного

сигналу, яка дозволить задавати вплив середовища на амплітуду отриманого сигналу, чого немає в існуючих моделях.

1.4. Задачі математичного моделювання і статистичної обробки геофізичних сигналів

Методи математичного моделювання задач геофізики на сьогодні використовують потужний математичний апарат і широкі можливості комп'ютерної техніки. Математичне вирішення прямих завдань, тобто визначення параметрів фізичного поля за відомими фізичними властивостями, розміру і форми геологічних об'єктів, хоча інколи дуже складне, але однозначне. В той же час, один і той же розподіл параметрів фізичного поля може відповідати різним співвідношенням фізичних властивостей і розмірів геологічних об'єктів. Іншими словами, математичне рішення оберненої задачі геофізики (рис. 1.8) (як і взагалі математичної фізики), тобто визначення розмірів геологічних об'єктів і властивостей порід, що їх складають, по спостережуваному полю, не лише значно складніше, але і, як правило, неоднозначне.

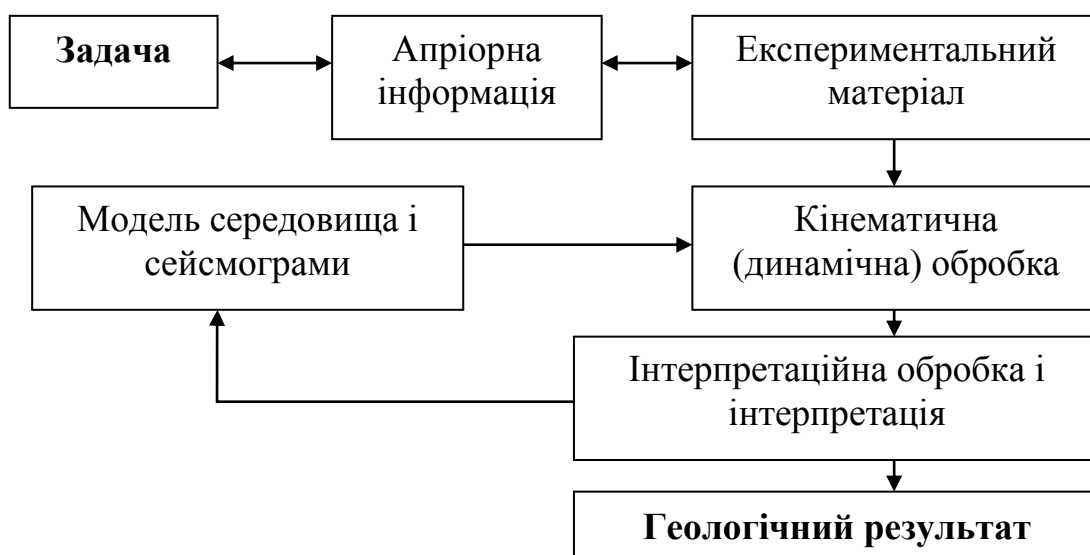


Рис. 1.8. Узагальнена схема оберненої задачі геофізики

В результаті сейсмічного зондування отримують графіки і 2-D і 3-D карти спостережуваних відбитих сигналів. Їх обробка складається із перетворень

спостережуваних сигналів, якісного (візуального) виділення аномалій, їх фізико-математичної інтерпретації за допомогою ЕОМ і геологічного тлумачення результатів.

Фізико-математична інтерпретація виконується на основі фізико-геологічних моделей, приблизно відповідних реальним геологічним об'єктам. Суть моделювання зводиться до апроксимації розвідуваних об'єктів апріорними фізико-геологічними моделями, тобто тілами простої геометричної форми (куля, стовп, циліндр, пласт і ін.) або складної форми з різними параметрами їх фізичних властивостей в порівнянні з довкіллям. Для вибраних фізико-геологічних моделей вирішуються прямі завдання і теоретичні матеріали порівнюються з реальними. Змінюючи параметри фізико-геологічних моделей, в ході математичного моделювання отримують мінімальні розбіжності розрахункових і спостережуваних полів. Отримані апостеріорні фізико-геологічні моделі і є найбільш вірогідним результатом інтерпретації. Щоб добитися однозначної інтерпретації, потрібна додаткова інформація: відомості про фізичні властивості порід, наприклад, по геофізичних методах дослідження, дані інших геолого-геофізичних методів. Процеси обробки експериментальних даних і фізико-математичної інтерпретації розробляються в обчислювальній геофізиці.

Ефективність розвідувальної геофізики визначається правильним вибором методу (або комплексу методів), раціональною і високоякісною методикою і технікою проведення робіт, якістю як геофізичної інтерпретації, так і геологічного тлумачення результатів.

Складність геофізичної інтерпретації пояснюється як неоднозначністю рішення зворотної задачі, так інколи і наближеністю самого рішення. Тому з декількох можливих варіантів інтерпретації необхідно вибрати найбільш достовірний, що можна зробити, якщо використовувати всі відомості про фізичні властивості порід району досліджень, про їх літологію, тектонічну будову, гідрогеологічні умови. Іншими словами, лише при хорошому знанні геології району можна дати найбільш достовірне тлумачення результатів геофізичних методів досліджень, що вимагає спільної роботи геофізиків і геологів при інтерпретації.

Вирішення складних проблем сейсмозвідки - виділення корисних відбитих хвиль від границь шару на фоні сотень хвиль-завад було б неможливим без розробки нових методів обробки результатів вимірювань, а також математичних моделей корисних сигналів і завад.

Основу цифрової обробки сейсмічних даних складають три види математичних операцій:

1. перетворення Фур'є,
2. згортка сигналів,
3. кореляція.

Перетворення Фур'є перетворює функції в часовій області (наприклад, короткий імпульс при збудженні пружної хвилі) у функції в частотній області і навпаки. Важливо, що інформація в ході таких перетворень принципово не втрачається, але її обробка зручніша і наочніша інколи в частотній, інколи в часовій областях.

Кореляція виявляє міру схожості двох послідовностей. Наприклад, за допомогою методу взаємної кореляції визначається схожість сигналів двох трас записів сейсмоприймачів. Для покращення результату в один з каналів можна ввести часове зміщення.

Метою методів цифрової обробки є збільшення відношення сигнал/завада, щоб надійно відфільтрувати кратні та інші хвилі-завади, корелюють осі синфазності корисних однократно відбитих або заломлених хвиль, визначають час їх приходу по всіх трасах і зміну амплітуд сигналів.

1.4.1. Кореляційні характеристики сейсмічних сигналів

Процес виділення і дослідження окремих сейсмічних хвиль можна здійснювати на основі процедур виділення і кореляції сейсмічних хвиль. Під цими поняттями в сейсмозвідці розуміється процес виділення, розпізнавання і дослідження сейсмічних хвиль в часі і в просторі на сейсмограмах і часових розрізах. Для цього використовують сукупність динамічних і кінематичних ознак регулярних сейсмічних хвиль [28].

Деяка сукупність коливань на записі відноситься до сейсмічної хвилі з чітко вираженими індивідуальними властивостями при одночасному виконанні наступних умов :

- на кожній трасі ця група коливань виділяється у вигляді сейсмічного імпульсу тривалістю в 2-3 періоди;
- амплітуда виділеної групи коливань повинна помітно перевищувати амплітуду загального сусіднього фону коливань;
- форма запису - видимі періоди, співвідношення амплітуд сусідніх екстремумів коливань і загальний вигляд малюнка запису повторюється на сусідніх трасах;
- час реєстрації і уявні швидкості визначені, але перші найбільш чіткі фази коливань, міняються від траси до траси плавно і закономірно.

По сукупності вказаних ознак на записі завжди порівняно легко здійснити кореляцію – виділення конкретної сейсмічної хвилі. Приклад виділення відбитої хвилі за вказаними вище ознаками показаний на рис.1.9.

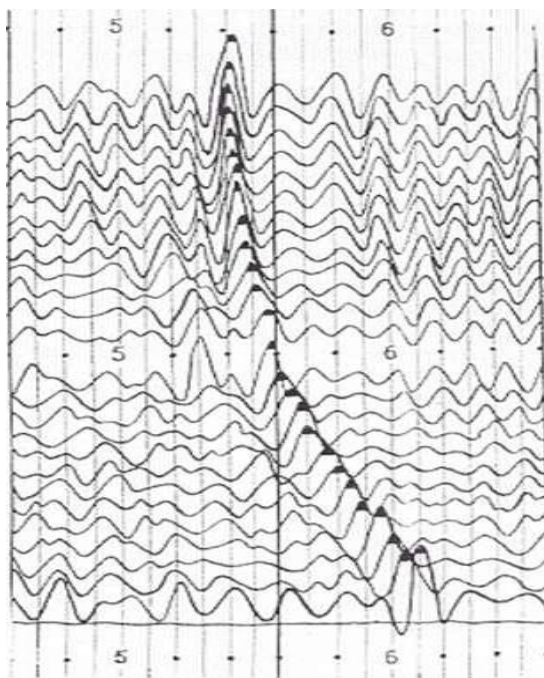


Рис.1.9. Приклад виділення відбитої хвилі на фрагменті сейсмограми методу відбитих хвиль

Після виділення і розпізнавання на записі (сейсмограмі, часовому розрізі) окремої сейсмічної хвилі, як правило, виявляють просліджуваність цієї хвилі в просторі (за профілем) шляхом здійснення фазової кореляції. Фазову кореляцію здійснюють шляхом одночасного дослідження одного або декількох найбільш чітких екстремумів запису. Основний трасований екстремум має бути розташований, по можливості, ближче до початку сейсмічного імпульсу. При виконанні фазової кореляції враховують, головним чином, ознаку подібності форми запису хвилі на сусідніх трасах. Одночасно беруть до уваги властивість плавності зміни часу реєстрації і уявної швидкості аналізованої хвилі уздовж профілю реєстрації. Лінію, що сполучає однакові фази однієї і тієї ж хвилі на різних трасах, прийнято називати віссю синфазності. Вісь синфазності є годографом хвилі (фазовий годограф), який будується в масштабі сейсмограми або часового розрізу. Фазові особливості форми запису сейсмічних хвиль можуть бути і предметом самостійного вивчення при якісній інтерпретації запису на основі принципів сейсмічної стратиграфії - одного з розділів сучасної сейсморозвідки.

У багатьох випадках, коли фазова кореляція ускладнена або недоцільна, застосовують групову кореляцію - дослідження хвилевих пакетів незалежно від їх внутрішньої структури.

Усі вищеназвані три види кореляції (хвилева, фазова і групова) можуть реалізовуватися в різних просторових формах.

Позиційною кореляцією називають дослідження хвилі, її якої-небудь фази або усього хвильового пакету від траси до траси по одній і тій же сейсмограмі загальної точки збудження.

Транспозиційною кореляцією називають дослідження хвилі, її якої-небудь фази або усього хвилевого пакету від однієї сейсмограми загальної точки збудження до іншої на основі принципу взаємності, відповідно до якого часи приходу хвиль і форма запису у взаємних точках мають бути близькі між собою.

Процес кореляції ускладнюється в зонах, де одночасно простежується дві (чи більше) сейсмічні хвилі. Такі зони називаються зонами інтерференції (накладання) сейсмічних хвиль.

1.5. Вимоги до математичної моделі сейсмічних сигналів

Можливість розв'язку задач та проблем сейсмозв'язки суттєво залежить від виду моделей вхідних сигналів та самої технічної системи. Однією з проблем розробки кореляційної ортогональної системи є створення математичної моделі сейсмічного сигналу, яка б в достатній мірі відображала просторово часову структуру сейсмічних сигналів. Це дозволить провести ряд експериментів для дослідження ефективності роботи досліджуваної кореляційної ортогональної системи обробки даних.

Для створення математичної моделі формалізуємо етапи її формування. Розглянемо внутрішню структуру сейсмологічного каналу (рис. 1.10). Сигнал, що генерується джерелом сейсмічних хвиль проходить через геологічне середовище в точці прийому. Будемо вважати, що параметри джерела і середовища будуть однакові для всіх сейсмічних трас. Аналогічні міркування можна повторити і для точки прийому сигналу. Однак, зауважимо, що поряд з корисним сигналом будуть фіксуватись різного роду випадкові адитивні завади.

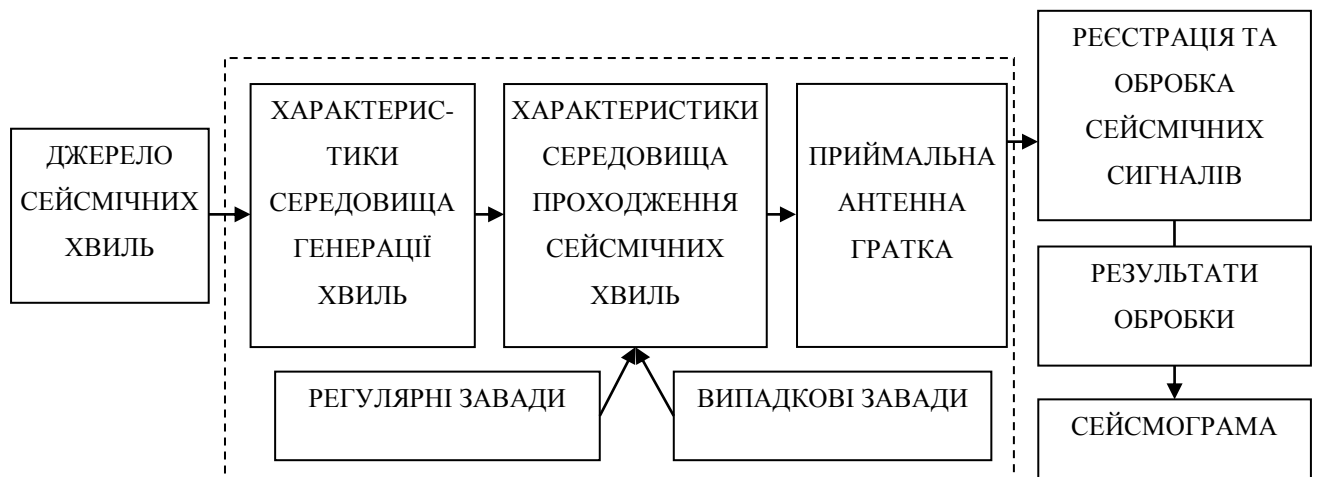


Рис. 1.10. Структурна схема формування сейсмічної траси

Тепер в сейсмологічному каналі виділимо частину, яка не залежить від поверхневих умов (рис. 1.10). Сигнали, що створюються джерелом, складаються з корисних хвиль, регулярних і нерегулярних завад. Кожна з хвиль, що приходять в

точку прийому, проходить різний шлях в середовищі, зазнаючи певних перетворень, які можуть бути описані за допомогою індивідуальних часових характеристик.

Представлена на рис. 1.10 структурна схема зазвичай дуже складна для практичного використання при обробці реальних сейсмограм. Тому її необхідно спростити на підставі деяких апріорних відомостей фізичного і геологічного характеру. Розглядаючи обмежений в часі інтервал траси, будемо вважати, що в його межах форма коливань корисних хвиль істотно не змінюється.

Враховуючи особливості формування сейсмограми сформулюємо вимоги до розроблюваної математичної моделі сейсмічного сигналу [34, 80]:

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 вимог забезпечить можливість здійснення імітаційного моделювання сейсмічних сигналів при вирішенні завдань сейсмозвідки методом математичного моделювання. В таблиці 1.2 подано порівняльну характеристику відомих математичних моделей сейсмічних сигналів та нової математичної моделі.

Таблиця 1.2

Порівняння математичних моделей сейсмічних сигналів

Характеристики моделі	Відомі моделі сейсмічних сигналів				Нова модель
	Імпульс Берлаге	Імпульс Ріккера	Модель затухаючих коливань	Полігармонічний сигнал	Адитивна сума затухаючого полігармонічного сигналу і випадкових завад
Модель адекватно описує формування сейсмічного сигналу	+	+	+	+	+
Відображає особливості його формування розповсюдження і перетворення в електронних ланках сейсмічних систем	-	-	-	+	+
Враховує особливості структури шарів земної кори	-	-	+	-	+
Модель допускає використання відомих методів обробки і аналізу експериментальних даних	+	+	+	+	+
Враховує випадковий характер завад	-	-	-	-	+
Можливість проведення імітаційного моделювання	+	+	+	+	+
Передбачена можливість визначення окремих компонент моделі, які мають фізичну інтерпретацію	+	-	+	+	+
Можливість дослідження в кореляційних системах при поєднанні різних комбінацій корисних сигналів і завад	-	-	-	-	+

1.6. Постановка завдань дослідження дисертації

Проведений аналітичний огляд літератури дав можливість обґрунтувати мету та задачі 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 сейсмозвідки. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Провести аналіз відомих публікацій з проблем сучасної сейсмозвідки, 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 завод 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 завод.

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

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 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.

1.7. Висновки до розділу 1

1. На основі аналізу літературних джерел розглянуто основні методи дослідження земної кори з використанням сейсмічних систем. Проведений аналіз показав, що незважаючи на те що кореляційні системи є системами з підвищеною завадостійкістю використання невибухових джерел генерування сейсмічних сигналів слабкої інтенсивності вимагає впровадження додаткової попередньої обробки вхідного сигналу.

2. Проаналізовані основні класи сейсмічних сигналів і завад, які реєструються сейсмоприймачами, що дозволило визначити основні параметри генерації і форми реєстрації сейсмічних сигналів і завад, а також формалізувати етапи формування сейсмограми.

3. Сформульовані основні задачі сейсмозв'язки, які вирішуються з використанням розглянутих методів дослідження.

4. Проведений огляд математичних моделей сейсмічних імпульсів і їх характеристик.

5. Враховуючи специфіку та особливості поширення сейсмічних сигналів сформульовано вимоги до нової, розроблюваної у дисертаційній роботі математичної моделі сейсмічного сигналу.

6. Сформульовано мету та наведено перелік задач дисертації.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕЙСМІЧНИХ СИГНАЛІВ

Ґрунтуючись на фізичних характеристиках і вимогах до математичних моделей сейсмічних сигналів обґрунтовано математичну модель у вигляді адитивної суми корисного сигналу та завади. Враховуючи вимоги до моделі корисного сейсмічного сигналу обґрунтована модель у виді полігармонічного затухаючого сигналу. Основні результати другого розділу опубліковано в роботах [46,48,51,55]

2.1. Математичні моделі сейсмічних сигналів

Для опису сейсмічних сигналів і полів використовують різні функції неперервного і дискретного аргументів [31, 34, 80, 86, 112]. В якості таких функцій можуть виступати: періодичні функції (тригонометричні), ортогональні системи функцій (Хаара, Уолша, Радемахера), імпульсні сигнали і окремі імпульси [36, 39].

Сигнали що мають однакові властивості, об'єднуються в одну множину, яка називається простором сигналів, і з погляду математики є деяким функціональним простором з певними властивостями. Сигнали розглядаються як елементи цього простору.

2.1.1. Формування сейсмограм як комбінацій сейсмічних сигналів

Математична модель сейсмічного сигналу – це функція, що відображає стан геофізичної системи і задана у фізичних координатах (найчастіше простір, час). Такі функції можуть бути задані на дискретній або континуальній множині точок.

Розглянута схема (рис. 1.10.) показує взаємозв'язок між основними етапами формування траси сейсмограми. Вона утворюється в результаті проходження вихідного імпульсу через ряд лінійних перетворювачів, які описують природно існуючі і штучно створені умови експерименту і залежать від фізико-геологічних і технічних параметрів. Зазвичай в реальних умовах неможливо або недоцільно встановлювати окремо дію кожного з чинників на реєстровану хвилеву картину. В

такому разі можна спростити опис структури сейсмічної траси. В простому зображенні сейсмічна траса є суперпозиція корисних хвиль і завад:

$$x(t) = Q(t) + \xi(t), t \in (0, \infty), \quad (2.1)$$

де $Q(t)$ - корисний сигнал траси, $\xi(t)$ - неінформативна (завади) частина траси.

Єдиним чинником, спільним для всіх хвилевих компонент траси, є характеристики реєструючої апаратури. Параметри апаратури відомі, тому їх вплив можна врахувати. Проте зазвичай в цьому немає необхідності, оскільки спотворення при реєстрації можна вважати постійними не лише для однієї траси запису, але і для всіх трас, що розглядаються спільно.

У окремих випадках інтенсивність мікросейсм на польових записах відносно невелика. Тоді, нехтуючи цією складовою хвильового поля, отримаємо, що умови збудження і прийому є загальними для всіх компонент однієї траси.

При інтерпретації сейсмічних записів деякі постійно діючі фактори, у тому числі стабільні параметри джерела хвиль, зазвичай не є предметом аналізу.

Розглянута модель сейсмограми має досить загальний характер в тому сенсі, що вона не прив'язана до окремих особливостей того або іншого сейсмічного методу. Цю модель можна застосувати до структури хвильового поля, що реєструється при роботах методами відбитих і заломлених хвиль, а також при свердловинних спостереженнях методами вертикальної сейсмічної профілізації і оберненого годографа. В кожному випадку будуть по-своєму визначені класи корисних хвиль і хвиль-завад, вибрані детерміновані і статистичні складові сейсмограми, визначені їх динамічні і кінематичні характеристики.

2.2. Моделі корисних сейсмічних сигналів

Для обробки сейсмограм застосовуються різні обчислювальні засоби, тому основна увага буде приділена моделям процесів з дискретним часом, тобто числові послідовності. Проте при цьому потрібно пам'ятати, що ці процеси отримані за

результатами вимірювань реальних геофізичних сигналів, що поступають безперервно на входи реєструючих пристроїв. Останнє накладає деякі обмеження на властивості моделей з дискретним часом.

Властивості функцій, що використовуються як моделі сейсмічних сигналів, повинні бути узгоджені з властивостями реальних сейсмічних процесів, що вивчаються. Оскільки сейсмічні сигнали повинні задовольняти з фізичної точки зору деяким енергетичним обмеженням, то і самі моделі повинні володіти аналогічними властивостями. Наприклад, можна говорити про точність апроксимації реального геофізичного сигналу, сигналом з дискретним часом, а також формулювати задачі, пов'язані з обробкою реальних геофізичних сигналів, за результатами вимірювань на дискретній множині їх відліків за часом.

Зупинимось спочатку на моделях сигналів з неперервним часом.

2.2.1. Моделі сейсмічних сигналів з неперервним часом.

Як перший приклад розглянемо детермінований простір гармонійних сигналів з неперервним часом. Цей простір можна визначити наступним чином:

$$\{x(t); x(t) = \operatorname{Re}[A \exp(i\omega t + \theta)]\}, t \in (-\infty; \infty),$$

де A - амплітуда, ω - частота, θ - фаза.

Оскільки будь-яка модель сигналу є елементом функціонального простору, то до неї відносяться всі властивості, що зустрічаються при вивченні функціональних просторів. При побудові моделі сигналу в деякій точці сейсмічного поля припустимо, що в точку де розміщений сейсмоприймач, поступають складові сигналу, відбиті від різних неоднорідностей, які, сумуючись, утворюють корисний сейсмічний сигнал. Позначимо ці складові через $x_k(\theta_k, t)$, де $t \in [0, T]$ - неперервний часовий інтервал, $k \in [0, n]$ і θ_k - вектор параметрів, характеризуючий k -ту складову процесу. Тоді

$$x(t) = \sum_{k=1}^n x_k(\theta_k, t) \quad (2.2)$$

Якщо зупинитися на такому представленні [32], то через вимоги до моделей, що викладені в підрозділі 1.5, (2.2) не можна вважати моделлю, оскільки в неї входять n складових. Тому маємо одне функціональне рівняння з n невідомими функціями. І по функції $x(t)$ в загальному випадку не можна однозначно визначити ні складові процесу $x(t)$, ні характеризуючі їх параметри.

Запис (2.2) лише відтворює процес утворення корисного сигналу і не містить інформацію про його параметри $\{\theta_k, k \in [1, n]\}$.

Якщо ж припустити, що кожен доданок $x_k(\theta_k, t)$ є добутком деяких коефіцієнтів x_k на k -ту функцію з ортогональної системи $\{\varphi_k(\theta_k, t), k \in [1, n]\}$, то (2.2) можна вважати моделлю, оскільки в цьому випадку всі вхідні в неї параметри визначаються по заданому процесу $x(t)$. Такого роду модель, яка називається полігармонічною, описана нижче і взята за модель корисного сейсмічного сигналу.

2.2.2. Моделі детермінованих сейсмічних сигналів з дискретним часом.

Розглянемо деякі моделі детермінованих сигналів з дискретним часом.

Функція

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ 1, & t = 0 \end{cases}, t \in (-\infty, \infty) \quad (2.3)$$

називається одиничним імпульсом. У разі неперервного часу цієї функції відповідає дельта-функція Дірака.

Одинична ступінчаста послідовність визначається виразом Хевісайда

$$U(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}, t \in (-\infty, \infty) \quad (2.4)$$

Одиничний імпульс і одинична ступінчаста послідовність зв'язані співвідношеннями

$$U(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t-k) \text{ і } \delta(t) = U(t) - U(t-1).$$

Комплексна експоненціальна послідовність

$$\{e^{(\sigma+i\omega)t}, t \in (-\infty, \infty)\} \quad (2.5)$$

зв'язана з нею синусоїдальна послідовність визначається так:

$$\{A \cos(\omega t + \theta), t \in (-\infty, \infty)\} \quad (2.6)$$

Тут, як і у разі неперервного аргументу, A - амплітуда; θ - початкова фаза; ω - кутова частота; вони являються дійсними числами, якщо немає особливих умов.

Синусоїдальна послідовність і комплексна експоненціальна послідовність при $\sigma = 0$ мають період $2\pi/\omega$, але тільки в тому випадку, коли $2\pi/\omega$ - ціле число. Якщо $2\pi/\omega$ - раціональне число, то дані послідовності теж будуть періодичними, але їх період буде більший, ніж $2\pi/\omega$. А якщо це число ірраціональне, то вказані послідовності не будуть періодичними. Проте незалежно від того, періодична чи не синусоїдальна або експоненціальна послідовність, параметр ω називають частотою.

Відмітимо, що при зміні параметра ω , при фіксованих значеннях решти всіх параметрів і $\sigma = 0$ функції (2.5) і (2.6) виявляються завжди періодичними з періодом 2π . Тому можна припустити, що $\omega \in [-\pi, \pi)$; це і буде передбачатись надалі.

Що стосується фізичної розмірності, то A має розмірність сигналу, а σ і ω виражаються в c^{-1} , θ - в радіанах.

Велике число різних явищ в геофізиці, механіці, радіофізиці може бути описано детермінованою дійсною майже періодичною функцією $Q(t)$ дискретного аргументу.

Під періодичною функцією дискретного аргументу матимемо на увазі функцію $Q(t)$, задану на еквідистантній решітці (відліки за часом узяті з постійним кроком) і представлену у вигляді

$$Q(t) = \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos(\omega_m t + \theta_m), t \in (0, \infty) \quad (2.7)$$

де $A_m \geq 0, \omega_m$ і θ_m - довільні дійсні константи. Відмітимо, що функція (2.7) в загальному випадку представляє собою тригонометричний ряд.

Припустимо, що сигнал (2.7), а також розглянуті нижче його окремі випадки отримані з сейсмічного сигналу з неперервним часом шляхом дискретизації за часом з рівномірним кроком.

Вираз (2.7) замкнутий щодо операцій скалярного добутку в гільбертовому просторі з нормою

$$\|Q\|^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N} \sum_{t=-N}^N Q^2(t), t \in (-\infty, \infty), \quad (2.8)$$

тобто $\|Q\| < \infty$. Сигнали, що описуються функцією (2.7), мають скінченну потужність.

Як згадувалося вище, крім сигналів з скінченною потужністю часто використовуються сигнали з скінченною енергією, для яких справедливе співвідношення

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{t=-N}^N Q^2(t) < \infty$$

Відмітимо, що якщо послідовність значень сигналу абсолютно сумована, тобто

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{t=-N}^N |Q(t)| < \infty$$

то такий сигнал має і скінченну енергію, що слідує з нерівності

$$\sum_t Q^2(t) \leq \left[\sum_t |Q(t)| \right]^2$$

Зворотне твердження в загальному випадку місця не має.

Періодичні сигнали з скінченною потужністю можуть бути розкладені в ряд Фур'є, тобто мають лінійний спектр. Для них в звичайному сенсі спектральна щільність потужності не існує. Сигнали з скінченною енергією мають неперервний спектр і в ряд не розкладаються, а представляються інтегралом Фур'є.

Сигнали в сейсморозвідці що формуються з використанням вібраторів або ударних методів [13, 56, 62] на вході сейсмодатчиків мають форму окремих затухаючих імпульсів. Модифікуємо формулу (2.7), введемо коефіцієнт затухання корисного сейсмічного сигналу. В якості моделі корисного сейсмічного сигналу використовується полігармонічний затухаючий сигнал, який буде враховувати фізичний механізм формування сигналу при розповсюдженні сейсмічного сигналу в земній корі. Під полігармонічним затухаючим сигналом розуміють детерміновану функцію часу з кінцевим числом гармонік, розташованих в обмеженій смузі частот:

$$Q(t) = \sum_{m=1}^n A_m e^{-\alpha_m t} \sin(\omega_m t + \theta_m), \quad A_m \geq 0, \quad (2.9)$$

де $\omega_m \in (\omega_i, \omega_a)$; $\{A_m, m \in [1, n]\}$ - амплітуда сигналу $Q(t)$, яка відмінна від нуля на скінченному числі значень $\{\omega_m, m \in [1, n]\}$ - частота; $\{\theta_m, m \in [1, n]\}$ - фаза $Q(t)$,

$\{\alpha_m, m \in [1, n]\}$ - коефіцієнт затухання гармонічних коливань, n - число гармонічних компонент..

Таким чином, полігармонічний затухаючий сигнал це частковий випадок майже періодичного сигналу (2.7), який може бути розглянутий як деяке його наближення в середньоквадратичному сенсі. Легко переконатися, що функція (2.9) задовольняє всім перерахованим вище вимогам до моделей сигналу, оскільки вхідні в модель параметри мають геофізичний зміст амплітуди, частоти і початкової фази гармонічних коливань. По відомому $Q(t)$ вони визначаються таким чином:

$$A_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2}, \theta_m = \psi(a_m, b_m) \quad (2.10)$$

де

$$\psi(a, b) = \arccos \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \operatorname{sign} b \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} a_m &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=-N}^N Q(t) \cos \omega_m t \\ b_m &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=-N}^N Q(t) \sin \omega_m t \end{aligned} \quad (2.12)$$

Крім того, множина цих функцій замкнута щодо операцій сумування, множення, інтегрування, диференціювання, згортки і інших лінійних операцій.

Якщо відношення між частотами гармонік виражається раціональним числом, то, вибравши відповідний масштаб, завжди можна представити сигнал (2.9) у вигляді тригонометричного полінома порядку n . Як відомо, відношення всіх вищих частот такого полінома до першої гармоніки цілочисельне, проте деякі гармоніки тригонометричного полінома (включаючи і першу, але виключаючи вищу) можуть мати нульові амплітуди. Тому надалі, вважатимемо, що полігармонічний сигнал

(2.9) є тригонометричним поліномом, тобто складається з частот, кратних першій гармоніці: $\omega_m = m\omega$. А це означає, що $Q(t)$ є періодична функція з періодом N .

Користь апроксимації геофізичних сигналів за допомогою моделі тригонометричного полінома підтверджується теоремою Вейерштраса: неперервна функція з періодом 2π може бути рівномірно апроксимована тригонометричним поліномом з будь-яким заданим ступенем точності. Іншими словами, якщо ε - будь-яке задане позитивне число, то існує тригонометричний поліном $Q(t)$ (деякого порядку) такий, що

$$|x(t) - Q(t)| < \varepsilon$$

для всіх значень t .

Оскільки раніше ми зауважили, що $Q(t)$ з дискретним часом отримана з $Q(t)$ з неперервним часом, то остання нерівність справедлива для $Q(t)$ з дискретним часом в усіх точках решітки $t \in (\overline{0, \infty})$.

Таким чином, у подальших дослідженнях будемо обмежуватися тригонометричним поліномом, що належить до класу майжеперіодичних і обмежених функцій.

Якщо $Q(t)$ - періодична функція, період якої або задається, або визначається по наявній функції, то тоді вираз (2.9) представляє собою відрізок ряду Фур'є. Тому по заданій $Q(t)$ легко будується представлення цієї функції у вигляді тригонометричного полінома порядку n . Множина періодичних функцій $Q(t)$, періоди яких зв'язані раціональними відношеннями, теж замкнуті щодо операцій додавання, множення, інтегрування, диференціювання, згортки.

Зупинимося коротко на деяких характеристиках полігармонічного затухаючого сигналу. Так, взаємне кореляційне перетворення двох полігармонічних затухаючих сигналів

$$\begin{aligned}
Q_1(t) &= \sum_{m=1}^n A_m^{(1)} e^{-\alpha_m^{(1)} t} \sin(\omega_m^{(1)} t + \theta_m^{(1)}), \\
Q_2(t) &= \sum_{m=1}^n A_m^{(2)} e^{-\alpha_m^{(2)} t} \sin(\omega_m^{(2)} t + \theta_m^{(2)}), t \in [0, T]
\end{aligned} \tag{2.13}$$

існує зважаючи на виконання умови (2.8) і визначається таким чином:

$$\begin{aligned}
\bar{R}_{12}(\tau) &= \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n A_i^{(1)} A_m^{(2)} e^{-\alpha_m^{(2)} \tau} \cdot \left\{ \frac{a_{im}(\alpha_i^{(1)} + \alpha_m^{(2)}) + b_{im}(\omega_i^{(1)} + \omega_m^{(2)})}{(\alpha_i^{(1)} + \alpha_m^{(2)})^2 + (\omega_i^{(1)} + \omega_m^{(2)})^2} + \frac{c_{im}(\alpha_i^{(1)} + \alpha_m^{(2)}) + d_{im}(\omega_i^{(1)} - \omega_m^{(2)})}{(\alpha_i^{(1)} + \alpha_m^{(2)})^2 + (\omega_i^{(1)} - \omega_m^{(2)})^2} \right\} + \\
&\quad + \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^n A_i^{(1)} A_m^{(2)} e^{-\alpha_m^{(2)} \tau} e^{-(\alpha_i^{(1)} + \alpha_m^{(2)}) T} \cdot \left\{ \frac{1}{(\alpha_i^{(1)} + \alpha_m^{(2)})^2 + (\omega_i^{(1)} + \omega_m^{(2)})^2} \cdot \right. \\
&\quad \cdot [(a_{im}(\omega_i^{(1)} + \omega_m^{(2)}) - b_{im}(\alpha_i^{(1)} + \alpha_m^{(2)})) \sin(\omega_i^{(1)} + \omega_m^{(2)}) T - (a_{im}(\alpha_i^{(1)} + \alpha_m^{(2)}) + b_{im}(\omega_i^{(1)} + \omega_m^{(2)})) \cos(\omega_i^{(1)} + \omega_m^{(2)}) T] + \\
&\quad \left. + \frac{1}{(\alpha_i^{(1)} + \alpha_m^{(2)})^2 + (\omega_i^{(1)} - \omega_m^{(2)})^2} \cdot \right. \\
&\quad \cdot [(c_{im}(\omega_i^{(1)} - \omega_m^{(2)}) - d_{im}(\alpha_i^{(1)} + \alpha_m^{(2)})) \sin(\omega_i^{(1)} - \omega_m^{(2)}) T - (c_{im}(\alpha_i^{(1)} + \alpha_m^{(2)}) + d_{im}(\omega_i^{(1)} + \omega_m^{(2)})) \cos(\omega_i^{(1)} - \omega_m^{(2)}) T] \Big\},
\end{aligned} \tag{2.14}$$

де

$$\begin{aligned}
a_{im} &= -\frac{1}{2} \cos(\omega_m^{(2)} \tau + \theta_i^{(1)} + \theta_m^{(2)}), \quad b_{im} = \frac{1}{2} \sin(\omega_m^{(2)} \tau + \theta_i^{(1)} + \theta_m^{(2)}), \\
c_{im} &= \frac{1}{2} \cos(\omega_m^{(2)} \tau - \theta_i^{(1)} + \theta_m^{(2)}), \quad d_{im} = \frac{1}{2} \sin(\omega_m^{(2)} \tau - \theta_i^{(1)} + \theta_m^{(2)})
\end{aligned}$$

У випадку коли на вхід кореляційної системи надходить затухаючі моногармонічні сигнали, то вираз (2.14) буде мати вигляд

$$\begin{aligned}
\bar{R}_{12}(\tau) &= \frac{A_1 A_2}{T} e^{-\alpha_2 \tau} \cdot \left\{ \frac{a(\alpha_1 + \alpha_2) + b_{im}(\omega_1 + \omega_2)}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_1 + \omega_2)^2} + \frac{c_{im}(\alpha_1 + \alpha_2) + d_{im}(\omega_1 - \omega_2)}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2} \right\} + \\
&\quad + \frac{A_1 A_2}{T} e^{-\alpha_2 \tau} e^{-(\alpha_1 + \alpha_2) T} \cdot \left\{ \frac{1}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_1 + \omega_2)^2} \cdot \right. \\
&\quad \cdot [(a_{im}(\omega_1 + \omega_2) - b_{im}(\alpha_1 + \alpha_2)) \sin(\omega_1 + \omega_2) T - (a_{im}(\alpha_1 + \alpha_2) + b_{im}(\omega_1 + \omega_2)) \cos(\omega_1 + \omega_2) T] + \\
&\quad \left. + \frac{1}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2} \cdot \right. \\
&\quad \cdot [(c_{im}(\omega_1 - \omega_2) - d_{im}(\alpha_1 + \alpha_2)) \sin(\omega_1 - \omega_2) T - (c_{im}(\alpha_1 + \alpha_2) + d_{im}(\omega_1 + \omega_2)) \cos(\omega_1 - \omega_2) T] \Big\},
\end{aligned} \tag{2.15}$$

$$\text{де } a = -\frac{1}{2} \cos(\omega_2 \tau + \theta_1 + \theta_2), \quad b = \frac{1}{2} \sin(\omega_2 \tau + \theta_1 + \theta_2), \quad c = \frac{1}{2} \cos(\omega_2 \tau - \theta_1 + \theta_2),$$

$$d = \frac{1}{2} \sin(\omega_2 \tau - \theta_1 + \theta_2)$$

Описані вище затухаючі полігармонічні затухаючі хвилі, що штучно створюються за допомогою вібраторів, використовуються для геофізичних досліджень. У точці прийому вони є корисними відбитими і заломленими поздовжніми і поперечними хвилями [112, 113]. Всі інші хвилі, що заважають виділенню, обробці корисних хвиль і вимірюванню їх параметрів, відносяться до розряду завад. Найчастіше це розсіяні хвилі з випадковим характером зміни, що утворюються на дрібних включеннях в середовищі і не мають яскраво вираженого протяжного фронту, мікросейсмічні коливання промислового походження, а також викликані різними природними джерелами (дощем, вітром і ін.) (більш детально розглянуті в 1 розділі).

2.3. Лінійний випадковий процес, як конструктивна модель сейсмічних завад

Найчастіше, особливо при дослідженні спектральних характеристик хвиль, до категорії корисних сигналів відносять детерміновані полігармонічні процеси, опис моделей яких приведений вище, а до категорії завад - випадкові сигнали, моделі яких на сьогоднішній день в геофізиці, в порівнянні з іншими науками, розроблені ще не достатньо глибоко.

Для проведення не тільки якісних, але і кількісних досліджень, необхідно побудувати математичну модель випадкових завад, яка б дозволила ефективно знаходити теоретичні оцінки точності вимірювань. Такі моделі повинні бути достатньо простими і зручними при їх практичному використанні, щоб уникнути при цьому громіздких математичних обчислень.

Сейсмічні завади багато авторів [6, 11, 59, 73, 80, 111] вважають або білими, забарвленими або близькими до низькочастотних RC-, RLC- шумами, .

Розглядатимемо як початкові моделі сейсмічних процесів випадкові функції з неперервним часом, а також пов'язані з ними послідовності відліків - часові ряди або випадкові процеси з дискретним часом. Модель випадкового процесу з неперервним часом ближче до фізики реальних сейсмічних завад, спостережуваних в природі в реальному масштабі часу і зареєстрованих у вигляді електричних сигналів на виході різних сейсмодатчиків. Проте при використанні цифрової обробки сейсмограм доводиться мати справу не з електричними сигналами, що неперервно змінюються в часі, а з масивами чисел, отриманих шляхом дискретизації по часу і квантуванням по рівню реальних сейсмічних сигналів і завад, Тому при виборі моделі утворення сейсмічних завад, що присутні в реєстрованому сейсмічному сигналі і обумовлюють його випадковість, вважатимемо, що час змінюється неперервно, а при побудові моделей обробки, пов'язаних з цим аналоговим сигналом, використовуватимемо дискретний час.

Отже, припустимо, що в точку прийому у будь-який момент часу t , довільно вибраний з деякого інтервалу спостережень $[0, T]$, поступає шумовий сигнал. Його можна розглядати як результат накладання великого числа випадкових елементарних компонент, які мають енергією, що розповсюджується від різних випадкових джерел. Ці джерела знаходяться на різних відстанях від місця реєстрації, і сигнали від них приходять в точку прийому різними шляхами. Формально такий сигнал можна записати у вигляді (2.2) і припустити, що всі $x_k(\theta_k, t)$ - випадкові складові процесу $x(t)$, а θ_k - вектор не випадкових параметрів, залежних як від властивостей сейсмічного середовища, його будови, так і від характеристик сейсмоприймачів, трактів попередньої обробки і реєстрації.

Такий підхід вельми розповсюджений в сейсморозвідці [31, 32, 86]. Більшість дослідників записують в загальному вигляді складові $x_k(\theta_k, t)$ як функції, залежні від вектора параметрів θ_k , компоненти якого характеризують потужність, моменти виникнення, загасання, частоту і інші фізичні параметри елементарного імпульсу. При кожному кінцевому n процес (2.2) не може розглядатися як модель, оскільки в ньому окремі випадкові компоненти і детерміновані значення вхідних параметрів не

можуть бути однозначно визначені по заданому процесу $x(t)$, тобто в цьому випадку представлення (2.2) має описовий характер і може розглядатися як граничний вираз при формуванні статистичної моделі сейсмічних завад. При цьому результуюча модель залежить від того, яким чином буде здійснений граничний перехід у формулі (2.2), коли n прямує до нескінченності. При граничному переході значення кожного з параметрів, що входять в якості компонент у вектор θ_k , будуть нівелюватись і в остаточну модель частина з них може не ввійти, зігравши певну роль тільки на попередньому якісному рівні міркувань.

Проте для вирішення багатьох завдань сейсмометрії необхідні моделі як з якісними, так і з кількісними характеристиками, що мають геофізичну інтерпретацію. Крім того, клас таких моделей повинен бути замкнутий щодо лінійних операцій, оскільки для виділення корисних сигналів на фоні випадкових сейсмічних завад перш за все використовуються методи їх лінійної фільтрації. При цьому стараються здійснити таку фільтрацію оптимальним чином.

Отже, головним моментом при побудові лінійної моделі, що базується на виразі (2.2), є граничний перехід від суми випадкових елементарних імпульсів до результуючого випадкового процесу. Це питання вельми складне з математичної точки зору і вимагає залучення основних результатів, отриманих при вирішенні так званої граничної проблеми [75]. Опис даного граничного переходу стосовно завдань сейсмометрії розглянуто в [80].

Нехай доданки у виразі (2.2) із зростанням n не залишаються постійними, а змінюються в ймовірнісному сенсі таким чином, що по енергетичному внеску стають рівномірно нескінченно малими, коли їх кількість нескінченно зростає. Позначимо граничний випадковий процес через $\xi(t)$ і допустимо, що у будь-який момент часу $t \in [0, T]$ в точку реєстрації поступає процес, представлений через часткові суми у вигляді

$$\xi_n(t) = \sum_{k=1}^n \eta_{nk}(t), t \in [0, T] \quad (2.16)$$

де $\{\eta_{nk}(t), k \in \overline{[1, n]}\}$ - стохастично незалежні елементи, або серії, залежні від параметрів θ_{nk} , які заради спрощення запису опущені. Умова стохастичної незалежності не є принциповою і потрібна для простоти викладу.

Тоді сумарний процес можна розглядати як границю по ймовірності послідовності сум серій

$$\xi(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \xi_n(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \eta_{nk}(t), t \in [0, T] \quad (2.17)$$

якщо вона існує. Від звичайної границі часткових сум деякого ряду границя (2.17) відрізняється тим, що із зростанням n всі доданки, що входять в цю суму, в загальному випадку не залишаються незмінними. Зокрема, дана границя включає і випадок збіжності послідовності часткових сум деякого ряду.

З фізичної точки зору існування границі процесу означає, що, хоча у будь-який момент часу процес $\xi(t)$ допускає багатоваріантність представлення, проте границя всіх розкладів - єдина у вказаному ймовірнісному розумінні не залежить від способу, за допомогою якого проводиться поділ процесу при кожному n на окремі енергетичні компоненти η_{nk} .

Відповідь на питання про існування границі (2.17) міститься у вирішенні центральної граничної проблеми [75], відповідно до якої можна стверджувати, що якщо границя (2.17) існує, то процес $\xi(t)$ володіє принаймні одномірним безмежно подільним законом розподілу.

Випадкова величина ξ і відповідна їй характеристична функція $f(u)$ називаються безмежно подільними, якщо при кожному цілому позитивному n можна підібрати такі незалежні і однаково розподілені випадкові величини $\rho_k, k \in \overline{[1, n]}$, що

$$\xi = \sum_{k=1}^n \rho_k, \text{ або } f(u) = [f_n(u)]^n.$$

Це визначення очевидним чином узагальнюється і на багатовимірний випадок.

Оскільки навіть загальне обговорення центральної граничної проблеми [75] виходить за рамки тематики даної роботи, а при його проведенні потрібно було б застосовувати складний математичний апарат теорії граничних теорем, то обмежимося лише формулюванням необхідної умови для існування границі у виразі (2.17), який має певний фізичний сенс. Воно називається умовою рівномірної нескінченної малості елементів послідовності серії і полягає в наступному:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \max_k P\{\rho_{nk}(t) \geq \varepsilon\} = 0 \quad (2.18)$$

при кожному $\varepsilon > 0$ і $t \in [0, T]$. Цю умову іноді називають умовою граничного, або асимптотичного, ігнорування.

В термінах характеристичних функцій для елементів $f_{nk}(u, t)$ дана умова зводиться до вимоги

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \max_k |f_{nk}(u, t) - 1| = 0, \quad t \in [0, T]$$

рівномірно відносно u в будь-якому кінцевому інтервалі з $(-\infty, \infty)$.

Умова рівномірної нескінченної меншості означає, що при збільшенні n в послідовних сумах (2.16) рівномірно по k доданки $\rho_{nk}(t)$ по ймовірності прямують до 0. Іншими словами, при $n \rightarrow \infty$ роль кожного доданку в сумі (2.17) стає малою. Крім того, умова (2.18) виключає випадок кінцевих сум у виразі (2.17) і випадок сумування з завідомо нерівноправними доданками.

Для практичних цілей істотну роль відіграє наступний результат [75]. Множина функцій розподілу граничних для послідовності розподілів сум (2.16) незалежних випадкових величин, що задовольняють умові (2.18), співпадає з множиною безмежно подільних функцій розподілу. Крім того, можна показати, що будь-якій безмежно подільній функції розподілу можна поставити у відповідність деякий лінійний випадковий процес.

Ці факти дозволяють перейти від вивчення складних дограничних "моделей" вигляду (2.16) з скінченним n і довільними часто невідомими законами розподілу окремих доданків $\rho_{nk}(t)$ до вивчення граничного процесу (2.17), що має безмежно подільний закон розподілу, незалежно від того, як були розподілені "рівномірно малі" доданки $\rho_{nk}(t)$. Загальна канонічна формула такого розподілу отримана в трьох різновидах Колмогоровим, Леві і Хінчиним. Ми користуватимемося тільки формулою Колмогорова [30].

Відомо, що в геофізиці випадкові процеси часто приблизно описують гаусовим розподілом, який є окремим випадком безмежно подільного розподілу. Проте імпульсні завади погано апроксимуються гаусовим розподілом, наприклад коли імпульси є пуасонівським потоком. Але пуасонівський розподіл також безмежно подільний і вписується в прийняту нами модель лінійних випадкових процесів.

Отже, надалі при описі сейсмічних і інших завад виходитимемо з виразу (2.17). Цей вираз, як і (2.16), через прийняту нами концепцію, не описує модель, але, використовуючи його, таку модель можна побудувати. Можливі різні шляхи побудови, що приводять до одного результату, але з різним фізичним трактуванням параметрів отримуваної моделі.

Припустимо, що кожен доданок суми (2.16) представимо у вигляді

$$\rho_{nk}(t) = \varphi_{nk}(0, t) \zeta_{nk}(0, t), \quad t \in [0, T]$$

де $\varphi_{nk}(0, t)$ - не випадкова, а $\zeta_{nk}(0, t)$ - випадкова функція часу, залежна не тільки від "справжнього" моменту часу t , але і від всіх попередніх t моментів часу, тобто від часового інтервалу $[0, t)$. Тоді одним з варіантів граничного процесу (2.18), якщо $[0, T]$ - дискретна множина, може бути наступний:

$$\xi(t) = \sum_{\tau \in [0, T]} \varphi(\tau, t) \zeta(\tau), \quad (2.19)$$

а у разі неперервного часу –

$$\xi(t) = \int_0^T \varphi(\tau, t) \zeta(\tau) d\tau, \quad (2.20)$$

Ці представлення можна розглядати як процес формування $\xi(t)$ з процесу з незалежними значеннями $\zeta(t)$ за допомогою формуючого, в загальному випадку нечасоінваріантного, фільтру з імпульсною характеристикою $\varphi(\tau, t)$. Процес $\xi(t)$ допускає представлення (2.19) або (2.20), надалі називатимемо лінійним з безмежно подільним законом розподілу, процес $\zeta(t)$ - породжуючим (білим шумом), а $\varphi(\tau, t)$ - ядром представлення, або імпульсна характеристика формуючого фільтра.

Назва самого процесу $\xi(t)$ утворюється з назви формуючого фільтру, наприклад: RC-шум, якщо $\varphi(\tau, t)$ описує ланку першого порядку типу радіотехнічної ланки RC; RLC-шум, якщо $\varphi(\tau, t)$ - характеристика резонансної ланки другого порядку типу RLC контура і так далі.

Відзначимо, що будь-який гільбертів детермінований процес можна розглядати як окремий випадок лінійних процесів, оскільки вироджений закон розподілу безмежно подільний. Отже, немає підстав для порівняння детермінованого і статистичного підходів до аналізу сейсмічних сигналів і завад. Статистичний підхід включає і детермінований як окремий випадок, проте при його використанні доводиться застосовувати складніший математичний апарат. Тому при вказаному підході вся увага зосереджується на стохастичному аналізі як складнішому і трудомісткому, а питання детермінованого аналізу відсовується на другий план.

Отже, в основу побудови моделей випадкових завад покладемо відомий в статистичній радіотехніці метод формуючих фільтрів в дискретному варіанті [104]. Як породжуючий процес приймаємо білий шум в строгому сенсі з дискретним часом, тобто процес з незалежними значеннями:

$$\{\zeta(t), t \in (0, \infty)\}, \quad (2.21)$$

де всі $\zeta(t)$ статистично незалежні в сукупності. Закон розподілу даного процесу, взагалі кажучи, може бути довільним, проте якщо цей процес отриманий дискретизацією стохастично безперервного випадкового процесу приростів, то він належить до класу безмежно подільних. Таким чином, породжуючий процес повністю задається послідовністю одновимірних функцій розподілу $F_t(x), t \in (-\infty, \infty)$.

Якщо всі $F_t(x)$ не залежать від t , то породжуючий процес, є стаціонарним в строгому сенсі.

Проте при вирішенні ряду практичних завдань умова незалежності значень $\zeta(t)$ можна ослабити і вимагати лише некорельованості. В такому разі використовуватиметься термін "білий шум в широкому сенсі" з дискретним часом. При цьому обов'язково вважати що виконується умова $D\zeta(t) < \infty$ - обмеження дисперсії (потужності), що на практиці майже завжди виконується. Процеси з скінченною потужністю надалі називатимемо гільбертовими.

Решту всіх моделей завод будуватимемо шляхом лінійної фільтрації процесу (2.21), тобто вважатимемо їх результатом операції дискретної згортки процесу (2.21) з імпульсними характеристиками стаціонарного формуючого фільтру, які позначимо через $\varphi(t), t \in (-\infty, \infty)$. На функцію $\varphi(t)$, за винятком забарвленого шуму, накладаємо наступні умови:

$$\varphi(t) \equiv 0, t \in (-\infty, 0) \text{ і } \sum_{t=0}^{\infty} \varphi^2(t) < \infty$$

першу з яких зазвичай називають умовою фізичної реалізованості фільтрів.

Отриманий в результаті згортки процес

$$\xi(t) = \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi(\tau) \zeta(t - \tau), t \in (0, \infty) \quad (2.22)$$

назвемо лінійним випадковим процесом з дискретним часом. Процес (2.22) є стаціонарним в строгому сенсі, якщо процес (2.21) стаціонарний. Неважко бачити, що математичне сподівання процесу $\xi(t)$ визначається згідно виразу

$$M\xi(t) = \kappa_1 \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi(\tau), \quad (2.23)$$

де $\kappa_1 = M\zeta(t)$.

Кореляційна функція процесу (2.22) визначається так:

$$R(s) = \kappa_2 \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi(\tau)\varphi(\tau + s)$$

де $\kappa_2 = D\zeta(t)$. Зокрема, якщо формуючий фільтр фізично реалізований, то формула (2.23) приймає вигляд

$$M\xi(t) = \kappa_1 \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi(\tau)$$

вираз для кореляційної функції –

$$R(s) = \kappa_2 \sum_{t=\max(0,-s)}^{\infty} \varphi(t)\varphi(t + s).$$

Кореляційна функція володіє властивістю $R(s) = R(|s|)$, тому останній вираз запишемо так:

$$R(s) = R(|s|) = \kappa_2 \sum_{t=\max(0,-s)}^{\infty} \varphi(t)\varphi(t + |s|)$$

або остаточно

$$R(s) = \kappa_2 \sum_{t=0}^{\infty} \varphi(t) \varphi(t + |s|), \quad s \in (0, \infty). \quad (2.24)$$

Якщо процес (2.21) стаціонарний і

$$f_{\zeta}(u) = M e^{ju\zeta(t)}$$

його одновимірною характеристичною функцією, то характеристичною функцією процесу (2.22) має властивість

$$f_{\xi}(u) = \prod_{\tau=0}^{\infty} f_{\zeta}[u\varphi(\tau)].$$

Щодо опису шумових процесів за допомогою моделі дискретного лінійного випадкового процесу з безмежно подільним законом розподілу окрім приведеного вище обґрунтування моделі сейсмічних завад можна сказати наступне.

По-перше, така модель достатньо повно досліджена, і над лінійним процесом порівняно просто виконуються лінійні операції, які, по суті, зводяться до операцій над ядром $\varphi(t)$ виразу (2.22).

По-друге, для такого процесу відома канонічна форма характеристичної функції $f_{\xi}(u)$, логарифм якої з урахуванням виразу (2.22) у формі Колмогорова має вигляд

$$\ln f_{\xi}(u) = jmu \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi(\tau) + \sum_{\tau=0}^{\infty} \int_0^{\infty} [e^{jux\varphi(\tau)} - 1 - jux\varphi(\tau)] \frac{dk(x)}{x^2}, \quad \tau \in (-\infty, \infty). \quad (2.25)$$

Тут m - математичне сподівання процесу (2.21), яке, як відомо, по заданій характеристичній функції $f_{\zeta}(u)$ процесу (2.21) можна визначити шляхом диференціювання її логарифма в нулі:

$$m = -j \left. \frac{d}{du} \ln f_{\zeta}(u) \right|_{u=0},$$

$K(x)$ - неспадна дійсна обмежена функція; по відомій характеристичній функції вона визначається із співвідношення

$$K(x) = \frac{1}{2\pi} \lim_{y \rightarrow \infty} \int_0^{\infty} \frac{e^{-juy} - e^{jux}}{ju} \frac{d^2 \ln f_{\zeta}(u)}{du^2} du$$

Наприклад, для виродженого розподілу характеристична функція $f(u) = e^{-jmu}$ і $K(x) \equiv 0$. Для гаусового розподілу

$$f(u) = \exp\left(jmu - \frac{u\sigma^2}{2}\right), \quad (2.26)$$

$$K(x) = \sigma^2 U(x), \quad x \in (-\infty, \infty).$$

Для пуассонівського розподілу

$$f(u) = \exp\left(jmu + \lambda(e^{jub} - 1)\right), \quad (2.27)$$

$$K(x) = \lambda U(x - b), \quad d > 0.$$

Для гамма-розподілу

$$f(u) = (1 - ju\beta)^{-\alpha}, \quad (2.28)$$

$$K(x) = \alpha\beta[\beta - (\beta + x)e^{-x/\beta}]U(x),$$

де $U(x)$ - функція Хевісайда (2.4).

По-третє, будь-який негауссовий лінійний процес можна розглядати як результат лінійного накладання великого числа окремих імпульсів, що мають певну (у загальному випадку змінну з часом) форму і що виникають у випадкові пуасонівські моменти часу, тобто як пуасонівський потік імпульсів. Гаусів процес завжди лінійний. Будь-який детермінований процес теж можна розглядати як лінійний з виродженим розподілом.

Саме таке трактування і дозволяє описати в точці прийому результуючу випадкову компоненту сейсмічної хвилі, отриману унаслідок багатократних внутрішніх віддзеркалень від неоднорідних границь досліджуваного середовища. При цьому форма імпульсу описується ядром лінійного процесу, а моменти їх появи і інтенсивності - дискретним білим шумом $\zeta(t)$.

Дамо коротку інтерпретацію і шляхи практичного використання моделі (2.22). Перш за все відзначимо, що вираз (2.25) - може бути узагальнений на багатовимірний випадок, тобто аналогічно можна отримати багатовимірну характеристичну функцію розподілу для вектора і векторного поля. Характеристична функція (2.25) дозволяє отримувати семіінваріанти, як одномірні, так і змішані. Крім того, при практичному використанні моделі (2.22) може виникнути задача обчислення ймовірності попадання цього процесу в заданий інтервал або знаходження функції правдоподібності, потрібної для виділення корисного сигналу на фоні завад при статистичному виявленні. Іншими словами, може виникнути задача знаходження відповідного процесу (2.22) одновимірної або багатовимірної функції розподілу.

Як моделі сейсмічних завад вибрано три види лінійних випадкових процесів (забарвлений шум, RC-шум і RLC-шум).

2.4. Висновки до розділу 2

1. Обґрунтовані етапи створення математичної моделі сейсмограми. Проведений аналіз особливостей формування сейсмограми дав можливість

представити модель сейсмограми у вигляді адитивної моделі, яка відповідає структурі реальної сейсмограми.

2. На основі аналізу фізичних особливостей формування сейсмічних сигналів побудовано модель корисних сейсмічних сигналів, які переставлено у вигляді полігармонічного згасаючого сигналу.

3. Побудовано модель сейсмічних завад, яку представлено у вигляді лінійного випадкового процесу з дискретним часом. В якості моделей сейсмічних завад вибрано три види лінійних випадкових процесів а саме забарвлений шум, RC-шум і RLC-шум.

РОЗДІЛ 3

КОРЕЛЯЦІЙНІ СИСТЕМИ З ВХІДНИМИ ОРТОГОНАЛЬНИМИ ФІЛЬТРАМИ В ЗАДАЧАХ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СЕЙСМІЧНИХ СИГНАЛІВ

В розділі розглянуто питання моделювання і дослідження сейсмічних завад, розглянуто структури кореляційних систем (типової і кореляційної системи з попередньою ортогональною фільтрацією), наводяться результати роботи таких систем при дії корисного сигналу і завад. Основні результати третього розділу опубліковано в роботах [41, 42, 45, 53, 46, 50].

3.1. Основні методи обробки сейсмічних сигналів

3.1.1. Кореляційні методи обробки

Лампард запропонував визначати кореляційну функцію стаціонарного випадкового процесу в виді суми членів розкладу її в ряд по ортогональних функціях. Дане твердження впливає із теореми Мерсера [82], згідно якої дійсна і визначена на додатній півосі функція, якою і є функція кореляції, може бути розкладена в рівномірний і абсолютно збіжний ряд по ортонормованих функціях.

Як відмічається в роботах [14, 85] даний метод розкладу кореляційної функції в ряд став одним із поширених методів її визначення.

Вперше практичну схему пристрою для розкладу кореляційної функції в ряд поліномам Лагера описав Лампард [2]. Схема дозволяла представляти кореляційну функцію в вигляді суми 10-ти членів її розподілу. Перевагою даної схеми являється відсутність часової затримки, що є необхідним при визначенні кореляційної функції звичайними методами [85]. До недоліків варто віднести деяку складність і громісткість схеми. Основним елементом описаного пристрою являється ортогональний фільтр.

Ортогональним фільтром називається лінійна система, імпульсні перехідні функції ланок якої можна представити системою ортогональних функцій [72]. Так

як зазвичай розглядають фізично реалізовані фільтри, то імпульсні перехідні функції їх ланок утворюють скінченні системи ортогональних функцій на півосі $t \in [0, \infty)$. В окремому випадку ортогональний фільтр може складатися з однієї ланки, імпульсна перехідна функція якої описується функцією з деякої системи ортогональних функцій.

Багато уваги було відведено загальним принципам побудови і налаштування ортогональних фільтрів [72, 81].

Ортогональні фільтри нашли застосування в якості корегуючих ланок систем автоматичного регулювання, основних елементів спектроаналізаторів випадкових процесів [95], а також для дискретизації багатовимірних сигналів і багатоканального ущільнення ліній зв'язку. Системи зв'язку, які використовують в якості носія електричні сигнали, описані ортогональними функціями (поліномами), допускають модуляцію по амплітуді і по порядку функції і один вид лінійної селекції – селекція по порядку функції (поліному). Слід запам'ятати, що вказані системи зв'язку будуть обов'язково імпульсного характеру.

Потрібно відмітити, що практично всі ортогональні системи функцій, які використовуються в функціональному аналізі, застосовуються для аналізу сигналів і систем в технічних застосуваннях.

3.1.2. Розклад сейсмічних сигналів в ортогональні ряди

Теорія ортогональних функцій, є частиною загальної теорії функцій, що широко застосовується в найрізноманітніших сферах науки і техніки. Ортогональні системи функцій відіграють велику роль в застосуваннях, головним чином в зв'язку з можливістю розкладу певного класу функцій в ряди по ортогональних функціях.

Важливий клас ортогональних функцій складають ортогональні поліноми. Найчастіше зустрічаються в застосуваннях поліноми Лежандра, Ерміта, Лагера, Якобі та ін. Ортогональні поліноми володіють рядом спільних якостей: наприклад, вони є інтегралами диференційних рівнянь простого виду, можуть бути визначені як

коефіцієнти розкладу по степеню аргументу деякої відповідно вибраної функції, яка називається похідною функцією та ін.

Нехай $\mu(x)$ - додатна, обмежена, монотонно-зростаюча на інтервалі ортогональності (a,b) функція, похідна якої $\mu'(x) = 0$ дорівнює нулю тільки на нуль-множині (в понятті Лебега).

Інтервал (a,b) , на якому розглядаються ортогональні функції, називається інтервалом ортогональності і в свою чергу може бути будь-яким (замкнутим, відкритим, відкритим тільки справа або відповідно тільки зліва, безкінечним).

Дійсна функція $f(x)$ називається L_μ - інтегрованою, якщо вона μ - вимірна і

$$\int_a^b |f(x)| d\mu(x) < \infty.$$

Якщо $\mu(x)$ абсолютно неперервна і $\rho(x) = \mu'(x)$, то для L_μ - функції, що інтегрується $f(x)$ справедливою є рівність

$$\int_a^b (f(x)) d\mu(x) = \int_a^b f(x) \rho(x) dx.$$

В цьому випадку $f(x) \in L_\rho$ - інтегрована, а $\rho(x)$ називається ваговою функцією або функцією розподілу.

Функція $f(x)$ називається L_μ^2 - або L_ρ^2 - інтегрованою, якщо вона L_μ - або L_ρ - інтегрована і задовольняє умові

$$\int_a^b f^2(x) d\mu(x) < \infty \text{ або } \int_a^b f^2(x) \rho(x) dx < \infty$$

відповідно.

Скінченна або зліченна нескінченна система $\{\varphi_n(x), n=0,1,2,\dots\}$ на L_μ^2 - інтегрованих функцій, називається ортогональною по мірі $\mu(x)$, якщо

$$\int_a^b \varphi_m(x)\varphi_n(x)d\mu(x) = 0, \quad (m \neq n),$$

причому жодна з функцій $\varphi_n(x)$ не є тотожно рівна нулю.

Якщо існує $\rho(x) = \mu'(x)$, то останній вираз приймає наступний вигляд

$$\int_a^b \varphi_m(x)\varphi_n(x)\rho(x)dx = 0, \quad (m \neq n). \quad (3.1)$$

Система $\{\varphi_n(x), n=0,1,2,\dots\}$ називається ортонормованою, якщо крім умови ортогональності (3.1) справедливі співвідношення

$$\int_a^b \varphi_n^2(x)\rho(x)dx = 1,$$

для всіх n . Ортогональну систему $\{\varphi_n(x), n=0,1,\dots\}$ можна перетворити в ортонормовану з допомогою множення її елементів на постійні множники, виражені відповідним чином.

Поняття ортогональності в функціональному просторі має простий наглядний аналог в векторному просторі Евкліда: умова (3.1) означає, що скалярний вираз (φ_m, φ_n) двох різних елементів у функціональному просторі із системи $\{\varphi_n(x), n=0,1,\dots\}$ дорівнює нулю. Якщо $\{\varphi_n(x), n=0,1,\dots\}$ - ортонормована система, то аналогами її елементів в векторному просторі є ортогональні одиничні вектори.

Нехай ортогональна система функцій є лінійно незалежною. З довільної лінійно незалежної системи функцій можна побудувати ортонормовану систему. Один із загальних способів ортогоналізації запропонований Шмідтом. Необхідною і достатньою умовою лінійної незалежності системи функцій являється рівність визначника Грама додатному числу [100].

Ряд $\sum c_n \varphi_n(x)$ утворений формально із функцій ортогональної системи $\{\varphi_n(x), n = 0, 1, \dots\}$ і з дійсних чисел c_0, c_1, \dots називається ортогональним. Якщо коефіцієнти c_n визначаються відповідно до виразу

$$c_n = \frac{1}{\int_a^b \varphi_n^2(x) \rho(x) dx} \int_a^b f(x) \varphi_n(x) \rho(x) dx,$$

то ряд $\sum c_n \varphi_n(x)$ називається ортогональним розкладом функції $f(x)$ і це співвідношення позначається так:

$$f(x) \sim \sum_{n=0}^{\infty} c_n \varphi_n(x).$$

Числа c_0, c_1, \dots називаються коефіцієнтами розкладу функції $f(x)$ в ряд по ортогональній системі функцій $\{\varphi_n(x), n = 0, 1, \dots\}$. Важлива властивість коефіцієнтів розкладу L^2_ρ – інтегрованої функції виражається нерівністю Бесселя:

$$\sum_{n=0}^{\infty} c_n^2 \leq \int_a^b f^2(x) \rho(x) dx.$$

З нерівності Бесселя слідує, що коефіцієнти розкладу будь-якої L^2_ρ – інтегрованої функції прямує до нуля при $n \rightarrow \infty$.

Іншими словами, якщо під функцією $f(x)$ мати на увазі який-небудь реальний сигнал, то сума квадратів коефіцієнтів розкладу його в ряд не перевищує енергії сигналу.

Відмітимо характерні особливості систем ортогональних функцій Лагера, які використовуються в технічних застосуваннях.

Класичним прикладом ортогональної системи функцій на нескінченному інтервалі являється система поліномів Лагера $\{L_n^\alpha(x), n = 0, 1, \dots\}$, яка ортогональна на інтервалі $[0, \infty)$ з ваговою функцією $x^\alpha \exp(-x)$. Загальний вираз для полінома n -го порядку має наступний вигляд [99]

$$L_n^\alpha(x) = \sum_{k=0}^n \frac{\Gamma(n + \alpha + 1)(-x)^k}{\Gamma(k + \alpha + 1)k!(n - k)!} \quad \text{при } x > 0, n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.2)$$

До числа важливих властивостей поліномів Лагера відноситься можливість представлення довільної функції $f(x)$, що визначена на інтервалі $[0, \infty)$ і задовольняє деяким умовам, рядом типу

$$f(x) \sim \sum_{n=0}^{\infty} c_n L_n^\alpha(x), \quad 0 \leq x < \infty,$$

де

$$c_n = \frac{n!}{\Gamma(n + \alpha + 1)} \int_0^{\infty} f(x) e^{-x} x^\alpha L_n^\alpha(x) dx.$$

В технічних застосуваннях використовується система поліномів Лагера $\{L_n(x), n = 0, 1, 2, \dots\}$ при значенні $\alpha = 0$ тобто загальний вираз для полінома n -го порядку з врахуванням (3.2) рівний

$$L_n(x) = \sum_{k=0}^n \frac{\Gamma(n+1)(-x)^k}{\Gamma(k+1)k!(n-k)!} \quad \text{при } x > 0, n = 0, 1, 2, \dots, \quad (3.3)$$

Функції Лагера

$$Z_n(x) = \frac{e^{-x/2} L_n(x)}{n}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

утворюють ортонормовану систему на інтервалі $[0, \infty)$, яка в цьому інтервалі являється повною відносно метрики в L^2 .

Систему поліномів (функцій) Лагера доцільно використовувати при опису або апроксимації різних функцій, які задовольняють умовам фізичної реалізованості. Так при описанні фізично реалізованих фільтрів з ортогональними імпульсними перехідними функціями, найбільш часто зустрічаються функції Лагера.

Ортогональні функції використовуються як для представлення і опису різних аналізованих функцій, які в свою чергу визначають реально існуючі сигнали, так і для реалізації їх в виді електричних сигналів за допомогою електронної апаратури.

Для аналізу і представлення імпульсних і обмежених в часі сигналів, часто використовуються ортогональні системи поліномів Лагера. Так сукупність коефіцієнтів розкладу функції в ряд по поліномах Лагера називається її спектром Лагера. Спектри Лагера передавальних ланок функцій і вихідних сигналів використовуються при аналізі систем автоматичного керування.

3.2. Структури, характеристики сейсмічних кореляційних систем

Обробка геофізичної інформації є основним етапом аналізу експериментальних даних на всіх етапах використання геофізичних систем обробки сигналів [8, 80, 90]. Статистична обробка геофізичних сигналів застосовується як для математичного моделювання геологічних об'єктів і процесів, так і для обробки результатів вимірювань реальних геофізичних сигналів. Використання

швидкодіючих ЕОМ в складі геофізичних систем обумовлено поширенням цифрової обробки геофізичних сигналів, як одного з методів досліджень.

Серед багатьох методів обробки сигналів в сейморозвідці широко використовуються кореляційні методи. Результати таких досліджень опубліковані в наукових працях, в тому числі [34, 80, 106, 113]. Але в більшості робіт результати аналізу використання технічних сейсмічних систем не розглядаються з точки зору аналізу функціонування таких систем як вимірювальних. Розглянемо спочатку типову кореляційну вимірювальну систему.

3.2.1. Типова дискретна кореляційна система обробки сейсмічних сигналів.

Спрощена структурна схема такої кореляційної системи представлена на рисунку 3.1.

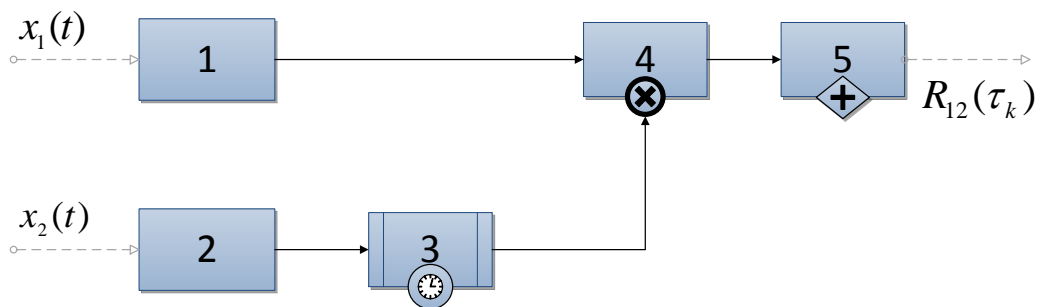


Рис. 3.1 - Спрощена структурна схема типової кореляційної вимірювальної системи. 1, 2 – аналогово-цифрові перетворювачі неперервних діючих сигналів, 3 - блок зсуву по часу сигналів з дискретним часом; 4 - блок множення сигналів з дискретним часом; 5 - блок сумування (інтегратор) добутків сигналів з дискретним часом.

Відомо, що кореляційні системи реалізують кореляційний оператор обробки сигналів. Кореляційний оператор $A[\cdot, \cdot]$, як основний оператор функціонування кореляційної системи заданий на просторі вхідних сигналів $\{x_i(t), i = \overline{1, 2, \dots}, t \in T\}$, які як правило належать простору сигналів з скінченною потужністю. Для неперервного часу дія кореляційного оператора задається у виді [85]

$$R_{12}(s) = \frac{1}{T} \int_0^T x_1(t)x_2(t+s)dt, \quad t, s \in T. \quad (3.4)$$

Оскільки в сейсмічних дослідженнях в основному розглядається цифрова обробка сейсмічних сигналів, то в даній роботі буде проведено дослідження дії кореляційного оператора для дискретних сигналів. Використання аналогово-цифрових перетворювачів в кореляційних системах дає можливість перетворити вхідні сейсмічні сигнали з неперервним часом в послідовності сигналів з дискретним часом, які задаються на рівномірній ґратці

$$\{t_j = j\Delta t, j = \overline{1, m}, t_j \in T\}, \quad (3.5)$$

де Δt - крок дискретизації сигналу по часу. Тобто маємо простір вхідних сигналів з дискретним часом

$$\{x_i(t_j) = x_i(j\Delta t), i = \overline{1, 2, \dots}, j = \overline{1, m}, t_j \in T\}. \quad (3.6)$$

Таким чином згідно (3.4) дія кореляційного оператора для дискретного часу визначається формулою

$$R_{12}(\tau_k) = \frac{1}{m-k} \sum_{j=1}^{m-k} x_1(j\Delta t)x_2((j+k)\Delta t), \quad k \in \overline{0, l}, \tau_k = k\Delta t. \quad (3.7)$$

Отриманий вираз визначає дію кореляційного оператора на заданому просторі вхідних сигналів з дискретним часом. У випадку, коли простір вхідних сигналів (3.6) є послідовністю центрованих реалізацій ергодичного випадкового процесу, вираз (3.7) для скінченного m визначає статистичну оцінку кореляційної функції процесу, а при $m \rightarrow \infty$ – саму кореляційну функцію процесу. Якщо простір вхідних сигналів є реалізацією інших випадкових процесів, то вираз (3.7) визначає відгук

кореляційного оператора і при цьому необхідно проводити додаткові дослідження такого відгуку, який характеризує відповідні статистичні зв'язки між двома сигналами, а саме між сигналами $x_1(j\Delta t)$ і $x_2(j\Delta t)$ при їх взаємному зсуві.

В даній роботі в першу чергу буде проведений аналіз кореляційних систем, як вимірювальних при дії тестових сигналів. Тестовими сигналами будуть моногармонічні і полігармонічні сигнали. Ряд публікацій, зокрема [80], пропонують використання кореляційних систем з вхідними ортогональними фільтрами для виявлення корисних сигналів при дії завад.

У подальшому будуть використовуватись математичні моделі сигналів, а також математичні моделі операторів функціональних модулів і ланок кореляційних систем.

3.2.2. Дискретні кореляційні сейсмічні системи з вхідними ортогональними фільтрами

Під кореляційною ортогональною системою будемо розуміти кореляційну вимірювальну систему з попередньою ортогональною фільтрацією досліджуваних сигналів. Структурна схема системи наведена на рис. 3.2.

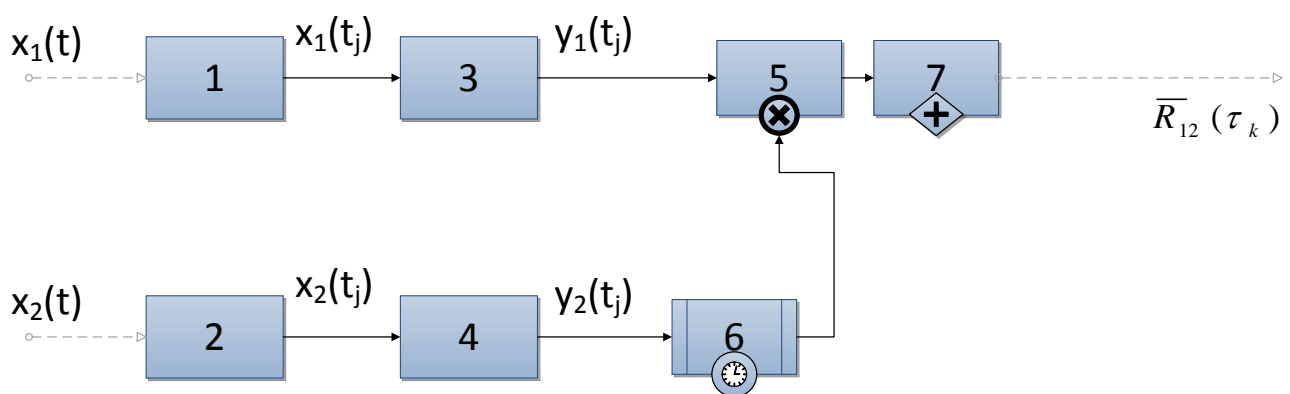


Рис. 3.2 Структурна схема кореляційної вимірювальної системи з ортогональними фільтрами Лагера. 1, 2 – аналогово-цифрові перетворювачі неперервних вхідних сигналів 3, 4 - ортогональні фільтри Лагера, 5 - блок перемножування, 6 - блок затримки, 7- блок сумування; 8- блок перетворення Фур'є.

Ця система відрізняється від попередньої тим, що вхідні сигнали спочатку фільтруються системою ортогональних фільтрів (рис. 3.2 блоки 3 і 4), а вже потім застосовується кореляційний оператор.

Позначимо імпульсні перехідні характеристики дискретних ортогональних фільтрів через $\varphi_1(t_i)$ і $\varphi_2(t_i)$. Імпульсні перехідні характеристики вибираються з класу ортогональних функцій дискретного аргументу, які, наприклад, описані в [80]. Ці системи ортогональних функцій в певній мірі пов'язані з класичними ортогональними поліномами дискретного аргументу (додаток Б).

3.3. Формування бази даних реалізацій сейсмічних сигналів

3.3.1. Моделювання сейсмічних завад

Широке коло задач статистичної обробки сигналів базується на використанні методів цифрової обробки. У багатьох випадках структура і характеристики сучасних інформаційних систем, в тому числі інформаційно-вимірювальних та діагностичних, обґрунтовується з використанням методів статистичного моделювання [66]. На сьогодні широко застосовується теорія лінійних процесів [12], яка дає можливість розв'язувати задачі комп'ютерного моделювання [80].

3.3.1.1. Моделювання базового дискретного білого шуму

Побудова моделі білого шуму

Процес з незалежними значеннями. Як відомо, випадковий процес

$$\{\zeta(t), t \in T\}, \quad (3.8)$$

де T – числова множина, в даній роботі нас буде цікавити лише випадок, коли T є множиною чисел $t \in \{0, 1, \dots\}$, задається послідовністю скінченновимірних функцій розподілу

$$F_n \{x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n\} = \mathcal{P}\{\zeta(t_1) < x_1, \zeta(t_2) < x_2, \dots, \zeta(t_n) < x_n\}, \quad (3.9)$$

$$n = 1, 2, \dots, \quad x \in R^n.$$

Такий процес можна назвати випадковим вектором або послідовністю випадкових чисел.

В тому випадку, коли процес (3.8) має при всіх $t \in T$ незалежні значення, маємо

$$F_n \{x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n\} = \prod_{j=1}^n F_1 \{x_j; t_j\}, \quad (3.10)$$

де

$$\{F_j(x; t), t \in T, j = 1, 2, \dots\} = \mathcal{P}\{\zeta(t_j) < x_j\}. \quad (3.11)$$

Коли всі $F_1 \{x_j; t_j\}$, які входять в (3.10) і визначені згідно з (3.11), належать одному класу розподілів, ми маємо стаціонарний процес з незалежними значеннями, назва якого співпадає з назвою одновимірної функції розподілу $F_1 \{x_j; t_j\}$. Наприклад, розподіл гаусса, пуассона, гама, коші і т.д. Властивості процесів з незалежними значеннями повністю визначаються функціями (3.9) та (3.10). Тому, коли говорять, що задано процес (3.8), то мають на увазі, що задано його функції розподілу (3.9).

Математичним сподіванням випадкового процесу (3.8) з функцією розподілу (3.11) називається функція часу, що визначена інтегралом Стільєса [66]:

$$\mathbf{M}\zeta(t) = \int_0^{\infty} x dF_1(x; t), \quad t \in T.$$

Дисперсією випадкового процесу (3.8) називається математичне сподівання квадрата відхилення значення випадкового процесу від свого математичного сподівання:

$$\mathbf{D}\zeta(t) = \mathbf{M}(\zeta(t) - \mathbf{M}\zeta(t))^2 = \int_0^{\infty} (x - \mathbf{M}\zeta(t))^2 dF_1(x; t), t \in T.$$

Характеристичною функцією випадкового процесу (3.8) називається математичне сподівання випадкового процесу $e^{iu\zeta(t)}$, тобто

$$f(u; t) = \mathbf{M}e^{iu\zeta(t)} = \int_0^{\infty} e^{iux} dF_1(x; t), u \in (-\infty, \infty), t \in T,$$

де $F_1(x; t)$ – функція процесу (3.11).

Кореляційною функцією гільбертового випадкового процесу $\{\zeta(t), t \in T\}$ називається функція

$$R(t_1, t_2) = \mathbf{M}\{[\zeta(t_1) - \mathbf{M}\zeta(t_1)][\zeta(t_2) - \mathbf{M}\zeta(t_2)]\}, t_1, t_2 \in T \times T. \quad (3.12)$$

Для стаціонарного процесу кореляційна функція (3.12) залежить тільки від різниці аргументів $s = t_2 - t_1$.

Для такого процесу існує спектральна щільність потужності

$$S(\omega) = \begin{cases} \frac{\varkappa_2}{2\pi}, & |\omega| \leq \omega_0, \\ 0, & |\omega| > \omega_0, \end{cases} \quad \omega \in [-\pi, \pi], \quad (3.13)$$

де $\varkappa_2 = \mathbf{D}\zeta(t)$ – інтенсивність (дисперсія) стаціонарного білого шуму.

Для випадку білого шуму теоретична кореляційна функція має вигляд

$$R(s) = \begin{cases} 1, & s = 0, \\ 0, & \text{в інших випадках.} \end{cases} \quad (3.14)$$

Якщо існує така функція $p(x; t)$, що при будь-яких x виконується співвідношення

$$F(x;t) = \int_0^x p(y;t) dy,$$

то $p(x;t)$ називається щільністю розподілу ймовірностей (3.8).

Як відомо, функціям розподілу (3.9), що визначають процес (3.8), відповідають характеристичні функції

$$f\{u_1, u_2, \dots, u_n; t_1, t_2, \dots, t_n\}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Нас будуть цікавити випадкові процеси (3.8), у яких ці характеристичні функції є безмежно-подільні і мають канонічний вигляд у формі Колмогорова

$$\ln f_\zeta(u) = imu + \int_0^\infty [e^{iux} - 1 - iux] \frac{dK(x)}{x^2}. \quad (3.15)$$

Тут m - математичне сподівання процесу (3.8), яке, за заданою характеристичною функцією $f_\zeta(u)$ процесу (3.8), можна визначити шляхом диференціювання її логарифма в нулі:

$$m = -i \frac{d}{du} \ln f_\zeta(u) \Big|_{u=0},$$

$K(x)$ - неспадна дійсна обмежена функція; за відомою характеристичною функцією вона визначається зі співвідношення

$$K(x) = \frac{1}{2\pi} \lim_{y \rightarrow \infty} \int_0^\infty \frac{e^{-iuy} - e^{-iux}}{iu} \cdot \frac{d^2 \ln f_\zeta(u)}{du^2} du.$$

Зокрема, для гауссівського випадку:

$$K(x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ \sigma^2, & x > 0. \end{cases}$$

Для розподілу пуассона:

$$K(x) = \begin{cases} 0, & x < 1, \\ \lambda, & x > 1. \end{cases}$$

Таким чином, властивості процесу з незалежними значеннями і безмежно подільним законом розподілу повністю визначається математичним сподіванням та функцією стрибків $K(x)$ [12]. Зокрема, $K(x)$ може залежати від часу. В залежності від властивостей $K(x)$ можна отримати періодичні процеси з незалежними значеннями.

Числова реалізація.

Розглянемо питання, пов'язані з попередньою обробкою сигналів. Зупинимось на моделюванні процесу з незалежними значеннями, білого шуму [80].

Перший етап моделювання полягає в отриманні однієї з реалізацій випадкового процесу. Наприклад, це може бути строго субгауссівська послідовність чисел [81] чи арксинус послідовність, чи навіть безпосередньо рівномірно розподілені числа.

Одну з типових реалізацій дослідженого процесу ζ_t показано на рис.3.3.

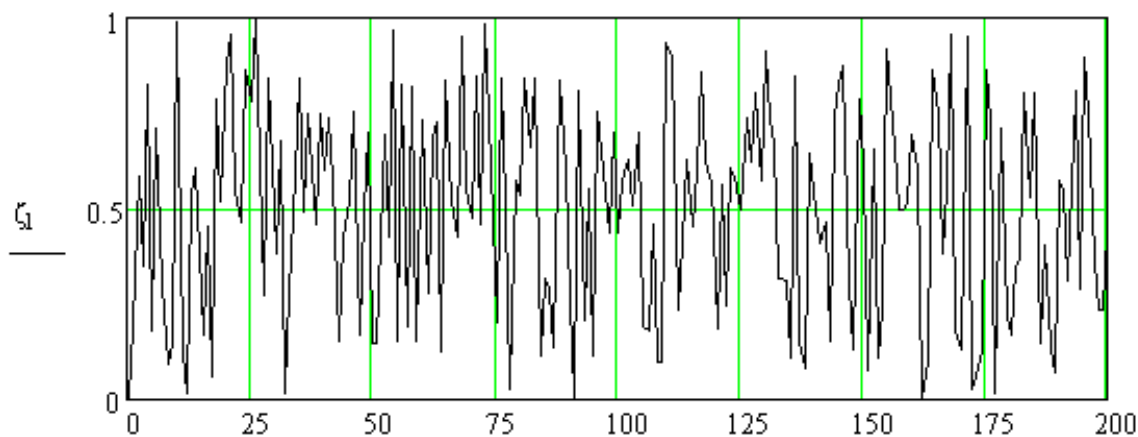


Рис.3.3. Реалізація випадкового процесу ζ_t

Його математичне сподівання в програмі визначається так:

$$\mathbf{M}\zeta(t) = \varkappa_1 \frac{u(\pi - \omega_0 + 1)}{\pi},$$

u вибрано рівним 1, що значно спрощує попередню формулу. При умові $\mathbf{M}\zeta(t) = \varkappa_1$, $\sigma^2 = 0,25 = \varkappa_2$, забезпечується рівність математичних сподівань відгуку фільтра і твірного процесу.

За допомогою програми були отримані оцінки математичного сподівання та дисперсії, що становили $\mathbf{M}\zeta = 0,496$ та $\mathbf{D}\zeta = 0,084$ відповідно.

Графік оцінки кореляційної функції однієї з реалізацій білого шуму $R(s)$, де $s \in (-25, 25)$ зображений на рис.3.4.

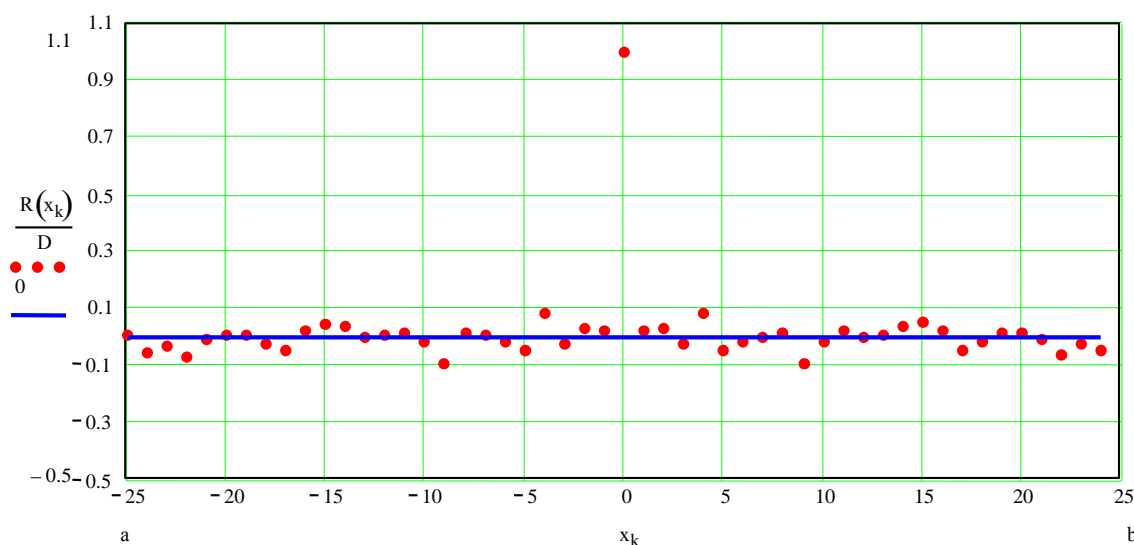


Рис.3. 4. Графік оцінки кореляційної функції білого шуму $R(s)$

Якщо побудувати, згідно з теоретичною формулою (3.14), графік функції $R(s)$ і порівняти його з графіком, який зображено на рис.3.4 (графік був отриманий за допомогою розробленої програми), то очевидно, що вони співпадають, зокрема в точці $R(0) = 1$.

Використовуючи метод формуючих фільтрів і формули, що були наведені вище, отримуємо наступну структуру (алгоритм) моделювання

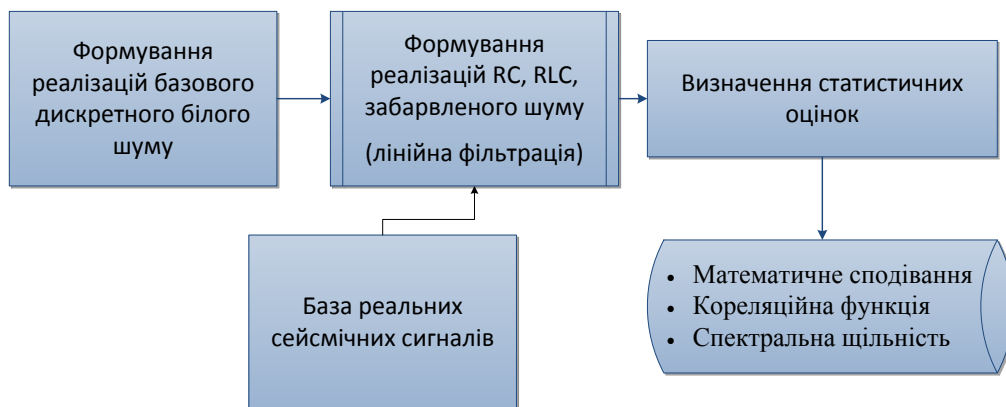


Рис. 3.5. Послідовність операцій моделювання і дослідження шуму

3.3.1.2. Моделювання забарвленого шуму

Забарвлений шум з дискретним часом – це процес, отриманий фільтрацією дискретного білого шуму фільтром з амплітудно-частотною характеристикою, що рівна u в смузі частот $|\omega| \leq \omega_0$ і рівний 0 за цією смугою. Такий процес формується з білого шуму (рис.3.3) фільтром з імпульсною перехідною характеристикою

$$\varphi(t) = \frac{u \sin \omega_0 t}{\pi t}; t \in (\overline{0; \infty}); 0 < \omega_0 < \pi, \quad (3.16)$$

Даний фільтр фізично нездійсненний так як $\varphi(t)$ не рівний нулю при $t < 0$.

Забарвлений шум згідно виразу (2.22) і з врахуванням імпульсної перехідної характеристики (3.16) записується наступним чином:

$$\xi(t) = \sum_{\tau=0}^{\infty} \frac{u \sin \omega_0 \tau}{\pi \tau} \zeta(t - \tau). \quad (3.17)$$

При $|\omega_0| = \pi$ отримуємо породжуючий процес $\{\zeta(t), t \in (\overline{0; \infty})\}$, а при $0 < |\omega_0| < \pi$ забарвлений шум.

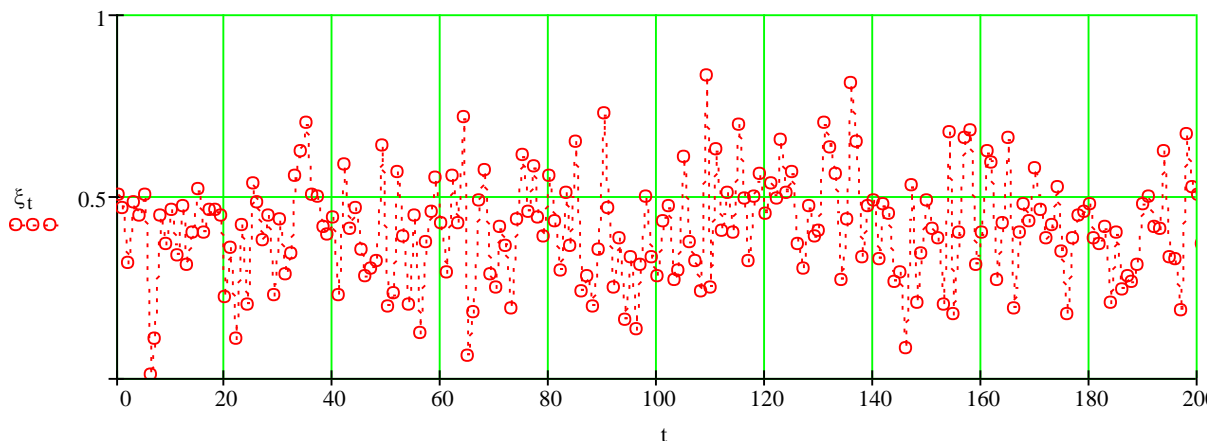


Рис. 3.6. Реалізація забарвленого шуму $\omega_0 = \pi/3$

Математичне сподівання забарвленого шуму визначається так:

$$M\xi(t) = \alpha_1 \cdot \frac{u(\pi - \omega_0 + 1)}{\pi},$$

параметр u – коефіцієнт передачі формуючого фільтра зручно брати рівним 1 або

$$u = \frac{\pi}{\pi - \omega_0 + 1}.$$

При виборі $u = 1$ спрощуються формули, а друге число забезпечує виконання умови

$$\sum_{t=-\infty}^{\infty} \varphi(t) = 1, \quad (3.18)$$

що забезпечує рівність математичних сподівань відгуку фільтра і породжуючого процесу.

Кореляційна функція дискретного забарвленого шуму:

$$R(s) = \alpha_2 \cdot \frac{u^2 \sin \omega_0 s}{\pi \cdot s}, \quad s \in (-\infty; \infty). \quad (3.19)$$

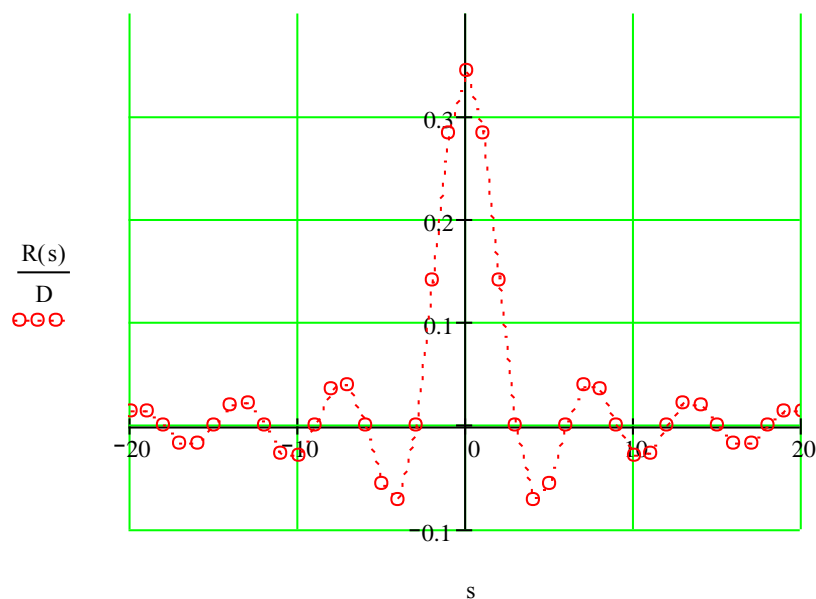


Рис. 3.7. Нормована кореляційна функція дискретного забарвленого шуму
 $\omega_0 = \pi/3; s \in [-20; 20]$

Спектральна щільність потужності дискретного забарвленого шуму:

$$S(\omega) = \begin{cases} \frac{\varkappa_2 u^2}{2\pi}, & |\omega| \leq \omega_0, \\ 0, & |\omega| > \omega_0, \end{cases} \quad \omega \in [-\pi; \pi], \quad (3.20)$$

де \varkappa_2 - інтенсивність (дисперсія) стаціонарного білого шуму.

3.3.1.3. Комп'ютерне моделювання стаціонарного RC шуму з дискретним часом

RC шум – це процес з дискретним часом і низькочастотним енергетичним спектром. Назва процесу походить із назви лінійного формуючого фільтра.

Такий процес отримується із базового білого шуму фільтром з імпульсною перехідною характеристикою

$$\varphi(t) = u e^{-\alpha t} U(t), \quad t \in (-\infty, \infty), \quad \alpha > 0, \quad (3.21)$$

де $U(t)$ - функція Хевісайда (2.4)

Для RC шуму його математичне сподівання

$$M\xi(t) = \varkappa_1 \cdot \frac{u}{1 - e^{-\alpha}}. \quad (3.23)$$

Параметр u , коефіцієнт передачі формуючого фільтра, зручно брати рівним 1 або $u = 1 - e^{-\alpha}$. Для випадку, коли $u = 1$, комплексна передаточна характеристика фільтра має вигляд

$$Y(\omega) = \frac{e^{\alpha} u}{e^{\alpha} - e^{-j\omega}}, \quad \omega \in [-\pi, \pi).$$

Даний фільтр є фізично реалізовним.

З допомогою імпульсної перехідної характеристики (3.21) може бути описано більшість реальних цифрових низькочастотних фільтрів. Тоді РС набуває вигляду

$$\xi(t) = \sum_{\tau=0}^{\infty} u e^{-\alpha\tau} \zeta(t - \tau), \quad t \in (-\infty, \infty). \quad (3.24)$$

Його кореляційна функція:

$$R(s) = \varkappa_2 \cdot \frac{u^2 e^{-2\alpha|s|}}{1 - e^{-2\alpha}} = R(0) \cdot e^{-\alpha|s|}, \quad s \in (-\infty, \infty), \quad \alpha > 0, \quad (3.25)$$

Реалізацію РС шуму зображено на наступному рисунку 3.8.

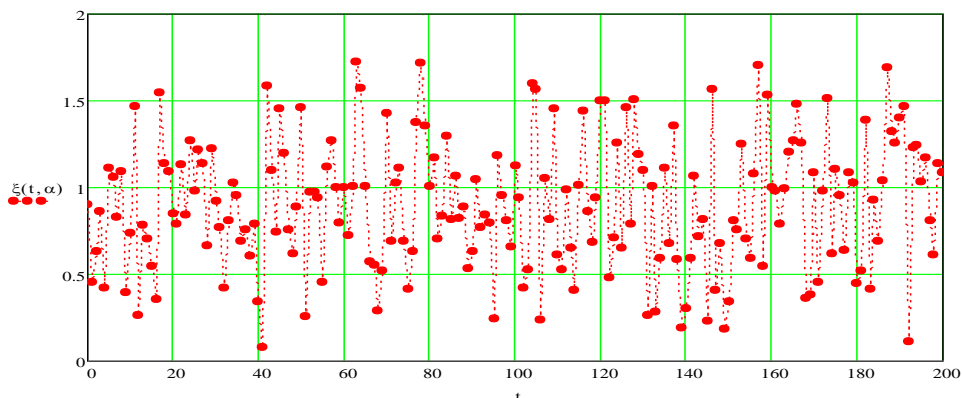


Рис. 3.8. Реалізація РС – шуму з дискретним часом

Для визначення математичного сподівання скористаємось формулою (3.23), коефіцієнт передачі формуючого фільтра вибираємо: $u = 1$. За допомогою програми було отримано наступне значення математичного сподівання змодельованого стаціонарного RC шуму $a_1 = 0,496$, а також побудовано наступні графіки реалізацій кореляційної функції RC шуму і спектральної щільності потужності RC шуму.

Для побудови графіка реалізації кореляційної функції RC шуму була використана формула (3.25). Реалізація кореляційної функції RC шуму для $\alpha = 0.2; \alpha = 0.4; \alpha = 0.8$ зображена на рис. 3.9.

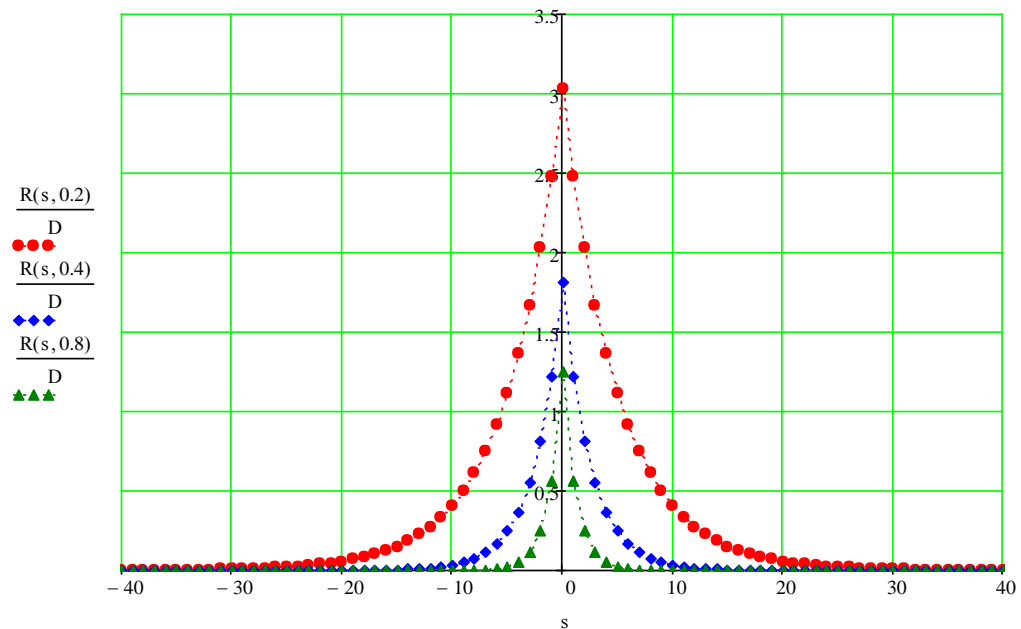


Рис. 3.9. Статистична оцінка нормованої кореляційної функції RC шуму при різних α

3.3.1.4. Моделювання RLC-шуму

Проведемо моделювання реалізації лінійного RLC шуму. Скористаємось алгоритмом моделювання, який було описано раніше (рис 3.5). Згідно з даним алгоритмом процес формуємо з реалізації дискретного білого шуму [6] фільтром з експонентно-синусною імпульсною перехідною характеристикою (3.27)

$$\varphi(t) = ue^{-\alpha t} \sin \theta \cdot t \cdot U(t); t \in (-\infty; \infty); \alpha > 0; \theta \neq \pi k; k \in (-\infty; \infty), \quad (3.27)$$

Параметр u – коефіцієнт передачі формуючого фільтра вибирається рівним 1 або

$$u = \frac{2 \cdot (\operatorname{ch} \alpha - \cos \theta)}{\sin \theta},$$

для формуючого фільтра, який не змінює математичного сподівання породжуючого процесу. Для даного випадку коефіцієнт було вибрано 1.

Комплексна передаточна характеристика фільтра має вигляд

$$K(\omega) = \frac{u \sin \theta}{2[\operatorname{ch}(\alpha + j\omega) - \cos \theta]}; \omega \in [-\pi; \pi).$$

Дискретний RLC-шум як лінійний випадковий процес запишемо наступним чином:

$$\xi(t) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} u e^{-\alpha(t-\tau)} \sin[\theta(t-\tau)] \zeta(\tau) U(t-\tau); t \in \overline{(-\infty; \infty)}, \quad (3.28)$$

$$t \in \overline{(-\infty; \infty)}, \alpha > 0, \theta \neq \pi k, k \in \overline{(-\infty; \infty)}$$

де $\{\zeta(t), t \in \overline{(-\infty; \infty)}\}$ - породжуючий стаціонарний білий шум з математичним сподіванням $M\zeta(t) = \mathfrak{a}_1$ і дисперсією $D\zeta(t) = \mathfrak{a}_2$.

Математичне сподівання RLC-шуму

$$M\xi(t) = \mathfrak{a}_1 \cdot \sum_{\tau=0}^{\infty} u e^{-\alpha\tau} \sin \theta \tau = \frac{\mathfrak{a}_1 u \sin \theta}{2(\operatorname{ch} \alpha - \cos \theta)},$$

дисперсія дискретного RLC-шуму.

$$D\xi(t) = \alpha_2 \cdot \sum_{\tau=0}^{\infty} a^2 u e^{-\alpha t} \sin^2 \theta \tau = \frac{\alpha_1 u^2}{2} \cdot \left[\frac{e^{2\alpha}}{e^{2\alpha} - 1} - \frac{e^{2\alpha} - \cos 2\theta}{2(\alpha - \cos 2\theta)} \right]. \quad (3.29)$$

Приклад згенерованого RLC – шуму наведено на рисунку 3.11. Параметри генерування: $\alpha = 0,1; \theta = \frac{\pi}{3}$

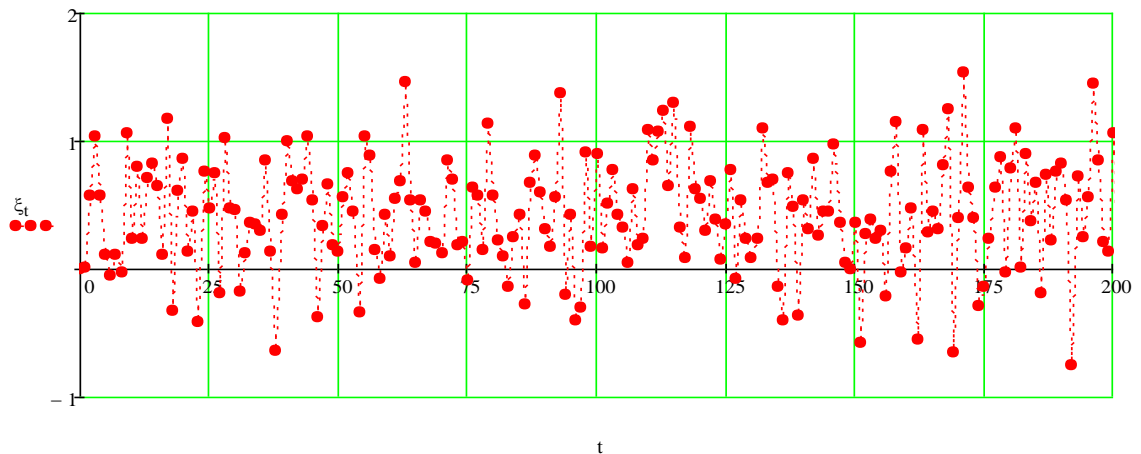


Рис. 3.11. Реалізація RLC – шуму

Кореляційна функція в даному випадку визначається наступним чином (рис. 3.12):

$$R(s) = R(0) \cdot e^{-\alpha|s|} [\cos(\theta \cdot s) + E(\theta, \alpha) \cdot \sin(\theta|s|)]; \quad s \in (-\infty; \infty), \quad (3.30)$$

де

$$E(\theta, \alpha) = \frac{(e^{2\alpha} - 1) \cdot \sin 2\theta}{(e^{2\alpha} - 1)(1 - \cos 2\theta)}, \quad (3.31)$$

$R(0) = D\xi(t)$ і визначається згідно виразу (3.29).

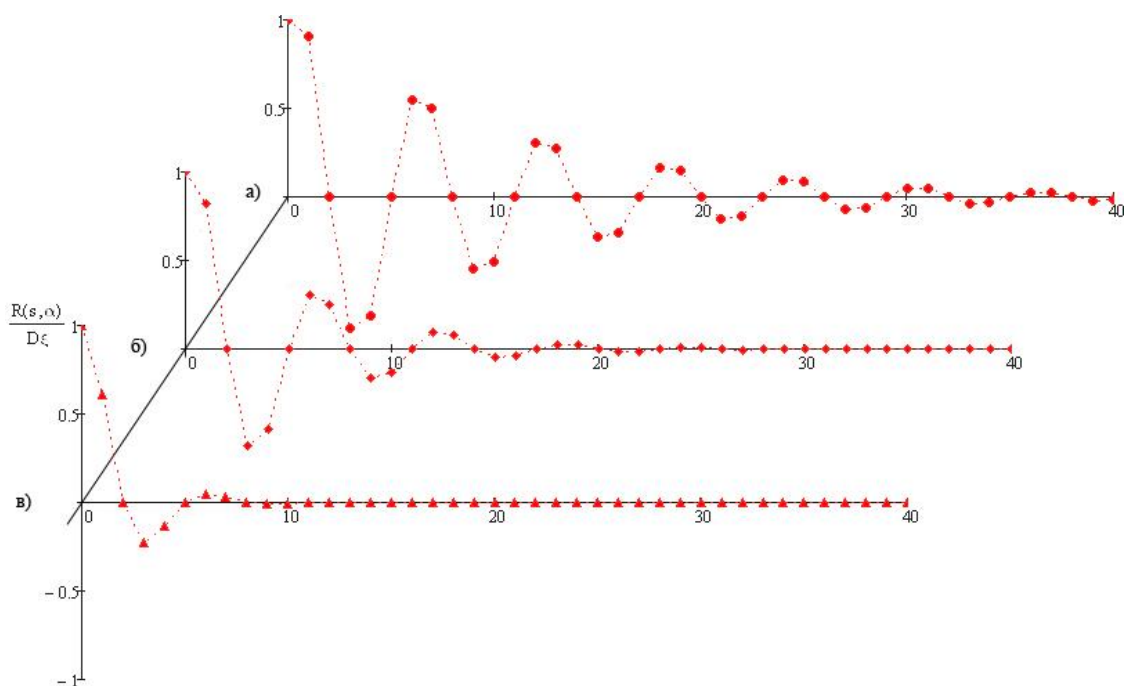


Рис. 3.12. Нормована кореляційна функція RLC – шуму $s \in \overline{[0,40]}$; $\theta = \pi/3$;
 а) при $\alpha = 0,1$; б) при $\alpha = 0,3$; в) при $\alpha = 0,5$.

Отже, на основі запропонованих моделей шумовий процес $\xi(t)$ в точці прийому може розглядатись як відгук багаторезонансної лінійної системи, що описується вектором імпульсних перехідних функцій при взаємодії на її входи породжуючого процесу $\zeta(t)$. При цьому для математичного опису процесу $\xi(t)$ можна використовувати клас лінійних випадкових процесів. Було розглянуто неперервний і дискретний варіант моделі RLC шуму. Наведено приклад реалізації дискретного RLC шуму. В основу побудови моделі випадкових завад було покладено метод формуючих фільтрів.

3.4. Аналіз роботи кореляційної системи обробки сейсмічних сигналів

3.4.1. Аналіз роботи типової кореляційної системи.

Приведемо результати аналізу функціонування типової кореляційної системи описаної в розділі 3.2.1 без вхідних ортогональних фільтрів при дії моногармонічних і полігармонічних сигналів.

3.4.1.1. Вхідні моногармонічні сигнали з дискретним часом.

На вхід схеми (рис. 3.1), надходять два моногармонічні сигнали однакової відомої частоти:

$$\begin{aligned} x_1(t_j) &= A_1 e^{-\alpha^{(1)} t_j} \sin(\omega t_j + \theta_1), \quad \omega \neq 0 \\ x_2(t_j) &= A_2 e^{-\alpha^{(2)} t_j} \sin(\omega t_j + \theta_2), \end{aligned} \quad (3.33)$$

де θ_1 і θ_2 - відповідні початкові фази вхідних сигналів. При взаємному зсуві сигналів по часу $\tau_k = k\Delta t, k = 0, 1, \dots, l, l < m$ отримаємо

$$R_{12}(\tau_k) = \frac{1}{m-k} \sum_{j=1}^{m-k} A_1 A_2 e^{-t_j(\alpha^{(2)} + \alpha^{(1)})} e^{-\alpha^{(2)} \tau_k} \sin[\omega t_j + \theta_1] \sin[\omega(t_j + \tau_k) + \theta_2]. \quad (3.34)$$

Для випадку $m \rightarrow \infty$ маємо вираз

$$R_{12}(\tau_k) = \frac{A_1 A_2}{2} e^{-t_j(\alpha^{(2)} + \alpha^{(1)})} e^{-\alpha^{(2)} \tau_k} \cos[\omega \tau_k + \Delta \theta], \quad \omega \neq 0, \quad (3.35)$$

де $\Delta \theta = \theta_2 - \theta_1$ - зсув початкових фаз.

Проведемо аналіз виразу (3.35). На практиці необхідно враховувати, що вираз (3.35) отриманий для нескінченного часу усереднення, тобто є ідеальним. В роботах [85, 95] показано, що якщо часовий інтервал усереднення сигналів кратний декільком періодам досліджуваних сигналів, то похибка виразу (3.35) не перевищує декількох процентів. Вираз (3.35) підтверджує той факт [85, 95], що кореляційна система є ідеальною системою вимірювання різниці початкових фаз моногармонічних сигналів. У подальших дослідженнях буде показано, що ця властивість кореляційних систем з вхідними ортогональними фільтрами зберігається і при дії завад.

3.4.1.2. Вхідні полігармонічні сигнали з дискретним часом.

На вхід схеми (рис. 3.1), надходять два полігармонічні сигнали однакової відомої частоти:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \sum_{i=1}^n A_i^{(1)} e^{-\alpha_i^{(1)} t} \sin(\omega_i t + \theta_i^{(1)}), \\ x_2(t) &= \sum_{i=1}^n A_i^{(2)} e^{-\alpha_i^{(2)} t} \sin(\omega_i t + \theta_i^{(2)}), \end{aligned} \quad (3.36)$$

де $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$.

Полігармонічні сигнали мають однакове число гармонік, частоти гармонік співпадають між собою. В даному випадку кореляційне перетворення досліджуваних сигналів описується формулою

$$R_{12}(\tau_k) = \frac{1}{m-k} \sum_{j=1}^{m-k} \sum_{i=1}^n A_i^{(1)} e^{-\alpha_i^{(1)} t_j} \sin(\omega_i t_j + \theta_i^{(1)}) \sum_{i=1}^n A_i^{(2)} e^{-\alpha_i^{(2)} t_j} \sin(\omega_i (t_j + \tau_k) + \theta_i^{(2)}). \quad (3.37)$$

Для ідеального інтегрування, коли $m \rightarrow \infty$ для виразу (3.34) отримуємо

$$R_{12}(\tau_k) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i^{(1)} A_i^{(2)}}{2} e^{-t_j(\alpha^{(2)} + \alpha^{(1)})} e^{-\alpha^{(2)} \tau_k} \cos(\omega_i \tau_k + \Delta \theta_i), \quad (3.38)$$

де $\Delta \theta_i = \theta_i^{(2)} - \theta_i^{(1)}$.

Вираз (3.38) характеризує взаємний зв'язок кореляційного перетворення досліджуваних сигналів і залежить від числа компонент полігармонічних сигналів, від взаємного зсуву по часу τ_k та від амплітуд і різниці фаз відповідних гармонік.

Зауважимо, що функція $R_{12}(\tau_k)$ отримана за умови нескінченного часу усереднювання. На практиці необхідно мати не менше одного періоду кореляційного перетворення, і шляхом перетворення Фур'є можна визначити взаємні амплітудні і фазові характеристики початкових полігармонічних сигналів.

3.4.2. Аналіз роботи кореляційної системи з вхідними дискретними ортогональними фільтрами.

Аналогічно розглянемо роботу кореляційної системи з попередньою ортогональною фільтрацією структурна схема якої наведена в 3.2.2. Роботу даної системи будемо розглядати за відсутності на вході шумових процесів.

3.4.2.1. Вхідні моногармонічні сигнали.

Системою, зображеною на рис. 3.2, виконуються наступні перетворення. До вхідного сигналу $x_1(t_j)$ застосовується лінійний оператор згортки (блок 3) з імпульсною перехідною характеристикою $\varphi_1(t_j)$, а до сигналу $x_2(t_j)$ - оператор згортки (блок 4) з імпульсною перехідною характеристикою $\varphi_2(t_j)$. Сигнали $x_1(t_j)$ і $x_2(t_j)$ визначаються згідно виразу (3.33). В результаті дії лінійного дискретного оператора згортки з ядром $\varphi_1(t_j)$ для сигналу $x_1(t_j)$ отримуємо

$$y_1(t_j) = \varphi_1 * x_1 = \sum_{s_1=1}^{\infty} \varphi_1(s_1) A_1 e^{-\alpha^{(1)} t_j} \sin(\omega(t_j - s_1) + \theta_1), \quad t_j \in (0; \infty) \quad (3.40)$$

і відповідно для сигналу $x_2(t_j)$ його відгук

$$y_2(t_j) = \varphi_2 * x_2 = \sum_{s_2=1}^{\infty} \varphi_2(s_2) A_2 e^{-\alpha^{(1)} t_j} \sin(\omega(t_j - s_2) + \theta_2), \quad t_j \in (0; \infty). \quad (3.41)$$

На виході кореляційної системи для сигналів $y_1(t_j)$ і $y_2(t_j)$ отримуємо кореляційне перетворення

$$\bar{R}_{12}(\tau_k) = \frac{1}{m-k} \sum_{j=1}^{m-k} \sum_{s_1=1}^{\infty} \sum_{s_2=1}^{\infty} \varphi_1(s_1) x_1(t_j - s_1) \varphi_2(s_2) x_2(t_j + \tau_k - s_2). \quad (3.42)$$

Провівши заміну змінних $s_2 = s_1 + \tau$, останній вираз запишемо таким чином:

$$\bar{R}_{12}(\tau_k) = \frac{1}{m-k} \sum_{j=1}^{m-k} \sum_{s_1=1}^{\infty} \sum_{\tau=1}^{\infty} \varphi_1(s_1) \varphi_2(s_1 + \tau) x_1(t_j - s_1) x_2(t_j + \tau_k - s_1 - \tau). \quad (3.43)$$

Для ідеального інтегратора, тобто при $m \rightarrow \infty$ для виразу (3.43) отримуємо

$$\bar{R}_{12}(\tau_k) = \sum_{s_1=1}^{\infty} h_{12}(s_1) R_{12}(s_1 + \tau_k), \quad (3.44)$$

де згортка імпульсних перехідних функцій $\varphi_1(t_j)$ і $\varphi_2(t_j)$ дискретних ортогональних фільтрів визначається виразом

$$h_{12}(s_1) = \sum_{s_1=1}^{\infty} \varphi_1(s_1) \varphi_2(s_1 + \tau), \quad (3.45)$$

а дія кореляційного оператора $R_{12}(\tau)$ досліджуваних сигналів виразом (3.38). На практиці вираз (3.44) реалізується на скінченних часових інтервалах, при цьому згідного робіт [85, 95] похибка не перевищує декількох відсотків, якщо часовий інтервал інтегрування вибирається в межах 10 періодів досліджуваних сигналів, а лінійна фільтрація досліджуваних моногармонічних сигналів проводиться в межах 40-60 періодів.

В якості ортогональних фільтрів дискретного аргументу виберемо фільтри Лагера дискретного аргументу 1-го і 2-го порядку при цьому взаємне кореляційне перетворення має вигляд [80]:

$$h_{12}(s_1) = (e^\lambda - 1) s_1 e^{-\frac{\lambda}{2}(s_1-1)} U(s_1) = 2 \operatorname{sh} \frac{\lambda}{2} e^{-\frac{\lambda s_1}{2}} s_1 U(s_1), \quad \tau \in (0, \infty), \quad (3.46)$$

де $U(t)$ - функція Хевісайда (2.4), а λ параметр фільтрів Лагера, який визначає імпульсну перехідну функцію.

Для функції (3.46) її перетворення Фур'є

$$S_{12}(\omega) = \frac{e^\lambda - 1}{1 - 2e^{\lambda/2} \cos \omega + e^\lambda} \exp \left[i \operatorname{arctg} \frac{b}{a} + i \frac{\pi}{2} (1 - \operatorname{sign} a) \operatorname{sign} b \right] =$$

$$= \frac{e^{i\omega} (1 - e^{-\lambda})}{(1 - e^{i\omega - \lambda/2})^2}, \quad \omega \in (-\pi, \pi), \quad (3.47)$$

де a і b визначаються за формулами:

$$a = \cos \omega - e^{-\lambda/2}, \quad b = \sin \omega.$$

Враховуючи (3.46), вираз для кореляційної функції згідно (3.44) набуває вигляду

$$\bar{R}_{12}(\tau_k) = \sum_{\tau=0}^{\infty} e^{-\frac{\lambda}{2}(\tau-1)} (e^\lambda - 1) \tau U(\tau) \frac{A_1 A_2}{2} \cos[\omega(\tau_k - \tau) + \Delta\theta] =$$

$$= d [a_1 \cos(\omega \tau_k + \Delta\theta) + b_1 \sin(\omega \tau_k + \Delta\theta)], \quad (3.48)$$

де

$$d = \frac{A_1 A_2 (e^\lambda - 1)}{2(1 - 2e^{\lambda/2} \cos \omega + e^\lambda)}, \quad a_1 = (e^{-\lambda} + 1) \cos \omega - 2e^{-\lambda/2}, \quad b_1 = (1 - e^{-\lambda}) \sin \omega. \quad (3.49)$$

В результаті на виході кореляційної системи з ортогональними фільтрами Лагера кореляційне перетворення приймає вигляд

$$\bar{R}_{12}(\tau_k) = \frac{A_1 A_2}{2} \hat{A}_k \cos[\omega \tau_k + \Delta\theta - \theta_k], \quad (3.50)$$

де величина \hat{A}_k визначається виразом

$$\hat{A}_k = \frac{e^\lambda - 1}{1 - 2e^{\lambda/2} \cos \omega + e^\lambda}, \quad (3.51)$$

а кут θ_k відповідно виразом

$$\theta_k = \operatorname{arctg} \frac{b_1}{a_1} + \frac{\pi}{2} (1 - \operatorname{sign} a_1) \operatorname{sign} b_1 = \arccos \left[\frac{a_1}{(a_1^2 + b_1^2)^{1/2}} \right] \operatorname{sign} b_1, \quad a \neq 0. \quad (3.52)$$

Аналізуючи вираз (3.51) видно, що кореляційне перетворення двох профільтованих сигналів (3.33) є моногармонічною функцією, амплітуда якої прямопропорційна добутку амплітуд вхідних моногармонічних сигналів (3.33), а початкова фаза складається з різниці між різницею фаз моногармонічних сигналів $\Delta\theta$ і кутом θ_k , обумовленим наявністю лагеровської ортогональної фільтрації.

Для даного випадку знаходимо, що для кореляційної функції (3.50) її лінійний спектр потужності приймає вигляд [80]

$$\hat{S}_B(\tilde{\omega}) = \begin{cases} \frac{A_1 A_2}{2} \hat{A}_k e^{i(\Delta\theta - \theta_k)}, & \tilde{\omega} = \omega \\ 0, & \tilde{\omega} \neq \omega. \end{cases} \quad (3.53)$$

Аналізуючи останню формулу видно, що лінійний спектр потужності складається з дискрет, відповідних частотам моногармонічних сигналів, які поступають на вхід дискретної кореляційної вимірювальної системи з вхідними ортогональними фільтрами Лагера. З виразу (3.53) також слідує, що якщо вимірюються добутки амплітуд і різниця фаз моногармонічних сигналів то вони визначаються згідно наступних формул:

$$A_1 A_2 = 2(a^2 + b^2)^{1/2} / A_k,$$

$$\Delta\theta = \arccos\left[\frac{a}{(a^2 + b^2)^{1/2}}\right] \text{sign}b + \theta_k, \quad (3.54)$$

де \hat{A}_k - визначається формулою (3.51), а θ_k - визначається формулою (3.52). Згідно формули (3.53)

$$\begin{aligned} a &= \text{Re} \hat{S}_B(\omega), \\ b &= \text{Im} \hat{S}_B(\omega). \end{aligned} \quad (3.55)$$

Відмітимо, що коли із самого початку вибрати відношення частоти дискретизації до частоти сигналу, рівним цілому числу N , то при визначенні $\hat{S}_B(\tilde{\omega})$ досить скористатися формулою (3.50), вибравши часовий інтервал визначення $\bar{R}_{12}(\tau_k)$ завдовжки в один або декілька цілих періодів моногармонічного сигналу.

3.4.2.2. Вхідні полігармонічні сигнали.

Для кореляційної системи з вхідними ортогональними фільтрами на обидва входи якої поступають полігармонічні сигнали (3.36) з однаковим частотним складом. В цьому випадку до вхідного сигналу $x_1(t_j)$ застосовується оператор згортки з імпульсною перехідною характеристикою $\varphi_1(t_j)$, а до сигналу $x_2(t_j)$ - оператор згортки з імпульсною перехідною характеристикою $\varphi_2(t_j)$ покомпонентно до кожної гармоніки, як це описано у випадку з моногармонічними сигналами. В результаті сигнал $x_1(t_j)$ перетвориться в сигнал $y_1(t_j)$ згідно співвідношення

$$y_1(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{s_1=1}^{\infty} \varphi_1(s_1) A_i^{(1)} e^{-\alpha_i^{(1)} t_j} \sin(\omega_i(t_j - s_1) + \theta_i^{(1)}), \quad t_j \in (0; \infty), \quad (3.56)$$

а сигнал $x_2(t_j)$ - в сигнал

$$y_2(t_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{s_2=1}^{\infty} \varphi_2(s_2) A_i^{(2)} e^{-\alpha_i^{(2)} t_j} \sin(\omega_i(t_j - s_2) + \theta_i^{(2)}), t_j \in (0; \infty). \quad (3.57)$$

Потім до сигналів $y_1(t_j)$ і $y_2(t_j)$ застосовується оператор (3.7). Відмітимо, що кореляційне перетворення двох моногармонічних компонент з різними частотами дорівнює нулю. Тому при обчисленні кореляційного перетворення враховуватимемо лише компоненти з однаковими частотами. Отже

$$\bar{R}_{12}(\tau_k) = \frac{1}{m-k} \sum_{j=1}^{m-k} \sum_{s_1=1}^{\infty} \sum_{s_2=1}^{\infty} \varphi_1(s_1) x_1(t_j - s_1) \varphi_2(s_2) x_2(t_j + \tau_k - s_2). \quad (3.58)$$

Використавши вище приведений матеріал, отримаємо

$$\bar{R}_{12}(\tau_k) = \sum_{s_1=1}^{\infty} h_{12}(s_1) R_{12}(\tau_k - \tau), \quad (3.59)$$

де $h_{12}(\tau)$ і $R_{12}(\tau_k)$ визначаються формулами (3.45) і (3.38).

Якщо як імпульсні перехідні характеристики ортогональних фільтрів вибрані функції Лагера дискретного аргументу, порядок яких відрізняється на одиницю, то під час надходження на вхід системи полігармонічних сигналів (3.36) отримуємо кореляційне перетворення виду

$$\bar{R}_{12}(\tau_k) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i^{(1)} A_i^{(2)}}{2} \hat{A}_k(\omega_i) \cos[\omega_i \tau_k + \Delta\theta_i - \theta_k(\omega_i)], \quad (3.60)$$

де величина \hat{A}_k визначається виразом

$$\hat{A}_k(\omega_i) = \frac{e^{\lambda} - 1}{1 - 2e^{\lambda/2} \cos \omega_i + e^{\lambda}}, i \in [1, n], \quad (3.61)$$

а величина $\theta_k(\omega_i)$ визначається

$$\theta_k(\omega_i) = \arctg \frac{b_i}{a_i} + \frac{\pi}{2} (1 - \text{sign} a_i) \text{sign} b_i, \quad i \in [1, n], \quad (3.62)$$

$$a_i = (e^{-\lambda} + 1) \cos \omega_i - 2e^{-\lambda/2}, \quad b_i = (1 - e^{-\lambda}) \sin \omega_i.$$

Як і у випадку з моногармонічним сигналом, вимірявши $\bar{R}_{12}(\tau_k)$ принаймні на інтервалі часу, рівному декільком цілим періодам, з допомогою перетворення Фур'є можна визначити шукані взаємні амплітудні і фазові характеристики вхідних полігармонічних сигналів:

$$\begin{aligned} A_i^{(1)} A_i^{(2)} &= 2(a_i^2 + b_i^2)^{1/2} / A_k(\omega_i), \\ \Delta \theta_i &= \arccos \left[\frac{a_i}{(a_i^2 + b_i^2)^{1/2}} \right] \text{sign} b_i + \theta_k(\omega_i), \end{aligned} \quad (3.63)$$

де $a_i = \text{Re} S_B(\omega_i)$; $b_i = \text{Im} S_B(\omega_i)$.

3.5. Обробка зашумлених сейсмічних сигналів кореляційною системою з попередньою ортогональною фільтрацією

В даному розділі основна увага буде приділена аналізу роботи дискретного корелятора з попередньою ортогональною фільтрацією при поступленні на входи системи дискретного зашумленого сигналу.

Необхідно проаналізувати роботу дискретної кореляційної вимірювальної системи з вхідними ортогональними фільтрами, яка може бути використана для кореляційного прийому тестових сейсмічних сигналів за наявності на вході приймача завод типу білий, забарвлений, RC- і RLC-завод. Характеристики даних шумових процесів приведені в роботах [79, 80, 113].

Нехай маємо два паралельних канали (рис.3.2), на вхід яких поступають сигнали із заданими характеристиками (3.36). В кожному каналі є фільтр, причому імпульсні перехідні функції цих фільтрів представляють собою пару функцій Лагера. Після фільтра в одному з каналів є блок затримки, який дозволяє здійснити затримку сигналу по часу. Потім сигнали поступають на корелятор, який здійснює їх перемноження. Роботу описаної системи розглянемо для випадків коли на вхід схеми поступає сума полігармонічного сигналу і шумових процесів.

Сигнали, які поступають на вхід представляють суму корисного полігармонічного сигналу і завади:

$$x(t) = Q(t) + \xi(t), \quad (3.64)$$

де $Q(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \theta_i)$ - корисна складова вхідного сигналу, $\xi(t)$ - завада.

Після проходження аналогово-цифрових перетворювачів 1 і 2, запишемо вхідний сигнал (3.64), для 1-го і 2-го каналу наступним чином:

$$x_1(t_j) = x_2(t_j) = Q(t_j) + \xi(t_j) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t_j + \theta_i) + \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi_0(t_j - \tau) \zeta(\tau), \quad (3.65)$$

де $\{x(t_j) = x(j\Delta t), t_j = j\Delta t, j = \overline{1, m}, t_j \in T\}$ - простір вхідних сигналів з дискретним часом.

Тоді на виході ортогональних фільтрів Лагера отримаємо процеси

$$y_1(t_j) = \varphi_1 * Q(t_j) + \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi_{01}(t_j - \tau) \zeta(\tau),$$

$$y_2(t_j) = \varphi_2 * Q(t_j) + \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi_{02}(t_j - \tau) \zeta(\tau),$$

де

$$\varphi_{01}(t_j) = \varphi_0 * \varphi_1 = \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi_0(\tau) \varphi_1(t_j - \tau),$$

$$\varphi_{02}(t_j) = \varphi_0 * \varphi_2 = \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi_0(\tau) \varphi_2(t_j - \tau),$$

В результаті кореляційного перетворення на виході системи отримуємо

$$\begin{aligned} \bar{R}_{12}(\tau_k) = & \sum_{\tau=0}^{\infty} h_{12}(s_1) \bar{R}_s(\tau_k - \tau) + \\ & + \frac{1}{m-k} \sum_{j=1}^{m-k} \sum_{s_1=1}^{\infty} \sum_{s_2=1}^{\infty} \left[\varphi_1(s_1) Q(t_j - s_1) \varphi_{02}(t_j + \tau_k - s_2) \zeta(s_2) + \right. \\ & + \varphi_2(s_2) Q(t_j + \tau_k - s_2) \varphi_{01}(t_j - s_1) \zeta(s_1) + \\ & \left. + \varphi_{01}(t_j - s_1) \zeta(s_1) \varphi_{02}(t_j + \tau_k - s_2) \zeta(s_2) \right] \end{aligned}$$

де $h_{12}(\tau)$ - взаємне кореляційне перетворення функцій Лагера (3.46), $\bar{R}_s(\tau_k)$ кореляційне перетворення полігармонічних сигналів (3.38).

Кореляційне перетворення $\bar{R}_{12}(\tau_k)$ складається з чотирьох компонент, перша з яких детермінована, а три останні обумовлені дією завад. Якщо вважати, що породжуючий процес $\zeta(t_j)$ центрований, тобто $\kappa_1 = 0$, то друга і третя компоненти $\bar{R}_{12}(\tau_k)$ в границі при $m-k \rightarrow \infty$ спадають до нуля (їх математичне сподівання дорівнює нулю, а дисперсія при цьому прямує до нуля). Четвертий доданок як середнє за часом при $m-k \rightarrow \infty$ прямує до математичного сподівання добутку завад, тобто

$$\begin{aligned} \bar{R}_Z(\tau_k) = & \frac{1}{m-k} \sum_{j=1}^{m-k} \sum_{s_1=1}^{\infty} \sum_{s_2=1}^{\infty} \varphi_{01}(t_j - s_1) \zeta(s_1) + \varphi_{02}(t_j + \tau_k - s_2) \zeta(s_2) = \\ = & \mathbb{M} \left[\sum_{s_1=1}^{\infty} \sum_{s_2=1}^{\infty} \varphi_{01}(t_j - s_1) \zeta(s_1) + \varphi_{02}(t_j + \tau_k - s_2) \zeta(s_2) \right]. \end{aligned}$$

Якщо на вхід ортогонального фільтру поступає стаціонарний білий шум, для якого кореляційна функція з урахуванням одиничного імпульсу представляється у вигляді $R_\zeta(\tau_k) = \kappa_2 \delta(\tau_k)$, отримаємо

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = \kappa_2 \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi_{01}(\tau) \varphi_{02}(\tau + \tau_k), \quad (3.66)$$

де κ_2 - інтенсивність породжуючого білого шуму. Тому остаточно запишемо

$$\bar{R}_{12}(\tau_k) = \sum_{\tau=0}^{\infty} h_{12}(\tau) R_s(\tau_k - \tau) + \bar{R}_Z(\tau_k) \quad (3.67)$$

Як видно з останнього виразу 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 .

Оскільки функція (3.66) представляє собою зсув кореляційної функції, проаналізуємо її, задаючи різного вигляду шуми: білий, забарвлений, RC- і RLC-шум. Для цього перетворимо формулу (3.66) і запишемо її у вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{R}_Z(\tau_k) &= \kappa_2 \sum_{\tau=0}^{\infty} \sum_{s_1=1}^{\infty} \sum_{s_2=1}^{\infty} \varphi_0(s_1) \varphi_1(\tau - s_1) \varphi_0(s_2) \varphi_2(\tau + \tau_k - s_2) = \\ &= \sum_{\tau=0}^{\infty} R(\tau) h_{12}(\tau_k - \tau) = \sum_{\tau=0}^{\infty} h_{12}(\tau) R(\tau_k - \tau) \end{aligned} \quad (3.68)$$

де $R(\tau_k)$ - кореляційна функція вхідної завади; $h_{12}(\tau)$ - взаємне кореляційне перетворення функцій Лагера. Нескладно показати (наприклад, нехай $h_{12}(\tau)$ у виразі (3.68), дорівнює одиничному імпульсу), що за відсутності ортогональних фільтрів зсув $\bar{R}_Z(\tau_k)$ збігатиметься з кореляційною функцією шуму $R(\tau_k)$. Тому, щоб порівняти роботу кореляційної вимірювальної системи з ортогональними фільтрами

(рис. 3.2) і без них, досить провести порівняльний аналіз значень $\bar{R}_Z(\tau_k)$ і $R(\tau_k)$ в умовах сейсмічних завад, що часто зустрічаються [34, 113, 44, 55, 52]. Крім того, при оцінці зсуву кореляційної функції, що вноситься до кінцевого результату вимірювань взаємної амплітуди $A_1 A_2$ і різниці фаз $\Delta\theta$ зсувом $\bar{R}_Z(\tau_k)$ при $\tau_k \leq 0$, що визначається згідно формули (5), в системі з ортогональними фільтрами і зсувом, що вноситься $R(\tau_k)$ при $\tau_k \leq 0$, потрібно мати перетворення Фур'є від цих функцій на півосі $\tau_k \leq 0$. Позначимо ці перетворення відповідно через $S_{\bar{R}}(\omega)$ і $S_{\bar{B}}(\omega)$, тобто

$$S_{\bar{R}}(\omega) = \sum_{\tau_k=-\infty}^{\infty} R(\tau_k) e^{-j\omega\tau_k} = \sum_{\tau_k=0}^{\infty} R(-\tau_k) e^{j\omega\tau_k}, \quad (3.69)$$

$$S_{\bar{B}}(\omega) = \sum_{\tau_k=0}^{\infty} \bar{R}_Z(-\tau_k) e^{j\omega\tau_k}, \quad \omega \in [-\pi, \pi]. \quad (3.70)$$

Оскільки значення $R_Z(\tau_k)$ отримані для трьох моделей завад в [44, 55, 52], залишається вивести для них відповідні вирази $\bar{R}_Z(\tau_k)$ в кореляційній вимірювальній системі з ортогональними фільтрами Лагера, а потім і вирази для $S_{\bar{R}}(\omega)$, $S_{\bar{B}}(\omega)$.

3.5.1. Білий шум.

У випадку дії на вхід розглянутої кореляційної вимірювальної системи з ортогональними фільтрами Лагера (рис. 3.2) полігармонічних сигналів і білого шуму кореляційне перетворення вхідних сигналів (3.67) з врахуванням (3.68) має вигляд

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = \sum_{\tau=0}^{\infty} h_{12}(\tau) R(\tau_k - \tau) = \kappa_2 h_{12}(\tau_k),$$

а з врахуванням взаємного кореляційного перетворення функцій Лагера

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = \kappa_2 (e^\lambda - 1) \tau_k e^{-\frac{\lambda}{2}(\tau_k+1)} U(\tau_k) \quad (3.71)$$

де κ_2 - інтенсивність (дисперсія) дискретного білого шуму, тобто поля стаціонарних сейсмічних завад в точці спостереження, $U(\tau_k)$ - функція Хевісайда (2.4).

Таким чином, на негативній півосі зсувів, включаючи і нуль, завада, викликана білим шумом, теоретично повністю відсутня: при всіх $\tau_k \leq 0$, а кореляційне перетворення $R_{12}(\tau_k)$ при $\tau_k \leq 0$ визначається, аналогічно як у випадку детермінованих сигналів виразом [45]

$$R_{12}(\tau_k) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i^{(1)} A_i^{(2)}}{2} \hat{A}_k(\omega_i) \cos[\omega_i \tau_k + \Delta\theta_i - \theta_k(\omega_i)]$$

З врахуванням властивості ортогональних фільтрів Лагера "зануляти" $\bar{R}_Z(\tau_k)$ визначену згідно формули (3.68) на негативній півосі зсувів при завадах, що мало відрізняються від білого шуму, подальший аналіз роботи кореляційної системи розглянемо при негативних зсувах s , включаючи і початок координат. Оскільки прийнято $\bar{R}_Z(\tau_k)$ при $\tau_k \in (-\infty; \infty)$, введемо його штучне занулення при $\tau_k > 0$.

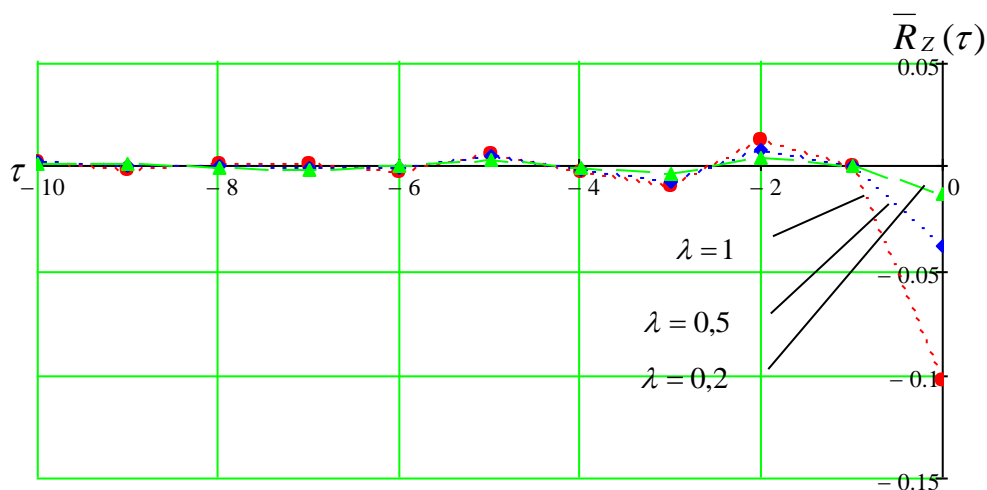
3.5.2. Забарвлений шум.

В разі дії на вхід кореляційної вимірювальної системи з ортогональними фільтрами Лагера забарвленого шуму (див. рис. 3.2) кореляційне перетворення $\bar{R}_Z(\tau_k)$ визначається згідно виразу (3.67). Кореляційне перетворення $\bar{R}_Z(\tau_k)$ в цьому випадку з врахуванням формули (3.68) приймає вигляд

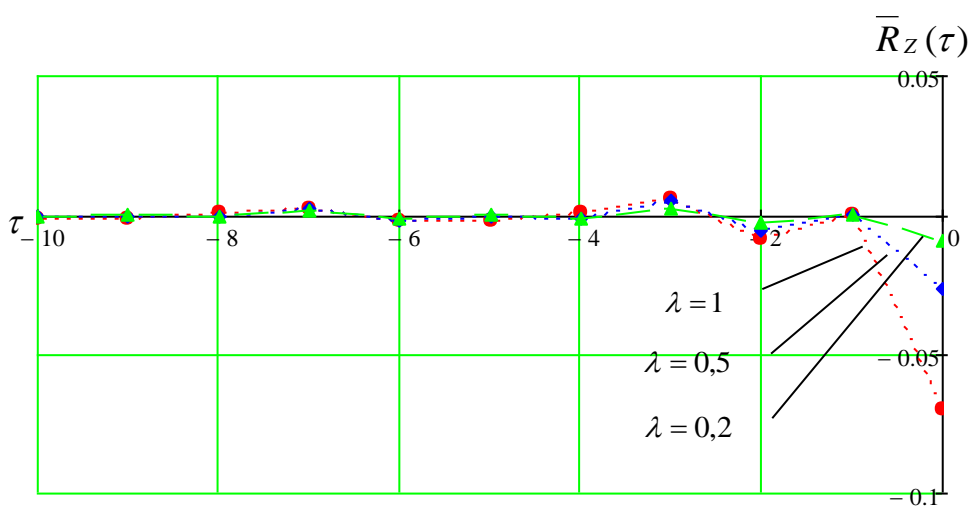
$$\begin{aligned} \bar{R}_Z(\tau_k) &= \kappa_2 \sum_{\tau=0}^{\infty} \frac{u^2 \sin[\omega_0(\tau_k - \tau)]}{\pi(\tau_k - \tau)} (e^\lambda - 1) e^{-\frac{\lambda}{2}(\tau+1)} \tau U(\tau) = \\ &= \frac{\kappa_2 u^2 (e^\lambda - 1)}{\pi e^{\lambda/2}} \sum_{\tau=0}^{\infty} \frac{\tau \sin[\omega_0(\tau_k - \tau)]}{(\tau_k - \tau)} e^{-\frac{\lambda\tau}{2}} \end{aligned} \quad (3.72)$$

Члени цього ряду мають експоненціальний характер зменшення, тому ряд дуже швидко сходиться і зручний для обчислення значень $\bar{R}_Z(\tau_k)$ з допомогою ЕОМ.

З графіків $\bar{R}_Z(\tau_k)$, видно, що із зменшенням ω_0 вплив завад посилюється (рис. 3.13).



а)



б)

Рис. 3.13. Похибки при зміні кореляційного перетворення за рахунок забарвленого шуму у вимірювальній системі з ортогональними фільтрами

$$\text{а) } \omega_0 = \frac{\pi}{2}, \text{ б) } \omega_0 = \frac{3\pi}{4}$$

З формули (3.70) можна отримати залежність $\bar{R}_Z(\tau_k, \omega_0)$ при $\tau_k = 0$ від частоти зрізу ω_0 у вигляді

$$\bar{R}_Z(0, \omega_0) = \frac{\kappa_2 u^2 (e^\lambda - 1) \sin \omega_0}{\pi (1 - 2e^{\lambda/2} \cos \omega_0 + e^{-\lambda})}$$

де $\bar{R}_Z(\tau_k, \omega_0) \equiv \bar{R}_Z(\tau_k)$.

Залежність зміни кореляційного перетворення в залежності від ширини смуги забарвленого шуму показано на рисунку 3.14. Криві починаються з нуля і досягають єдиного максимуму, а потім зменшуються до нуля. Рівність нулю на початку координат пояснюється тим, що первинний шум вироджується в тотожний нуль.

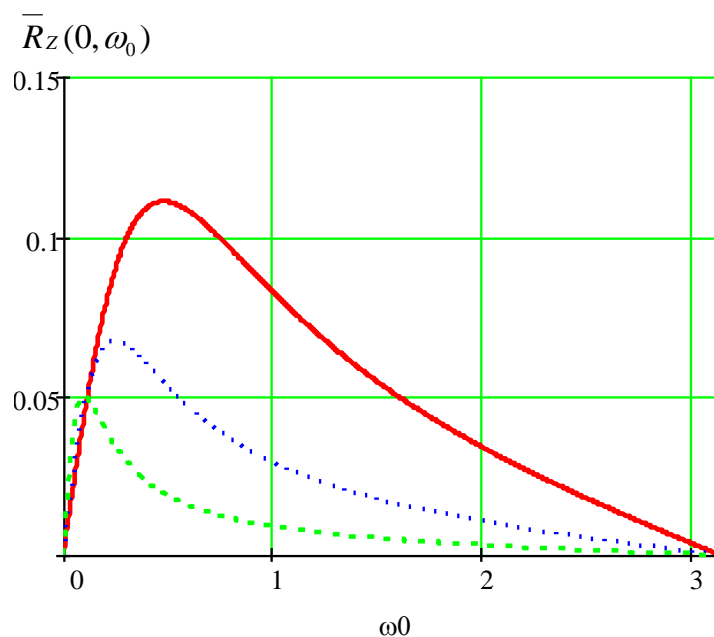


Рис. 3.14. Характер зміни похибки вимірювання кореляційного перетворення при $\tau_k = 0$ в залежності від ширини смуги забарвленого шуму, $\omega_0 = [0.. \pi]$.

Ділянка спаду інтенсивності від максимуму до нуля з'являється завдяки роботі ортогональних фільтрів в каналах кореляційної вимірювальної системи. При $\omega_0 = \pi$ шум стає білим і повністю подавляється ортогональними фільтрами, хоча при цьому

смуга вхідного шуму весь час розширюється, а значить, збільшується його вхідна потужність.

Отже, робота ортогональних фільтрів при $\tau_k = 0$ еквівалентна звуженню смуги білого шуму. В той же час звуження смуги пропускання корисного сигналу не відбувається, оскільки вплив ортогональних фільтрів Лагера враховується і може компенсуватися за допомогою амплітудного коефіцієнта компенсації і кута фазової компенсації.

Все викладене для $\bar{R}_Z(\tau_k)$ при $\tau_k = 0$ може бути перенесено і на інші значення τ_k . Таким чином, графіки рис. 3.13 і 3.14 ілюструють поведінку похибки при вимірюванні $R_Z(\tau_k)$, $\tau_k < 0$, викликаних наявністю на вході адитивної шумової компоненти з рівномірним енергетичним спектром. З малюнків видно, що використання ортогональних фільтрів забезпечує подавлення завади типу забарвленого шуму при вказаних ω_0 .

Якщо потрібне більше подавлення забарвленого шуму з відносно невеликою частотою зрізу ω_0 , то в другому каналі кореляційної вимірювальної системи слід застосовувати складні ортогональні фільтри з відповідними коефіцієнтами як це описано в 4.2.

3.5.3. RC-шум.

Експериментальне дослідження реальних завод типу мікросейсм [73] показало, що в основному вони мають рівномірний енергетичний спектр в деякій смузі частот. Проте при необхідності враховувати вищі компоненти полігармонічних корисних сигналів ми стикаємося з неминучим розширенням спектральної полоси, для якої проводиться аналіз. У такій полосі частот спостерігається спад характеристики енергетичного спектру шуму. Приблизно цей спад носить такий же характер, як в RC-шумі [44]. Проаналізуємо величину зсуву кореляційного перетворення (3.66), викликану RC-шумом. Скориставшись формулою (3.68) з врахуванням виразів в [44], отримуємо

$$\begin{aligned}\bar{R}_Z(\tau_k) &= \kappa_2 \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \frac{u^2 e^{-\alpha|\tau_k-\tau|}}{1-e^{-2\alpha}} e^{-\frac{\lambda}{2}(\tau+1)} (e^\lambda - 1) U(\tau) = \\ &= \frac{\kappa_2 u^2 (e^\lambda - 1)}{e^{\lambda/2} (1 - e^{-2\alpha})} \sum_{\tau=0}^{\infty} \tau \exp\left(-\alpha|\tau_k - \tau| - \frac{\lambda\tau}{2}\right).\end{aligned}$$

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

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = \frac{\kappa_2 u^2 (e^\lambda - 1)}{(1 - e^{-2\alpha}) (e^{(\alpha+\lambda)/2} - e^{-\alpha/2})^2} e^{-\alpha|\tau_k|}, \quad \tau_k \in (-\infty, 0). \quad (3.73)$$

Аналізуючи останній вираз можна сказати наступне при розширенні полоси РС-шуму (збільшенні параметра α) для одних і тих же значень τ_k похибка в системі з ортогональними фільтрами Лагера зменшується в порівнянні з системою без ортогональних фільтрів. Це ілюструється рис. 3.15, де показаний характер зміни відношення $\bar{R}_Z(\tau_k)/R(\tau_k)$ як функції від α (від τ_k це відношення не залежить).

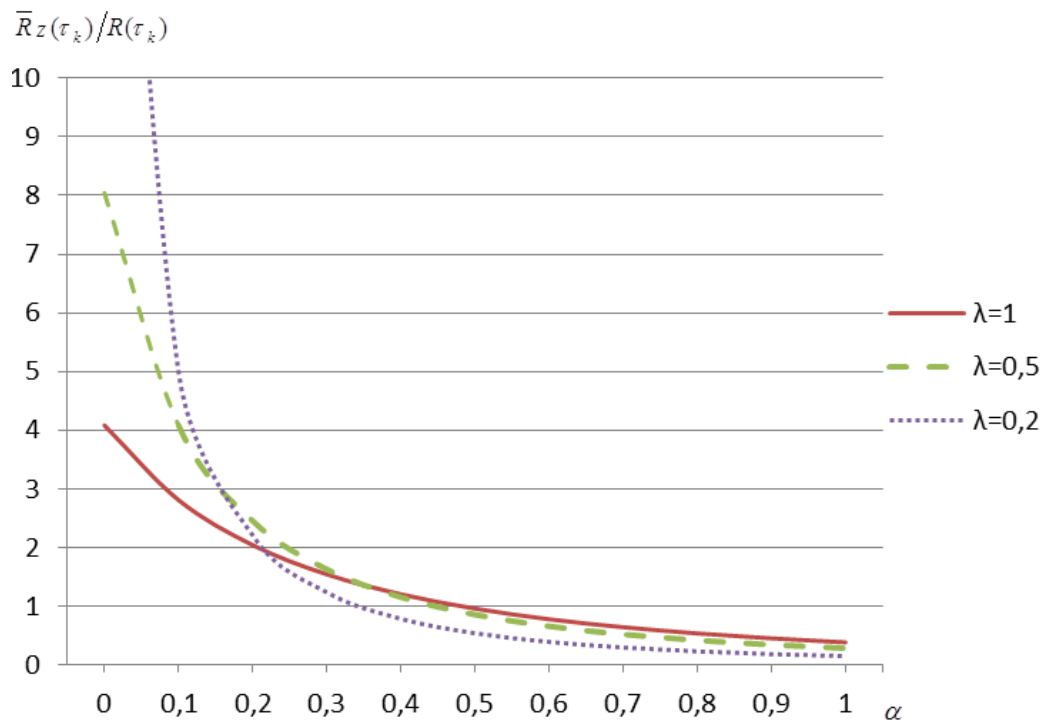


Рис. 3.15. Відношення похибки вимірювання кореляційного перетворення за рахунок РС-шуму

При значеннях $\alpha > 0,5$ для приведених значень e^λ відношення $\bar{R}_Z(\tau_k)/R(\tau_k)$ стає менше одиниці при всіх τ_k , тобто похибка $\bar{R}_Z(\tau_k)$ в системі з ортогональними фільтрами стає меншою чим $R(\tau_k)$ в системі без цих фільтрів.

Запишемо вирази $S_{\bar{R}}(\omega)$ і $S_{\bar{B}}(\omega)$ для випадку RC-шуму. Вираз (3.96) в випадку RC-шуму прийме вигляд

$$S_{\bar{R}}(\omega) = R(0) \sum_{\tau_k=0}^{\infty} e^{-\alpha\tau_k} e^{j\omega\tau_k} = \frac{R(0)}{1 - e^{-\alpha+j\omega}}, \quad (3.74)$$

де

$$R(0) = \frac{\kappa_2 u^2}{1 - e^{-2\alpha}}.$$

Остаточно, отримаємо

$$S_{\bar{R}}(\omega) = \frac{R(0)}{2} \left[\frac{e^\alpha - \cos \omega}{\operatorname{ch} \alpha - \cos \omega} + j \frac{\sin \omega}{\operatorname{ch} \alpha - \cos \omega} \right].$$

З врахуванням співвідношення (3.73) вираз (3.70) набуває вигляду

$$S_{\bar{B}}(\omega) = \frac{R(0)}{2} \frac{e^\alpha - 1}{(e^{(\alpha+\lambda)/2} - e^{-\lambda/2})^2} \left[\frac{e^\alpha - \cos \omega}{\operatorname{ch} \alpha - \cos \omega} + j \frac{\sin \omega}{\operatorname{ch} \alpha - \cos \omega} \right]. \quad (3.75)$$

Таким чином, останні два вирази відрізняються лише множником, що залежить від параметра формуючого фільтра α і лагеровського фільтра λ , тобто ортогональні фільтри не вплинули на фазово-частотну характеристику завади, що вноситься RC-шумом.

3.5.4. RLC-шум.

В тих випадках, коли виникає необхідність попередньої смугової фільтрації полігармонічних корисних сигналів з допомогою резонансних RLC-фільтрів, інтерес представляє порівняльний аналіз роботи кореляційної вимірювальної системи звичайного типу і системи з ортогональними фільтрами Лагера. Проведемо аналіз похибок, викликаних наявністю RLC-шуму на вході системи.

Згідно формули (3.68) отримуємо

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = R(0) \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} e^{-\alpha|\tau_k-\tau|} [\cos(\tau_k - \tau)\theta + E(\theta, \alpha)\sin(\theta|\tau_k - \tau|)] e^{-\frac{\lambda}{2}(\tau+1)} (e^\lambda - 1)U(\tau).$$

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

$$\bar{R}_Z(\tau_k) = R(0)e^{-\alpha|\tau_k|} (A \cos \theta \tau_k + B \sin \theta |\tau_k|), \quad \tau_k \in (-\infty, 0), \quad (3.76)$$

де

$$A = \operatorname{sh} \frac{\lambda}{2} \left\{ \frac{\cos \theta - e^{-\alpha-\lambda/2}}{\left[\operatorname{ch} \left(\alpha + \frac{\lambda}{2} \right) - \cos \theta \right]^2} \left[E(\theta, \alpha) \sin \theta - \cos \theta + e^{\alpha+\frac{\lambda}{2}} \right] - \frac{E(\theta, \alpha) \sin \theta - \cos \theta}{\cos \theta - \operatorname{ch} \left(\alpha + \frac{\lambda}{2} \right)} \right\}, \quad (3.77)$$

$$B = \operatorname{sh} \frac{\lambda}{2} \left\{ \frac{\cos \theta - e^{-\alpha - \lambda/2}}{\left[\operatorname{ch} \left(\alpha + \frac{\lambda}{2} \right) - \cos \theta \right]^2} \left[E(\theta, \alpha) \cos \theta + \sin \theta - e^{\alpha + \lambda/2} E(\theta, \alpha) \right] - \frac{E(\theta, \alpha) \cos \theta + \sin \theta}{\cos \theta - \operatorname{ch} \left(\alpha + \frac{\lambda}{2} \right)} \right\}.$$

Тут $E(\theta, \alpha)$ визначається за формулою $E(\theta, \alpha) = \frac{(e^{2\alpha} - 1) \cdot \sin 2\theta}{(e^{2\alpha} - 1)(1 - \cos 2\theta)}$, $R(0)$ - за формулою дисперсії RLC-шуму.

Запишемо вирази $S_{\bar{R}}(\omega)$ і $S_{\bar{B}}(\omega)$ для випадку RLC-шуму. З врахуванням формул [55] вираз (3.69) приймає остаточний вигляд

$$S_{\bar{R}}(\omega) = \frac{S(\omega) + R(\omega)}{2} + j \frac{R(0)}{4} \left[\frac{E(\theta, \alpha) [e^\alpha - \cos(\omega - \theta)] + \sin(\omega - \theta)}{\operatorname{ch} \alpha - \cos(\omega - \theta)} - \frac{E(\theta, \alpha) [e^\alpha \cos(\omega + \theta)] - \sin(\omega + \theta)}{\operatorname{ch} \alpha - \cos(\omega + \theta)} \right], \quad (3.78)$$

де $S(\omega)$ визначено в [55], $\omega \in [-\pi, \pi)$. З врахуванням співвідношень (3.76) вираз (3.70) приймає вигляд

$$S_{\bar{R}}(\omega) = \frac{R(0)}{4} \left[\frac{A[e^\alpha - \cos \varphi^-] - B \sin \varphi^-}{\operatorname{ch} \alpha - \cos \varphi^-} + \frac{A(e^\alpha - \cos \varphi^+) - B \sin \varphi^+}{\operatorname{ch} \alpha - \cos \varphi^+} \right] + j \frac{R(0)}{4} \left[\frac{B[e^\alpha - \cos \varphi^-] + A \sin \varphi^+}{\operatorname{ch} \alpha - \cos \varphi^+} - \frac{B(e^\alpha - \cos \varphi^+) - A \sin \varphi^+}{\operatorname{ch} \alpha - \cos \varphi^+} \right], \quad (3.79)$$

де $\varphi^+ = \omega + \theta$ і $\varphi^- = \omega - \theta$; $R(0)$ визначається виразом в [55], A і B - виразами (3.77); $\omega \in [-\pi, \pi)$.

Порівнюючи вирази в [55] і (3.76), приходимо до висновку, що вони обидва мають експоненціальну мажоранту з одним і тим же вказівником степеня і гармонійний характер затухаючих коливань, початкові фази яких відрізняються. Це означає, що ортогональна фільтрація при звуженні смуги частот RLC-шуму стає неефективною. Використання для попередньої фільтрації окремих гармонійних компонент полігармонічного сигналу резонансних смугових фільтрів поряд з ортогональною фільтрацією в кореляційних вимірювальних системах практично не призводить до зниження похибок. Рис. 3.16 наочно ілюструє висловлене твердження.

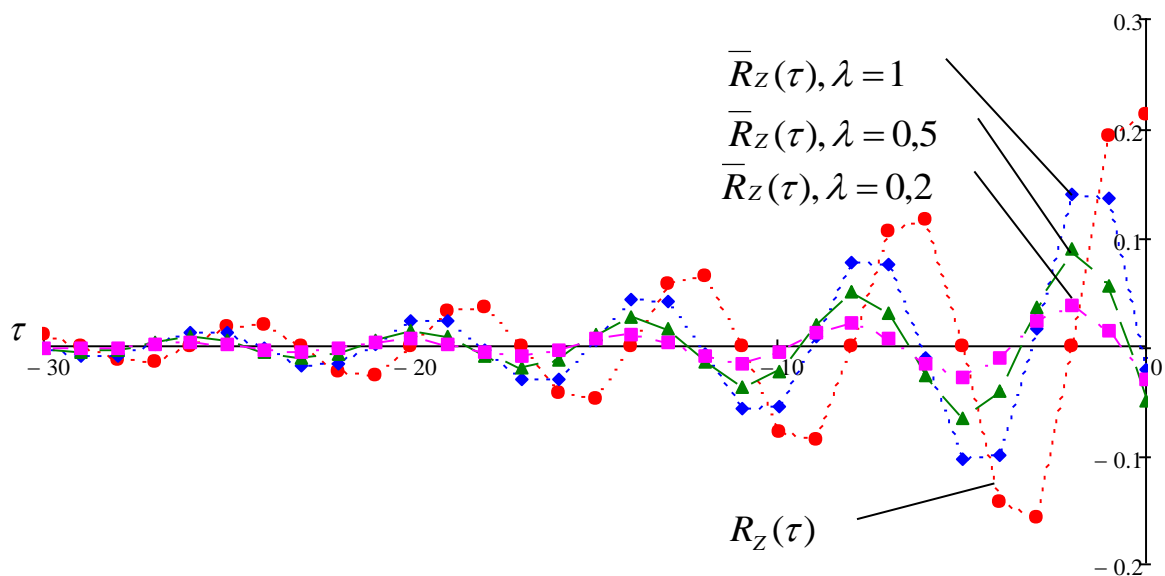


Рис. 3.16. Похибки при вимірюванні кореляційного перетворення за рахунок

$$\text{RLC-шуму } \tau \in \overline{[-30,0]}; \lambda = 1, 0.5, 0.2; \alpha = 0.1; \theta = \frac{\pi}{3}$$

Як показано вище, використання ортогональної фільтрації в кореляторах із смуговими фільтрами дає незначний вигравш в підвищенні завадостійкості всієї системи. Проте попередня смугова фільтрація білого шуму дає гірші результати в порівнянні з ортогональною фільтрацією для виділення полігармонічного сигналу на фоні сейсмічних завад.

3.6. Висновки до розділу 3

Проведений порівняльний аналіз двох кореляційних систем, одна з яких є типовою, а друга включає в свою структуру вхідні ортогональні фільтри при дії тестових сигналів до яких відносять полігармонічні і моногармонічні сигнали дав можливість отримати наступні результати:

1. Введення до структури кореляційних систем ортогональних фільтрів змінює характеристики дії тестових сигналів, але ці зміни можна врахувати з використанням отриманих співвідношень і виразів.

2. Введення додаткових ортогональних фільтрів не дає додаткових похибок при визначенні метрологічних характеристик кореляційних систем.

3. Введення в структуру вхідних ортогональних фільтрів суттєво збільшує ефективність кореляційної системи при виявленні сигналів при дії завад.

4. Отримані результати, а саме аналіз амплітудних і фазових характеристик тестових сигналів свідчить про покращення результатів досліджень кореляційних систем при вирішенні задач сейсмології.

Аналіз проходження адитивної суміші полігармонічного сигналу з різними видами завад, що описуються лінійним випадковим процесом, через кореляційну вимірювальну систему з простими ортогональними фільтрами Лагера 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 Лагера, 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.

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

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

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ОРТОГОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ОБРОБКИ СЕЙСМІЧНИХ СИГНАЛІВ

В розділі розглянуто адаптивний метод обробки сейсмічних завад. Проаналізувано роботу кореляційної системи з вхідними ортогональними фільтрами Лагерра при дії процесу білого шуму з безмежно подільними законами розподілу, як процесу з некорельованими значеннями. Розроблено функціональну структурно-логічну схему кореляційної системи зі складними ортогональними фільтрами Лагерра. Проведено комп'ютерний моделюючий експеримент для обґрунтування зменшення впливу завади на виході кореляційної системи при використанні складних ортогональних фільтрів Лагерра. Розглянуто питання комп'ютерного імітаційного моделювання сейсмічних сигналів і завад. Проведено серію експериментів по обробці зашумлених сигналів кореляційною системою з ортогональними фільтрами Лагера. Розроблено систему комп'ютерних програм для проведення імітаційних експериментів та обробки сейсмічних сигналів на основі запропонованих у дисертаційній роботі методів. Основні результати четвертого розділу опубліковано в роботах [1, 43, 54]

4.1. Адаптивний метод кореляційної ортогональної обробки сейсмічних сигналів

Ідея адаптивного методу відома [3, 5, 37], однак не отримані результати випадку коли в каналах корелятора використовуються вхідні фільтри Лагерра. Ортогональна лагерровська фільтрація стаціонарних шумових завад на відміну від інших ортогональних методів, має принципову унікальну властивість – формувати послідовність некорельованих шумових процесів на значному часовому інтервалі їх взаємного зсуву. Відомі методи дають можливість сформувати некорельовані випадкові процеси тільки у фіксованих точках їх взаємного зсуву по часу.

Адаптивний метод ортогональної лагерровської фільтрації заснований на основі використання складних ортогональних фільтрів Лагерра з відповідними

ваговими коефіцієнтами [154]. Визначення значень вагових коефіцієнтів компонент складного фільтра Лагерра, в залежності від заданої послідовності зменшення значень автокореляційної функції дії стаціонарної шумової завади, проводиться на відповідній послідовності часового зсуву. Цей метод дає можливість суттєво зменшити вплив шумової завади і доповнює відомі методи обробки сигналів, однак має як свої переваги, так і відповідні обмеження свого використання. Це означає, що такий результат є цікавим з теоретичної точки зору. З практичної точки зору використання вхідних складних цифрових фільтрів Лагера забезпечує підвищення SNR на виході статистичної кореляційної системи.

Запропонований метод розглянуто в основному для задач цифрової обробки сигналів з відповідними характеристиками адаптації при практичному використанні кореляційних систем.

Такий метод дає можливість зменшити вплив завади на виході кореляційної системи шляхом підбору коефіцієнтів складного ортогонального фільтра Лагерра при відомій автокореляційній функції вхідної стаціонарної шумової завади.

Основні положення даного методу базуються на наступному:

- використання ортогональної лагерровської фільтрації реальних шумових завад на основі складних цифрових фільтрів Лагерра (складні фільтри Лагерра) з відповідними ваговими коефіцієнтами;

- визначення автокореляційної функції вхідної шумової завади для формування на заданій послідовності зменшення значень цієї функції на відповідній послідовності часового зсуву;

- визначення вагових коефіцієнтів компонент складного фільтра Лагерра в залежності від заданої послідовності зменшення значень взаємнокореляційної функції шумової завади на виході системи;

- отримання зменшених значень взаємної кореляційної функції реальної шумової завади на виході статистичної кореляційної системи.

Зупинимося на більш детальному обґрунтуванні вказаних вище положень.

Функціональна структурно-логічна схема статистичної кореляційної системи зі складними фільтрами Лагерра представлена на рис. 4.1. Сам фільтр складається із

послідовності фільтрів Лагерра, що з'єднані між собою паралельно і в кожному з них незалежно формуються відгуки при дії завади.

Використання адаптивного методу на практиці передбачає етап навчання, який полягає в наступному. При заданій статистичній оцінці кореляційної функції завади $r_0(s_j)$ визначається частотний діапазон шляхом знаходження спектральної щільності завади і вибираються відповідні параметри λ складних фільтрів Лагерра. Обґрунтовується і задається послідовність значень відгуків автокореляційної ортогональної системи, які необхідно зменшити до нульового значення. Ця послідовність в свою чергу використовується для формування порядку складного фільтру Лагерра в залежності від кількості точок занулення, тобто визначається число компонент такого фільтра.

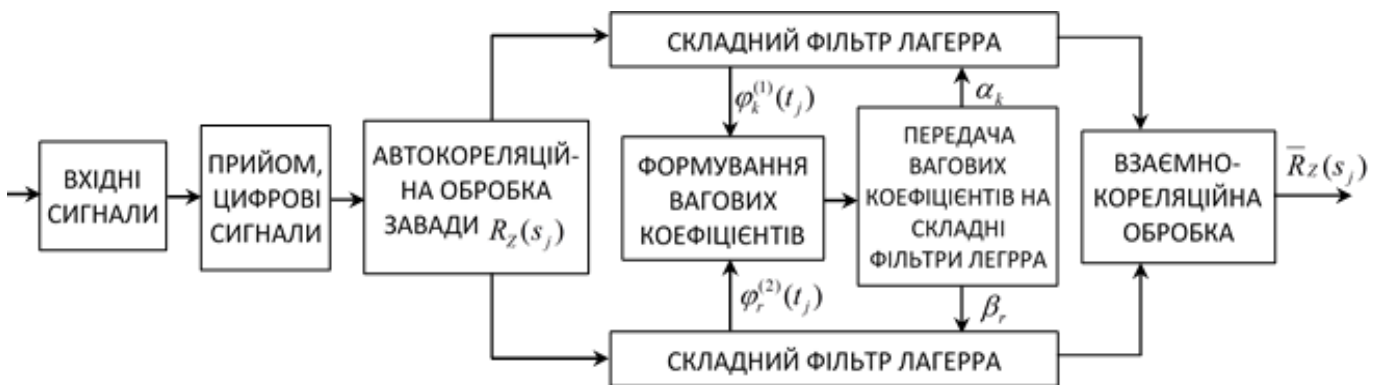


Рис. 4.1. Структурно-логічна схема статистичної кореляційної системи при реалізації адаптивного методу

На вхід структурно-логічної схеми (рис. 4.1.) впливають оцифровані сигнали, які представляють адитивну суміш шумової $\xi(t)$ і корисної $Q(t)$ компонент. Передбачається, що кореляційна функція завади $R_Z(s)$ визначена одним з вказаних вище способів заздалегідь, на попередньому етапі вимірювання шуму $\xi(t)$. В каналах такої системи встановлені складні цифрові ортогональні фільтри з імпульсними перехідними характеристиками $\psi_1(t_j)$ і $\psi_2(t_j)$ які в загальному випадку можуть бути представлені у вигляді

$$\begin{aligned}\psi_1(t_j) &= \sum_{k=1}^m \alpha_k \varphi_k^{(1)}(t_j), t_j \in \overline{[1, N]} \\ \psi_2(t_j) &= \sum_{r=1}^n \beta_r \varphi_r^{(2)}(t_j), m+n \leq N\end{aligned}\quad (4.1)$$

При цьому N - кількість відліків імпульсних перехідних характеристик; $\overline{[1, N]}$ - інтервал ортогональності $\{\varphi_k^{(1)}(t_j), \varphi_r^{(2)}(t_j), k \in \overline{[1, m]}, r \in \overline{[1, n]}\}$ - система ортонормованих функцій, $\{\alpha_k, \beta_r, k \in \overline{[1, m]}, r \in \overline{[1, n]}\}$ - дійсні вагові коефіцієнти $\varphi_k^{(1)}(t_j) \neq \varphi_r^{(2)}(t_j); \alpha_k \varphi_k^{(1)}(t_j) \neq 0; \beta_r \varphi_r^{(2)}(t_j) \neq 0, k \in \overline{[1, m]}, r \in \overline{[1, n]}$. Передбачається що

$$\sum_{k=1}^m \alpha_k^2 = 1; \sum_{r=1}^n \beta_r^2 = 1 \quad (4.2)$$

Це забезпечує ортонормованість імпульсних перехідних характеристик $\psi_1(t_j)$ і $\psi_2(t_j)$. Кожен з фільтрів з імпульсними перехідними характеристиками (4.1) представляє собою систему цифрових ортогональних фільтрів відповідно m для першого каналу і n - для другого. На практиці зручно брати $m=1$. Взаємне кореляційне перетворення двох імпульсних перехідних характеристик (4.1) визначається таким чином:

$$h_{12}(\tau) = \begin{cases} \sum_{t_j=1}^{N-\tau} \psi_1(t_j) \psi_2(t_j + \tau), \tau \in \overline{[0, N-1]} \\ \sum_{t_j=1}^{N-|\tau|} \psi_2(t_j) \psi_1(t_j + |\tau|), \tau \in \overline{[-N+1, 0]}\end{cases} \quad (4.3)$$

Тоді

$$\begin{aligned}\overline{R}_Z(s) &= \mathfrak{a}_2 \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} \varphi_0(\tau_1) \varphi_1(\tau - \tau_1) \varphi_0(\tau_2) \varphi_2(\tau + s - \tau_2) = \\ &= \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R(\tau) h_{12}(s - \tau) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} h_{12}(\tau) R(s - \tau)\end{aligned}$$

на виході спектрально-кореляційної вимірювальної системи з такими фільтрами маємо

$$\bar{R}_Z(s) = \sum_{\tau=1-N}^{N-1} h_{12}(\tau) R_Z(s - \tau), s \in \overline{(-\infty, \infty)} \quad (4.4)$$

Ввівши позначення

$$h_{12}(\tau) = \begin{cases} \sum_{t_j=1}^{N-\tau} \varphi_k^{(1)}(t_j) \varphi_r^{(2)}(t_j + \tau), \tau \in \overline{[0, N-1]} \\ \sum_{t_j=1}^{N+\tau} \varphi_r^{(2)}(t_j) \varphi_k^{(1)}(t_j - \tau), \tau \in \overline{[1-N, 0]} \end{cases} \quad (4.5)$$

З врахуванням співвідношень (4.1) і (4.14) вираз (4.4) запишемо у вигляді

$$\bar{R}_Z(s) = \sum_{\tau=1-N}^{N-1} \sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^n \alpha_k \beta_r h_{k,r}^{(1,2)}(\tau) R_Z(s - \tau), s \in \overline{(-\infty, \infty)} \quad (4.6)$$

Необхідно шляхом підбору постійних α_k і β_r в виразі (4.1) отримати нульові значення $\bar{R}_Z(s)$ на множині точок $s \in \overline{[0, G]}$, де G повинне бути не менше одного періоду корисного сигналу, $G < N$ а m і n підбираються виходячи із значень s . Для цього необхідно розв'язати систему рівнянь (4.6) при $s \in \overline{[0, G]}$ відносно невідомих α_k і β_r , підбираючи m і n таким чином, щоб кількість рівнянь дорівнювала числу невідомих. Очевидно, що через приведені вище викладення система з ортогональними фільтрами (4.1) даватиме по заваді на множині зсувів $s \in \overline{[0, G]}$ нульові значення $\bar{R}_Z(s)$. Незавжди переконалися, що взаємне кореляційне перетворення полігармонічного сигналу на виході такої системи перетворюється в нуль у вказаних точках, оскільки воно не співпадає з $\bar{R}_Z(s)$ — кореляційним перетворенням завади, яке служить оцінкою кореляційної функції завад.

Природно, що побудовані таким чином лінійні фільтри з імпульсними перехідними характеристиками виду (4.1) внесуть амплітудні і фазові спотворення в кореляційні перетворення вимірюваних полігармонічних сигналів. Ці спотворення, як і у випадку фільтрів Лагера розглянутих в 3 розділі, можуть компенсуватися.

Кореляційна система з вхідними складними фільтрами Лагерра є адаптивною до:

- виду та значення інтенсивності вхідної шумової стаціонарної завади, що враховується її автокореляційною функцією;
- частотного діапазону досліджуваних завад, який визначається вибором параметра λ складних фільтрів Лагерра;
- числа каналів двох складних фільтрів Лагерра, що дає можливість отримати $2m(n-1)$ значень послідовності зменшення кореляційної функції на виході системи.

Реалізація такої функціональної структурно-логічної схеми дає можливість практичного використання складних ортогональних фільтрів Лагерра для зменшення відношення сигнал/завада.

4.2. Результати комп'ютерного моделювання адаптивного методу ортогональної лагерровської фільтрації шумових завад

Розглянемо розрахунок параметрів імпульсних перехідних характеристик складних фільтрів з використанням даних сейсмічних завад.

Комп'ютерний моделюючий експеримент проводився з використанням середовища Visual C++.

Реалізація комп'ютерного моделювання з використанням адаптивного методу була проведена для реальної шумової завади, яка належить до класу RLC шумів. Даний клас шумових завад формується в типових ланках радіоелектронних систем.

Для проведення експерименту виконані наступні дії:

1. Отримано одну з реалізацій випадкового процесу. Для цього була використана функція `rnd()` для отримання нормального розподілу псевдовипадкових величин

Вихідні дані:

Об'єм вибірки: $N=10000$.

Математичне сподівання $M\xi = 0$

Дисперсія $D\xi = 1$

Графік отриманої реалізації наведено на рис. 4.2.

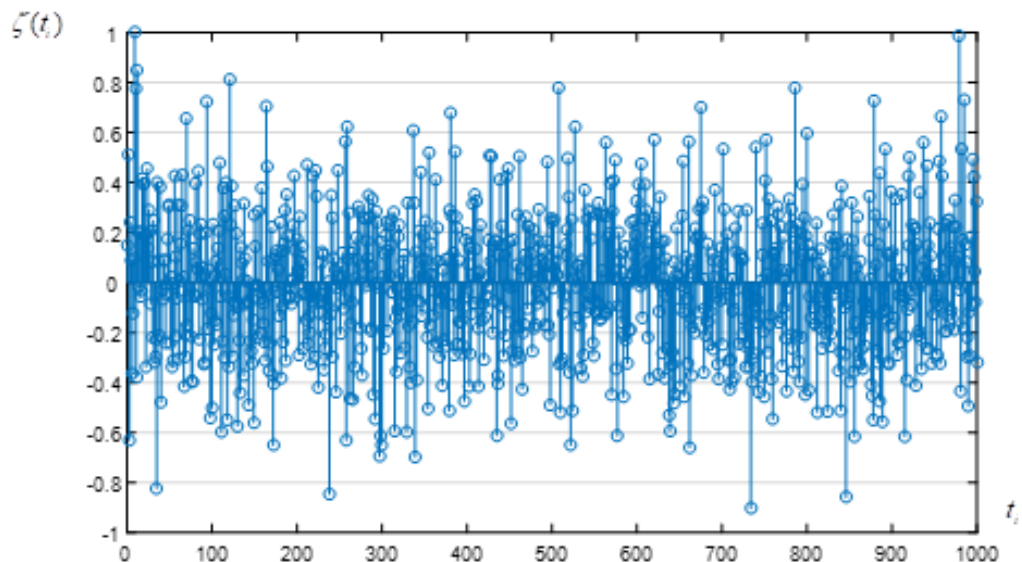


Рис. 4.2. Реалізація дискретного випадкового процесу (перші 1000 значень)

Обчислено оцінки математичного сподівання та дисперсії, що становили $M\xi = 0,0004$ та $D\xi = 0,9726$ відповідно.

Графік оцінки кореляційної функції однієї з реалізацій білого шуму $R(s)$, де $s \in (0,10)$ зображений на рис. 4.3.

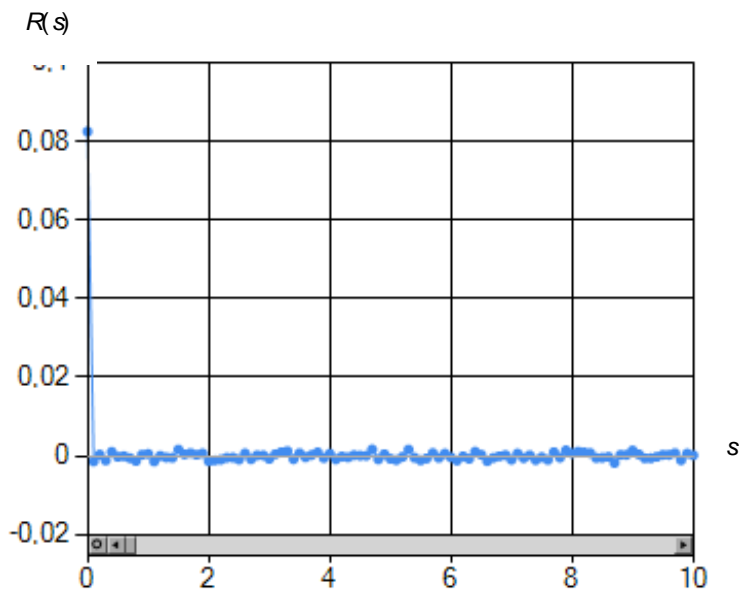


Рис. 4.3. Графік оцінки кореляційної функції однієї з реалізацій білого шуму

$R(s)$

Отримані статистичні характеристики реалізації білого шуму підтверджують доцільність використання такого генератора для отримання вибірки значень з гауссовим законом розподілу. На основі отриманої реалізації буде проводитися подальше дослідження.

2. На основі вибірки значень з гауссовим законом розподілу було сформовано реалізацію RLC – шуму (Рис. 4.4.) для навчання фільтра

Вихідні дані:

Реалізація базового білого шуму.

Об'єм вибірки: $N=10000$.

Імпульсна перехідна функція RLC фільтра: $\varphi_0(t_j) = e^{-\alpha_j} \sin 2\pi f t_j$, $j = [0, N]$.

Параметр формуючого фільтра: $\alpha = 0,1$.

Частота: $f = 0,17$.

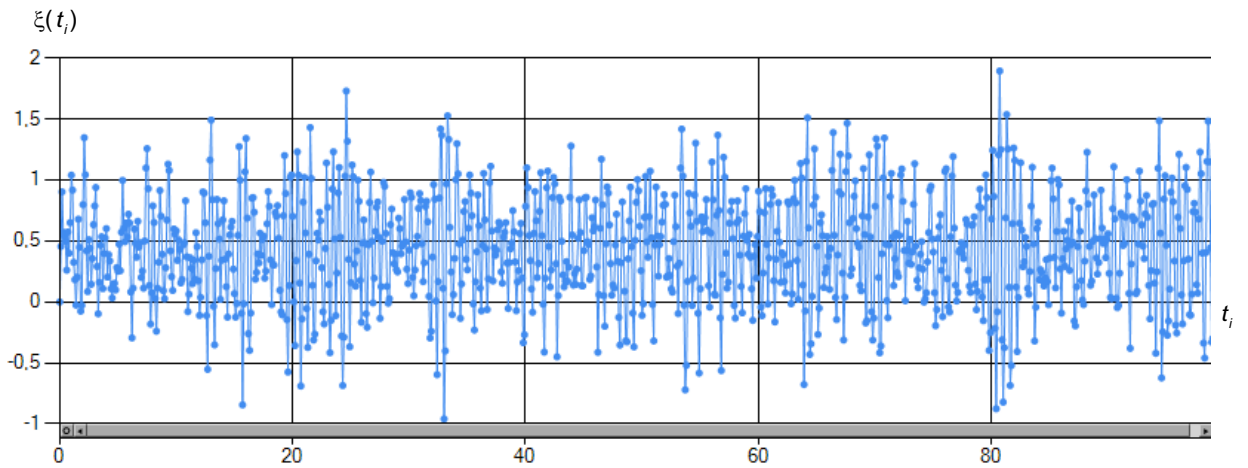


Рис. 4.4. Реалізація RLC шуму (перші 100 значень)

Графік оцінки автокореляційної функції реалізації RLC шуму $\tilde{r}_0(s_j)$, де $s_j \in (0, 50)$, зображений на рис. 4.5.

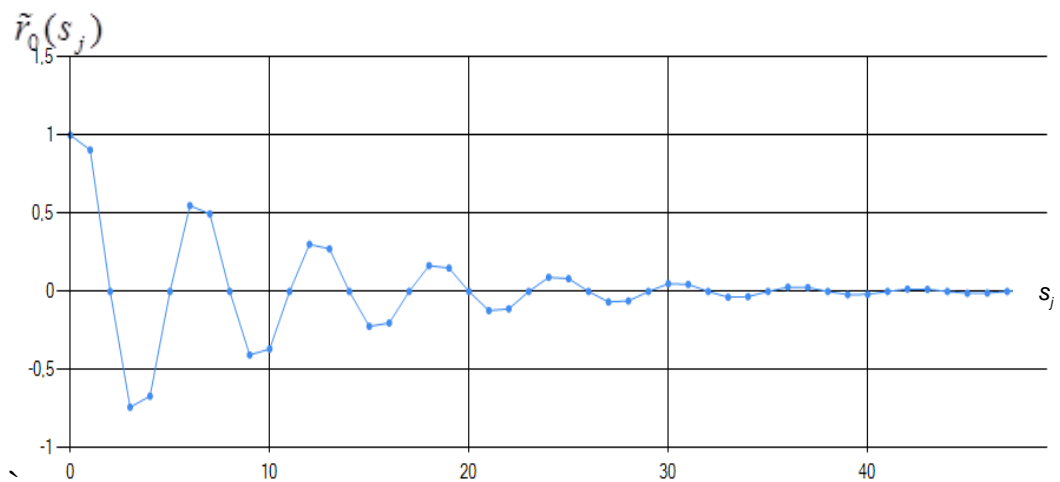


Рис. 4.5. Графік статистичної оцінки нормованої автокореляційної функції вхідної шумової завади на етапі навчання.

Як видно з отриманого графіку, автокореляційна функція шумової завади має досить великі значення, що впливає на відношення сигнал/завада на виході системи. Для того, щоб зменшити вплив завади в результаті експерименту, були зроблені наступні дії.

3. Обчислено оцінки вагових коефіцієнтів β_r на основі використання формули (4.6).

Вихідні дані:

Оцінка значень кореляційної функції RLC – шуму $\tilde{r}_0(s_j)/$

Кількість точок занулення – 15.

Параметр складного фільтра Лагерра $\lambda = 0,1$;

$m = 1$;

$n = 16$;

$\alpha_k = \alpha_1 = 1$;

$r \in [2, 16]$.

Значення взаємнокореляційної функції на етапі навчання необхідно прирівняти до $r_{mn}(s_j) = 0$ на діапазоні $s_j \in (0, 15)$.

Було визначено матрицю коефіцієнтів при невідомих β_r в системі з 15 лінійних рівнянь (рис. 4.6.).

	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14
▶	-1.959...	-3,18...	-3,352...	-2,028...	1,714...	8,376...	0,0001...	0,000...	-0,0001...	-0,0007...	-5,1103...	0,00626...	0,00867...	-0,13818...	0,361437...
	-3,473...	-6,18...	-8,260...	-9,699...	-9,262...	-4,381...	7,7506...	0,000...	0,0002...	-0,0005...	-0,0018...	0,00232...	0,02927...	-0,01155...	0,519029...
	-5,133...	-9,77...	-0,000...	-0,000...	-0,000...	-0,000...	-0,0006...	-0,00...	-0,0014...	-0,0038...	-0,0116...	-0,0308...	-0,0588...	-0,15743...	-0,49095...
	0,0004...	0,00...	0,0011...	0,001...	0,002...	0,003...	0,0048...	0,008...	0,0141...	0,02576...	0,0461...	0,07917...	0,14146...	0,272774...	-0,33265...
	-0,002...	-0,00...	-0,005...	-0,007...	-0,010...	-0,014...	-0,0206...	-0,02...	-0,0439...	-0,0640...	-0,0915...	-0,1269...	-0,1562...	-0,04714...	-0,27609...
	0,0070...	0,01...	0,0173...	0,022...	0,029...	0,037...	0,0484...	0,062...	0,0793...	0,09872...	0,1174...	0,12508...	0,09706...	0,075897...	0,252417...
	-0,014...	-0,02...	-0,034...	-0,042...	-0,052...	-0,062...	-0,0740...	-0,08...	-0,0968...	-0,1040...	-0,1023...	-0,0869...	-0,0730...	-0,11692...	0,333502...
	0,0202...	0,03...	0,0462...	0,055...	0,064...	0,072...	0,0793...	0,083...	0,0834...	0,07741...	0,0652...	0,05201...	0,04102...	-0,04688...	0,149602...
	-0,020...	-0,03...	-0,044...	-0,052...	-0,057...	-0,060...	-0,0605...	-0,05...	-0,0512...	-0,0422...	-0,0325...	-0,0219...	7,28297...	-0,00061...	-0,15850...
	0,0143...	0,02...	0,0305...	0,034...	0,035...	0,035...	0,0324...	0,028...	0,0228...	0,01735...	0,0113...	0,00413...	0,00686...	0,057517...	-0,25925...
	-0,006...	-0,01...	-0,014...	-0,015...	-0,015...	-0,014...	-0,0121...	-0,00...	-0,0074...	-0,0047...	-0,0023...	-0,0030...	-0,0072...	0,046737...	-0,10655...
	0,0022...	0,00...	0,0044...	0,004...	0,004...	0,003...	0,0032...	0,002...	0,0014...	0,00078...	0,0011...	0,00095...	-0,0087...	-0,00344...	0,116210...
	-0,000...	-0,00...	-0,000...	-0,000...	-0,000...	-0,000...	-0,0004...	-0,00...	-0,0001...	-0,0003...	-4,0975...	0,00186...	-0,0026...	-0,04162...	0,192330...
	2,1682...	-2,01...	-1,731...	-4,423...	-7,554...	-8,928...	-4,9788...	5,707...	0,0001...	-8,4947...	-0,0004...	0,00113...	0,00485...	-0,03481...	0,078889...
	-1,714...	-2,78...	-3,415...	-4,482...	-6,831...	-0,000...	-0,0001...	-7,09...	8,0862...	0,00011...	-0,0004...	-0,0005...	0,00653...	0,002578...	-0,08608...

Рис. 4.6. Значення коефіцієнтів рівнянь при невідомих β_r ,

Використовуючи отримані коефіцієнти було визначено значення коефіцієнтів β_r (рис. 4.7.).

β
1,42360607...
-1,2394710...
0,80873076...
-0,4112357...
0,16452147...
-0,0516784...
0,01262723...
-0,0023620...
0,00033034...
-3,3367247...
2,31187773...
-1,0122319...
2,41671748...
-2,2299045...
0,5

Рис. 4.7. Значення коефіцієнтів β_r

Необхідно перевірити правильність обчислення значеннями коефіцієнтів β_r . Для перевірки роботи фільтра достатньо визначити значення взаємнокореляційної функції $r_{mn}(s_j)$ з використанням отриманих коефіцієнтів β_r (рис.4. 8.).

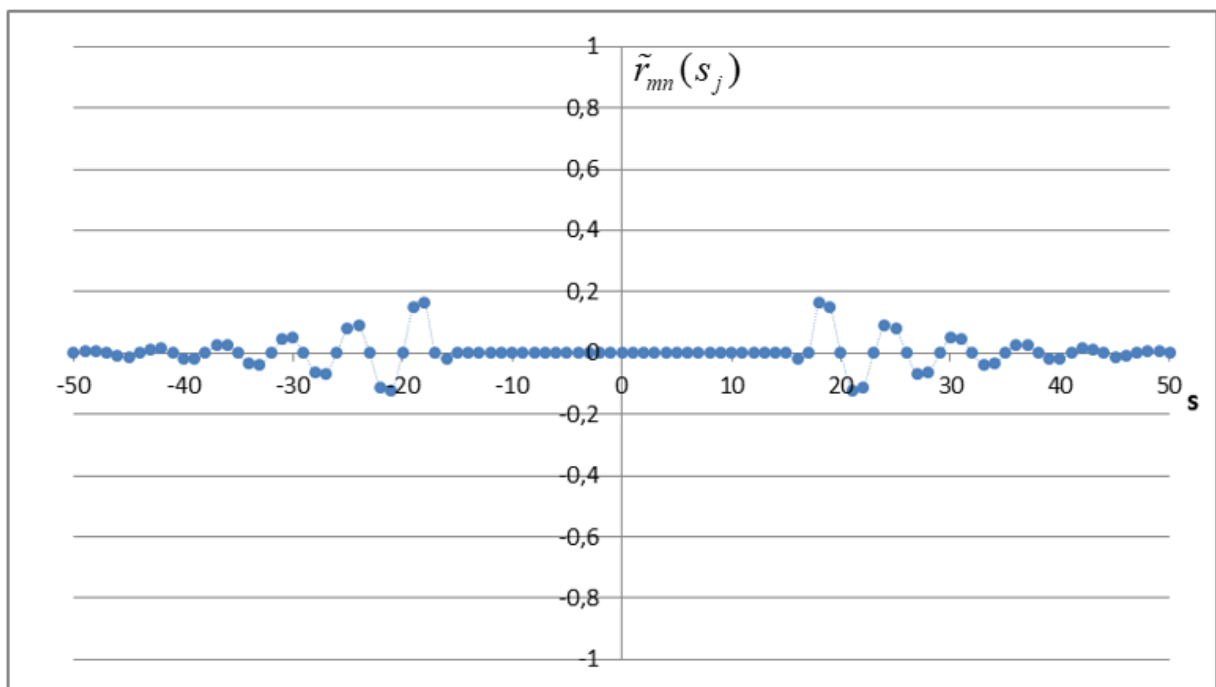


Рис. 4.8. Графік статистичної оцінки відгуку нормованої кореляційної системи з складними фільтрами Лагерра при дії шумової завади на етапі навчання

З побудованого графіку видно, що використовуючи дані коефіцієнти складний ортогональний фільтр повністю подавляє заваду оскільки $r_{mn}(s_j) = 0$ в точках $s_j \in (-15, 15)$

Отже, для даного експерименту був проведений етап навчання. У подальшому для шумових завад аналогічного типу можна використовувати обчислені коефіцієнти складного ортогонального фільтру Лагерра для обчислення значень взаємної кореляційної функції.

Для експериментального знаходження взаємної кореляційної функції було зроблено наступне.

4. Було повторно згенеровано RLC шум з аналогічними параметрами.

5. За допомогою обчислених коефіцієнтів β_r складного ортогонального фільтру Лагерра було обчислено значення взаємнокореляційної функції $r_{mn}(s_j)$ (рис. 4.9.).

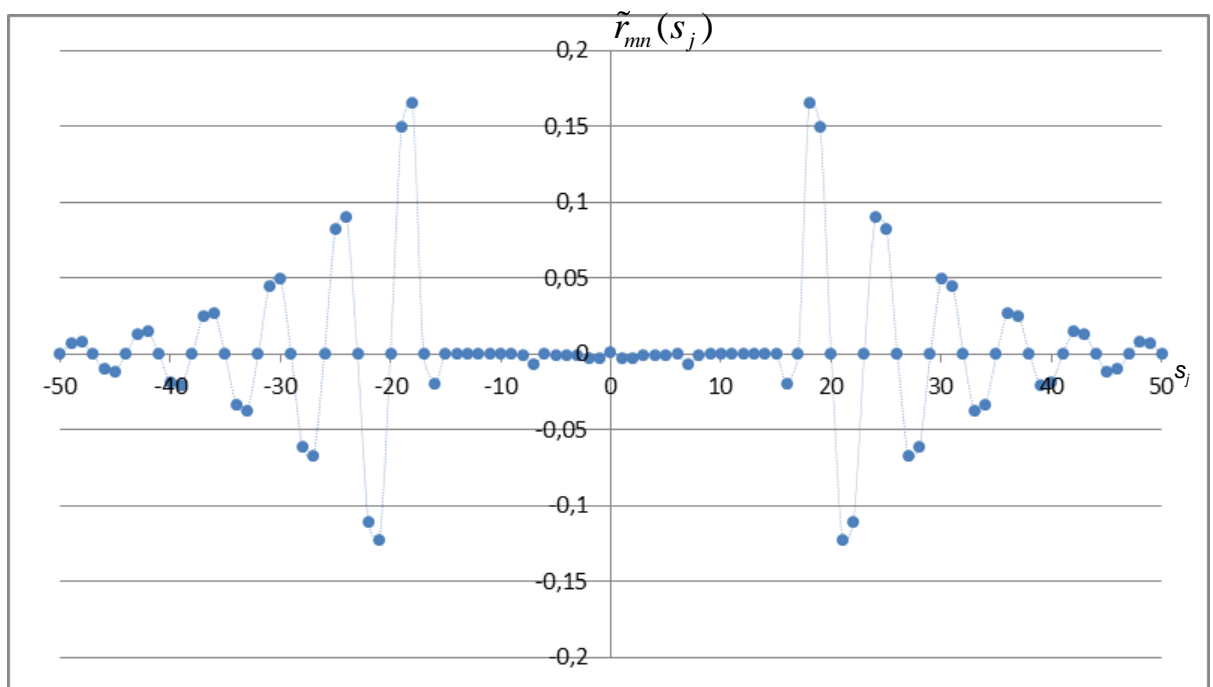


Рис. 4.9. Графік статистичної оцінки відгуку нормованої кореляційної системи з складними фільтрами Лагерра при дії шумової завади на етапі використання

З рис. 4.9. видно роботу складного ортогонального фільтра Лагерра на множині точок $s_j \in (-15, 15)$. На даному діапазоні значення $r_{mn}(s_j)$ не дорівнюють 0, оскільки неможливо абсолютно точно згенерувати ідентичні завади. Аналогічно відбувається і при практичному використанні адаптивного методу.

4.3. Оцінювання ефективності адаптивного методу зменшення впливу шумових завад

Для оцінювання ефективності адаптивного методу зменшення впливу шумових завад використаємо вирази для обчислення наступних числових коефіцієнтів ефективності з використанням значень взаємної кореляційної функції $r_{mn}(s_j)$ на інтервалі часових зсувів $s_j \in [-P, P]$:

$$A_1 = 10 \cdot \lg \frac{\frac{1}{2P} \sum_{j=-r}^r |\tilde{r}_{mn}(s_j)|}{\frac{1}{2P} \sum_{j=-r}^r |\tilde{r}_0(s_j)|} \quad (4.7)$$

$$A_2 = 10 \cdot \lg \frac{\sqrt{\frac{1}{2P} \sum_{j=-r}^r \tilde{r}_{mn}^2(s_j)}}{\sqrt{\frac{1}{2P} \sum_{j=-r}^r \tilde{r}_0^2(s_j)}} \quad (4.8)$$

В більшій мірі теоретично обґрунтовано використання виразу (4.8).

В результаті експерименту були отримані наступні значення коефіцієнтів ефективності системи.

Для множини точок $s_j \in (-50, 50)$

$$A_1 = -5,89984 \text{ дБ,}$$

$$A_2 = -5,90125 \text{ дБ,}$$

а для множини $s_j \in (-15, 15)$

$$A_1 = -16,47063 \text{ дБ},$$

$$A_2 = -16,48631 \text{ дБ}.$$

Отримані числові дані підтверджують факт зменшення впливу шумової завади відповідно на -6 дБ та -16 дБ.

4.4. Результати використання адаптивного методу ортогональної лагерровської фільтрації

Наведено обґрунтування кореляційної системи з використанням складних фільтрів Лагерра. Для цього були наведені теоретичні відомості аналогової та цифрової лагерровської фільтрації. Треба зазначити, що на сьогодні складні фільтри Лагерра не використовувалися на практиці. Через це автори запропонували адаптивний метод ортогональної лагерровської фільтрації з наведенням основних його положень. Використання адаптивного методу ортогональної лагерровської фільтрації дає можливість сформувати некорельовані лінійні стаціонарні випадкові процеси на півосі їх взаємного часового зсуву, які описують широке коло реальних шумових завад. Цим даний метод суттєво відрізняється від відомих раніше методів.

Особливістю застосування методу адаптивної ортогональної лагерровської фільтрації при використанні цифрового варіанту обробки досліджуваних сигналів є те, що він дає можливість не вирішувати цілу низку апаратних проблем створення відповідних аналогових модулів кореляційної системи.

Перевагами методу є наступні:

1. Теоретичне обґрунтування на основі використання результатів теорії ортогональних функцій і випадкових процесів включаючи ЛВП.

2. Вирішення прикладних задач з використанням:

– відомих результатів теорії і практики обробки стаціонарних шумових завад, тому що сигнали і завади створюють нестационарні комбінації, і це в значній мірі обмежує коло методів досліджень, а стаціонарні шумові завади є типовими для більшості прикладних задач;

– цифрового варіанту методу як алгоритму роботи кореляційної системи і реалізації концепції модель – алгоритм – програма при комп'ютерному моделюванні;

– зменшення впливу шумових завад описуваних стаціонарним ЛВП для оцінювання SNR;

– унікальності ортогональної Лагерровської фільтрації процесу стаціонарного білого шуму – формувати послідовність некорельованих шумових процесів на значному часовому інтервалі їх взаємного зсуву;

– потенційної можливості на основі моделі ЛВП проводити дослідження шумових завад не тільки в рамках кореляційної теорії, але із застосуванням вищих моментів;

– імпульсних перехідних функцій лінійних формуючих фільтрів.

До обмежень використання адаптивного методу можна віднести:

1. Фільтри Лагерра є фільтрами нижніх частот, що звужує частотний діапазон досліджуваних шумових завад.

2. Для визначення SNR необхідно проводити додаткові дослідження з урахуванням перетворень сигналів у ланках кореляційної системи з вхідними фільтрами Лагерра.

3. Для практичного використання методу необхідно провести етап навчання до вхідної шумової завади.

4. В кожному конкретному випадку необхідно оцінити ефективність методу і прийняти рішення про його застосування з урахуванням:

– нескінченного інтервалу ортогональності поліномів Лагерра заміненого на скінченний;

– зміни значень поліномів Лагерра дискретного аргументу при їх квантуванні;

– незміщеності і ефективності отриманих статистичних оцінок взаємної кореляційної функції

Предметними областями застосування методу є статистична гідроакустика, геофізика і радіофізика. Метод може бути використаний в відбродіагностиці і неруйнівному контролі технічних систем, а також в шумометрії, яка є актуальним напрямом теорії і практики сучасних інформаційних технологій вимірювань.

Для підтвердження доцільності використання адаптивного методу з ортогональною лагерровською фільтрації був реалізований комп'ютерний моделюючий експеримент. По результатам прикладу розрахунку параметрів імпульсних перехідних характеристик з ортогональними фільтрами Лагерра можна зробити такий висновок. Якщо використовувати наперед задану заваду, то можна розрахувати систему ортонормованих функцій Лагерра дискретного аргументу. Значення цих функцій дозволяє побудувати фільтр, що дає можливість визначати характеристики кореляційного перетворення корисного сигналу в деякому діапазоні зсувів.

Таким чином, на основі використання адаптивного методу ортогональної лагерровської фільтрації, маємо можливість створювати кореляційні системи для зменшення впливу стаціонарних шумових завад.

4.5. Програмний комплекс моделювання і визначення характеристик сигналів сейсморозвідки

Заключним етапом дисертаційної роботи є створення системи комп'ютерних програм для імітаційного моделювання і обробки сейсмічних сигналів, оскільки математичні моделі і методи обробки сейсмічних сигналів мають мати впровадження у практику у вигляді програмного забезпечення для комп'ютерної системи обробки даних сейсмічних експериментів.

На базі розроблених математичних моделей і методів обробки, для проведення практичних досліджень було розроблено програмний комплекс для моделювання і обробки сейсмічних сигналів.

Система програм реалізує наступні функції:

1. Моделювання сейсмічних сигналів (корисних і випадкових завад) з метою тестування алгоритмів обробки сейсмічних сигналів і визначення їх ефективності.
2. Реалізація методів типової кореляційної обробки і кореляційної обробки з попередньою ортогональною фільтрацією.
3. Реалізація адаптивного методу обробки сейсмічних завад на базі складних ортогональних фільтрів Лагера.
4. Визначення співвідношень сигнал/завада для визначення ефективності роботи ортогональних фільтрів.

Структура програмного комплексу наведена на рис. 4.10.

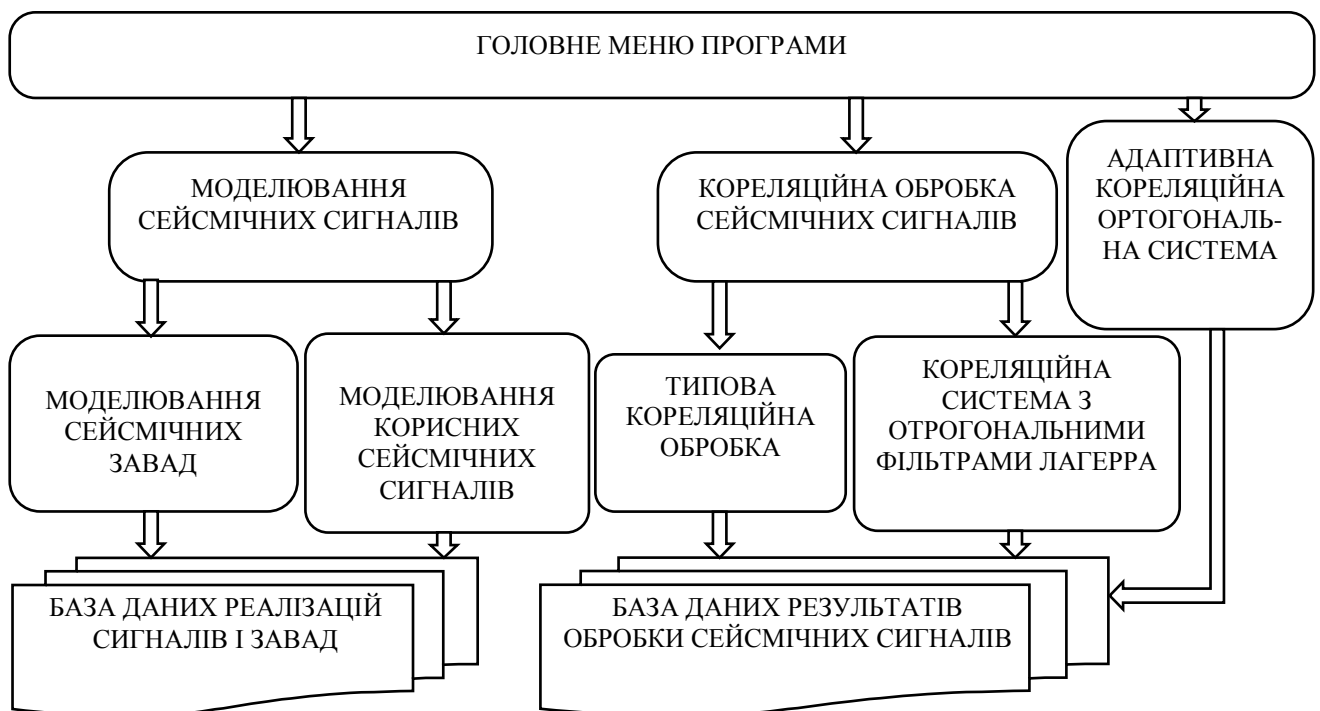


Рис. 4.10. Структурна схема програмного комплексу для моделювання і обробки сигналів сейсмозвідки

Система комп'ютерних програм має модульну структуру, що дозволяє легко проводити її модифікації в залежності від потреб.

4.5.1. Результати обробки сигналів кореляційною ортогональною системою

На основі розглянутого методу проведено серію імітаційних експериментів на ЕОМ по моделюванню сейсмічних сигналів різної форми з різними співвідношеннями сигнал/завада.

В якості моделі корисного сейсмічного сигналу використовується сигнал описаний в розділі 2.3. На наступному рисунку зображено графіки змодельованих полігармонічних затухаючих сигналів

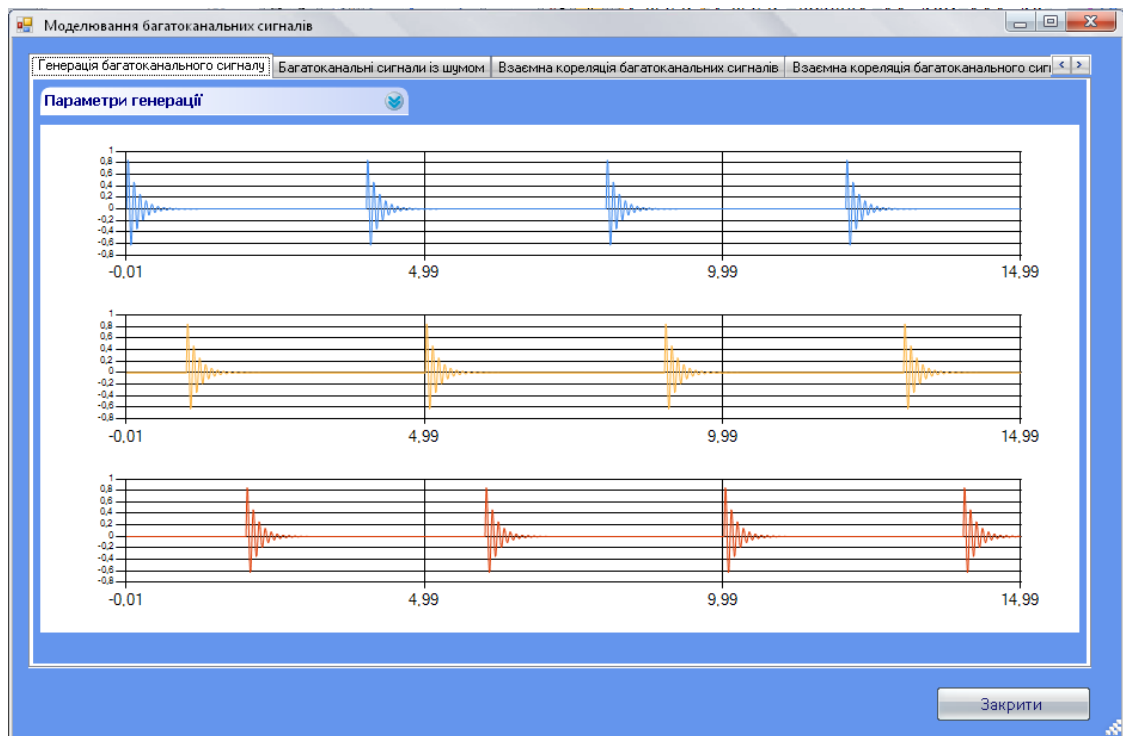


Рис.4.11. Моделювання корисних сигналів.

Результати дослідження роботи кореляційної ортогональної системи, яка описана в розділі 3.5 приведені на рисунках 4.12-4.15.

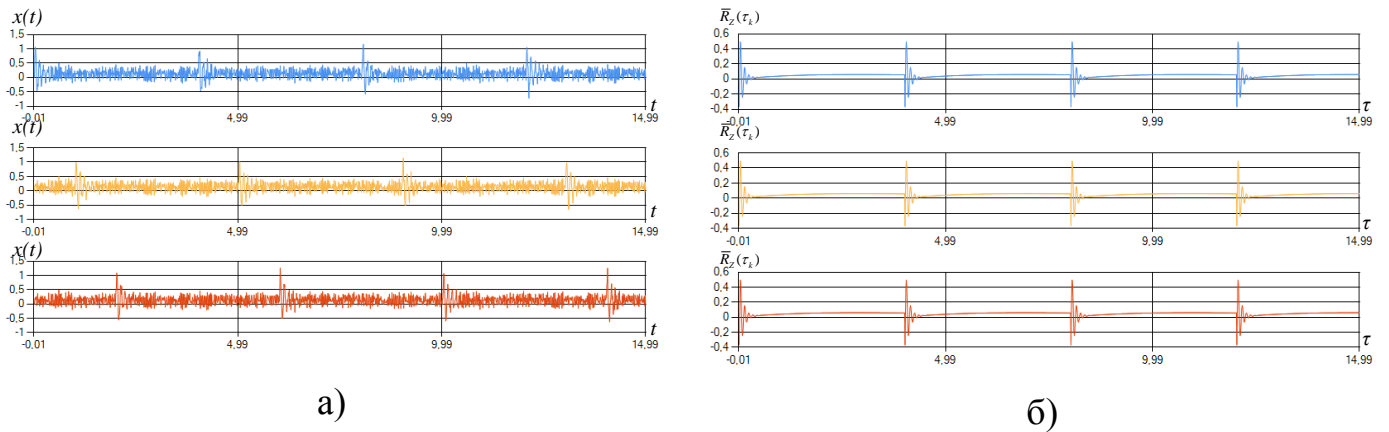


Рис. 4.12. Результат роботи кореляційної ортогональної системи при дії полігармонічних сигналів і білого шуму.

а) змодельований сигнал,

б) результат обробки кореляційною ортогональною системою

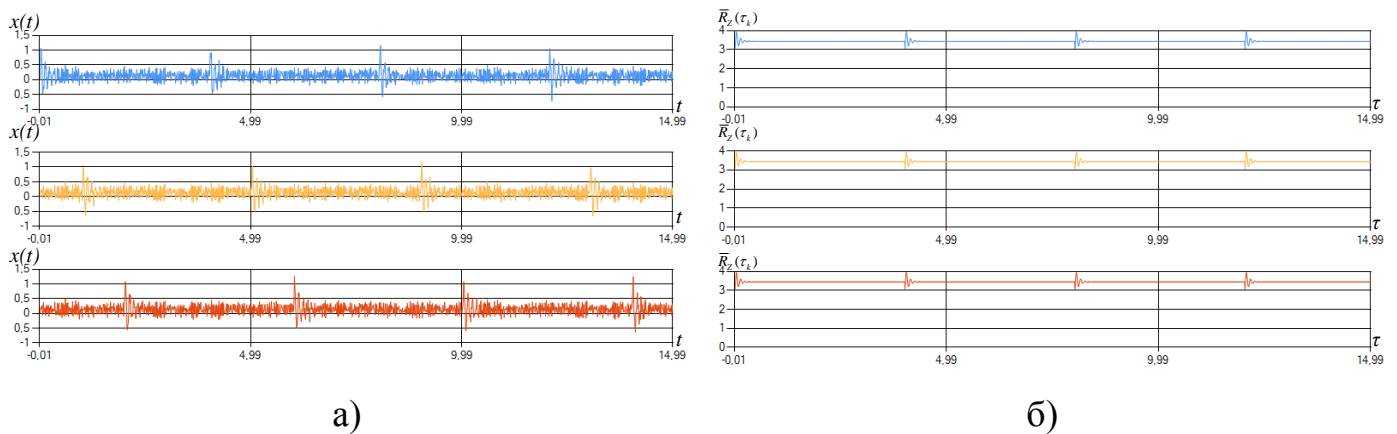


Рис.4.13. Результат роботи кореляційної ортогональної системи при дії полігармонічних сигналів і забарвленого шуму.

а) змодельований сигнал,

б) результат обробки кореляційною ортогональною системою

Проаналізуємо величину зсуву кореляційного перетворення, викликану РС-шумом.

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

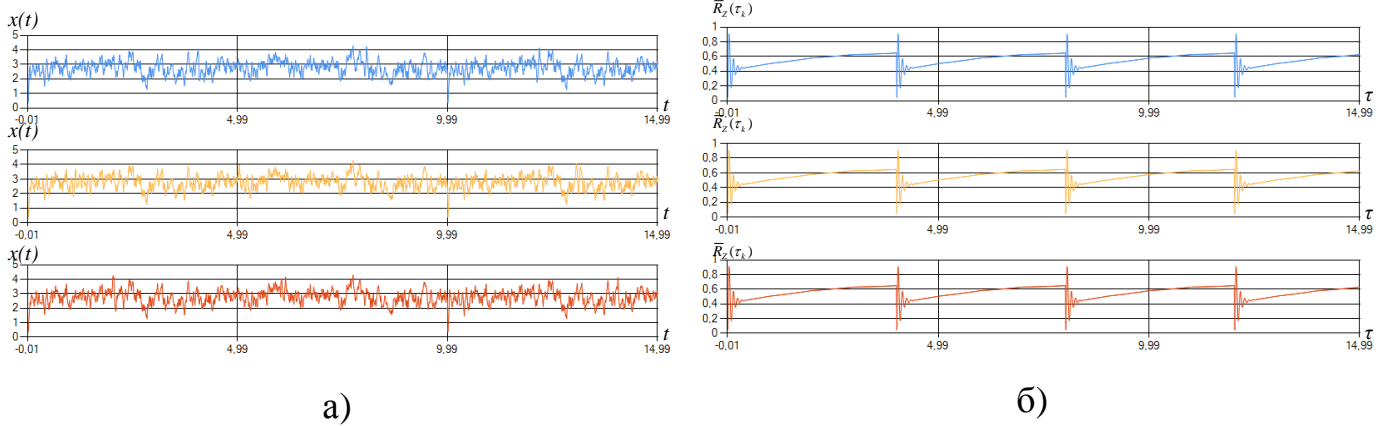


Рис. 4.14. Результат роботи кореляційної ортогональної системи при дії полігармонічних сигналів і RC-шуму.

а) змодельований сигнал,

б) результат обробки кореляційною ортогональною системою

Проведемо аналіз роботи системи, при наявності RLC-шуму.

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

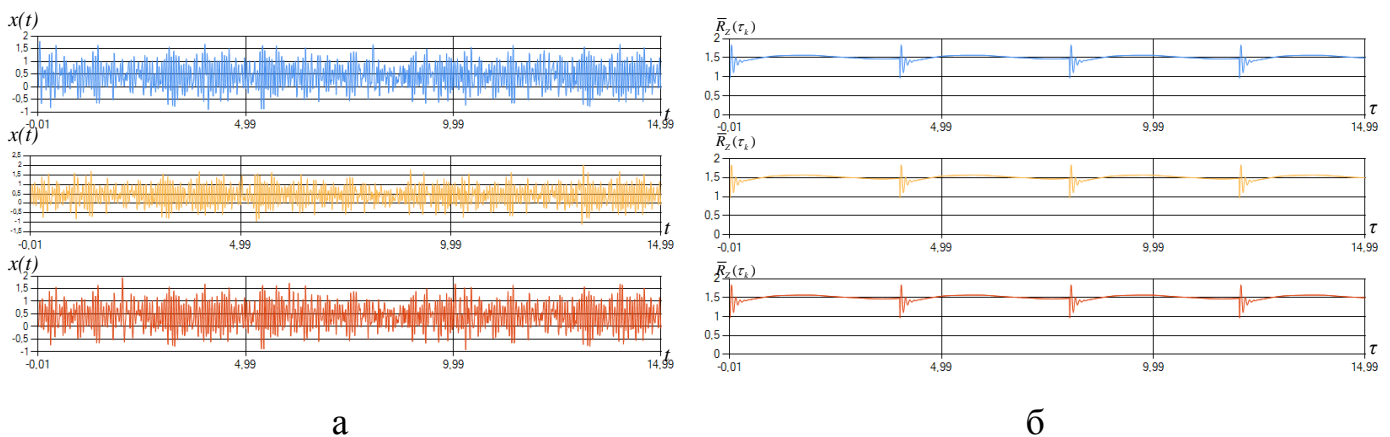


Рис.4.15. Результат роботи кореляційної ортогональної системи при дії затухаючих полігармонічних сигналів і RLC-шуму.

а) змодельований сигнал,

б) результат обробки кореляційною ортогональною системою

В основу роботи даного програмного комплексу використані результати математичного моделювання та процесів обробки сигналів наведених в попередніх розділах.

На рисунках 4.12(б)-4.15(б) наведені корелограми, які дозволяють визначити структуру земної кори. Як видно з даних рисунків кореляційна ортогональна система дозволяє виявляти корисні сигнали навіть при значному рівні завад.

Для визначення ефективності роботи кореляційної системи з ортогональними фільтрами Лагера в порівнянні з типовою ортогональною системою проведено аналіз співвідношень сигнал/завада. 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 4.16 для п'яти експериментів $n \in \overline{1,5}$.

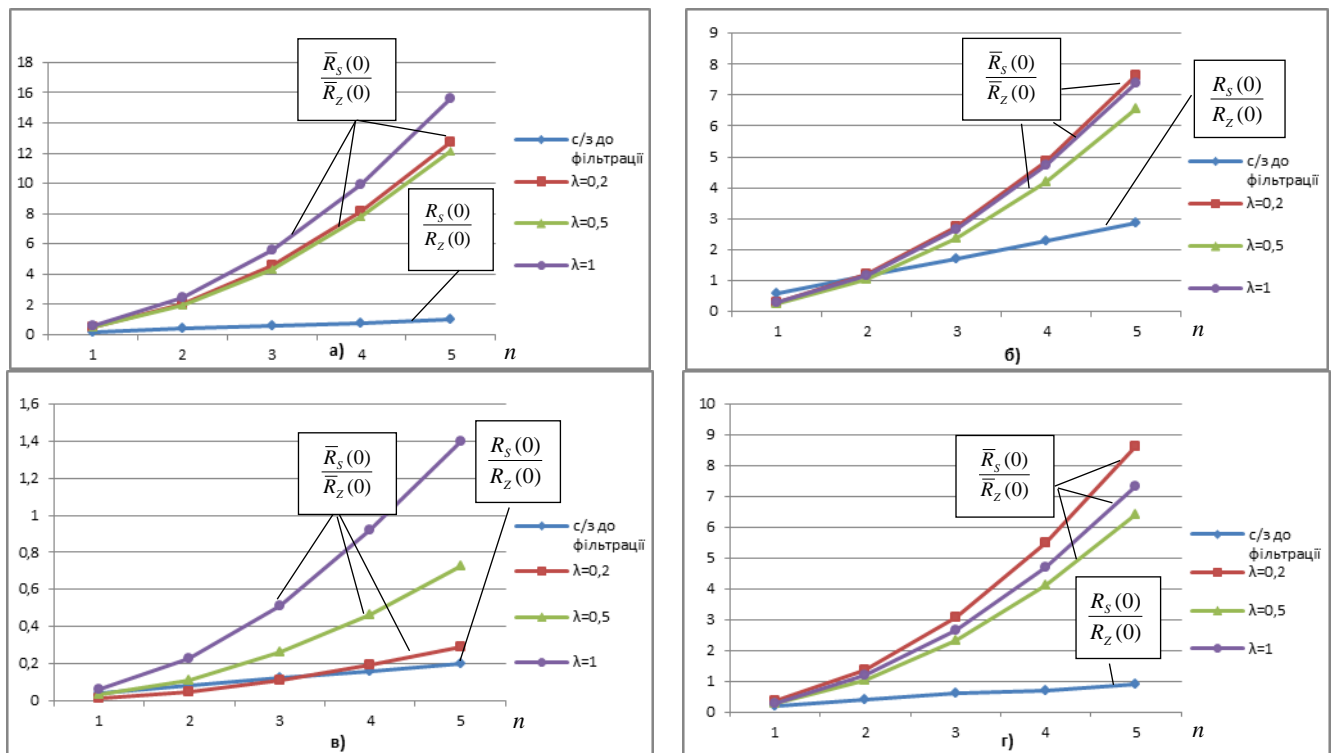


Рис. 4.16. Результати експериментальних досліджень співвідношень сигнал/завада

при різних комбінаціях корисного сигналу і завади

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

На наведених графіках були використані наступні характеристики корисних сигналів і завад: корисні сигнали представляли собою суму 4 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.

Як видно з рисунку 4.16 використання попередньої ортогональної фільтрації в кореляторах дає можливість покращити співвідношення сигнал/завада шляхом підбору параметрів фільтрів Лагера. Зокрема на рисунку 4.16(б) в першому експерименті типова кореляційна система показала кращий результат. Також збільшення параметру $\lambda = 0,5; \lambda = 1$ ортогонального фільтру Лагера дозволило покращити результат обробки сигналу з завадою типу RC шум, що підтверджується також рисунком 3.15.

4.6. Висновки до розділу 4

1. Розроблено адаптивний метод обробки сейсмічних сигналів з використанням дискретних ортогональних фільтрів Лагера, що дає можливість збільшувати співвідношення сигнал/завада на виході такої системи шляхом підбору коефіцієнтів складного ортогонального фільтру (етап навчання) при відомій кореляційній функції завади.
2. На основі запропонованого адаптивного методу розроблено функціональну структурно-логічну схему кореляційної системи зі складними ортогональними фільтрами Лагерра, в якій фільтр складається із послідовності фільтрів Лагерра, що з'єднані між собою паралельно і в кожному з них незалежно формуються відгуки при дії завади. Запропонована структурно-логічна схема дасть можливість використовувати їх на практиці для зменшення SNR на виході системи.

3. Проведено комп'ютерний моделюючий експеримент для обґрунтування зменшення впливу завади на виході кореляційної системи при використанні складних ортогональних фільтрів Лагерра. У результаті експерименту, для реальної шумової завади, яка належить до класу RLC шумів, були отримані значення коефіцієнтів ефективності -5 дБ та -16 дБ в залежності від діапазону значень. Такі результати свідчать про суттєве зменшення впливу завади на обраних діапазонах.
4. На основі розглянутих математичних моделей сейсмічних сигналів і завад проведено серію комп'ютерних імітаційних експериментів по моделюванню сейсмічних сигналів, з заданими характеристиками і співвідношенням сигнал/завада.
5. Розроблено програмний комплекс для обробки сейсмічних сигналів, який дозволив провести серію експериментів по обробці сейсмічних сигналів, що дало можливість визначити оптимальні параметри ортогональних фільтрів Лагерра для збільшення співвідношення сигнал/завада.

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 цифрової кореляційної обробки з вхідними ортогональними фільтрами і 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 Лагера 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 Лагера.

4. Вперше отримані результати порівняльного аналізу роботи типової кореляційної системи і кореляційної системи з вхідними ортогональними фільтрами Лагера 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 при статистичній обробці сейсмічних сигналів на основі використання складних ортогональних фільтрів

Лагера 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 Лагера 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 Лагера дискретного аргументу і створити програмний комплекс моделювання і обробки сейсмічних сигналів для широкого кола різнопланових задач сейсмозв'язки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. Lampard D. G. A New Method of Determining Correlation Functions of Stationary Time Series., Proc. IEE, part C. volume 102, number 1, March 1955.
3. Marina Bousfield, João Ristow, Julio Cordioli, Izabelle Aller, Marcus Barão, Antonio Klein, Guillaume Barrault Using base function decomposition in adaptive filtering for seismic pulse retrieving 22nd International Congress on Acoustics ICA – 2016 URL : <http://www.ica2016.org.ar/ica2016proceedings/ica2016/ICA2016-0398.pdf> (дата звернення: 19.07.2019)
4. Seismo Blog. A Race Across the Pacific Ocean. URL: <https://seismo.berkeley.edu/blog/2010/07/19/a-race-across-the-pacific-ocean.html> (дата звернення: 19.07.2010).
5. Song, W. & He, K. & Guo, Q. & Jiang, Y... Micro-seismic data adaptive filtering method. *Geophysical Prospecting for Petroleum*. 2013. – 229-233.
6. Yilmaz O., Doherty M. Stephen. Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data. Volume 1 Tulsa, USA: *Society of Exploration Geophysicists*, second edition, language english, 2001. P.1000
7. 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.
8. Аки К. Количественная сейсмология. / Аки К., Ричардс П. – М.: Мир, 2002. – 519 с.
9. Алексеев А.С. Некоторые математические модели и прикладные технологии динамической сейсмологии (теория, алгоритмы, тенденции) //

Математические методы в геофизике: Тр. Междунар. конф. Новосибирск: Изд-во НВМ и МГ СО РАН, 2003. С.3-10.

10. Ампиров Ю.П. От сейсмической интерпретации к моделированию и оценке месторождений нефти и газа. Москва, ООО «Издательство Спектр», 2008, 384с.

11. Аникиев Д.В., Панкратова Д.В., Каштан Б.М., Гаевски Д. Локализация сейсмического источника с помощью суммирования по дифрагированным волнам *Вопросы геофизики*. Вып. 42. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. У-та, 2009. с. 66-83

12. Бабак В.П., Марченко Б.Г., Фриз М.С. Теорія ймовірностей, випадкові процеси та математична статистика. – К.: Техніка, 2004. – 288с.

13. Балашканд М. И., Ловля С. А., Источники возбуждения упругих волн при сейсморазведке на акваториях, М., 1977

14. Балл Г. А. Аппаратурный анализ случайных процессов. «Энергия», М., 1968.

15. Барс Ф.М., Карапетов Г.А. Системы и алгоритмы обработки данных в сейсморазведке. М., РГУНГ, 2007

16. Бат М. Спектральный анализ в геофизике. М.: Недра, 1980. – 535 с.

17. Бендат Дж. , Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. «Мир», М., 1971.

18. Бондарев В.И. Сейсморазведка. Екатеринбург, ИРА УТК, 2007 — 703 с.

19. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Основы обработки и интерпретации данных сейсморазведки Екатеринбург, 2001 г., 193 стр.

20. Виленкин С.Я. Статистическая обработка результатов исследования случайных функций. -М., Энергия, 1979, -320с.

21. Воеводин В.В. ,Тёртышкинов Е.Е. Вычислительные процессы с тёплицевыми матрицами. -М., Наука, 1987. -320с.

22. Волин А.П., Ланиус В.Я., Уральцева И.Б. Некоторые результаты сейсморазведки для глубинного геологического картирования горнорудных районов и пути ее дальнейшего применения, методика, техника и результаты геофизической

разведки Материалы V Всесоюзной научно-технической геофизической конференции в г. Новосибирске, М., "Недра", 1967.

23. Волчихин В.И., Чистова Г.К., Чистова Ю.С. Структурное описание сейсмического сигнала. сб. науч. тр. *Проблемы объектовой охраны*. Пенза : Изд-во ПГУ, 2000. Вып. 1. С. 57-60.

24. Воскресенский Ю. Н. Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов. М.: дательство РГУ нефти и газа. 2001. 68 с.

25. Вуд Л., Трейтел С. Обработка сейсмических сигналов – ТИИЭР – 1975. – Т. 63. – №4. – С. 126 – 140.

26. Гайнанов В.Г. Сейсморазведка. М., МГУ, 2005

27. Гальперин Е.И. Вертикальное сейсмическое профилирование. М., "Недра", 1972.

28. Гамбурцев Г.А. и др. Корреляционный метод преломленных волн. М., изд-во АН СССР, 1952.

29. Герасимова И.Ю. Возможности изучения верхней части геологического разреза в районах развития карста сейсморазведкой преломленных волн//Российский геофизический журнал. 2006. - № 43-44. - с. 131-135.

30. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. 8-е изд., испр. и доп.—М.: Едиториал УРСС, 2005.— 448 с.

31. Гольдин С.В. Линейные преобразования сейсмических сигналов. М.: Недра, 1974. – 252 с.

32. Гольцман Ф.М. Статистические модели интерпретации / Гольцман Ф.М. – М.: Наука. 1971. -328 с.

33. Горбацевич Е. Э. Коррелометры с аппроксимацией. «Энергия», М., 1971.

34. Гурвич И. И., Боганик Г. Н. Сейсмическая разведка. Тверь, АИС, 2006. – 744 с.

35. Гурвич И.И., Номоконов В.П. Справочник геофизика, т. IV Сейсморазведка, Под ред., М., "Недра", 1981. С.464.

36. Гурьянов В.В. Математическая модель плоских сейсмических ударных волн. *Вестник Сарат. гос. техн. ун-та*. 2007. №1. Вып. 2. С.7-14.
37. Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. – М. : Техносфера, 2013. – 528 с.
38. Дубянский А.И., Зайцев С.В., Силкин К.Ю. Поверхностные волны сейсмических событий в условиях воронежского кристаллического массива. *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. №1. 2005. С. 221-225
39. Дудкин В.А., Оленин Ю.А. Математические имитационные модели сейсмических сигналов. сб. науч. тр. *Проблемы объектовой охраны*. Пенза : Изд-во ПГУ, 2001. Вып. 2. С. 74-79.
40. 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.
41. Жаровський Р. О., Щербак Л.М. Задачі обробки геофізичних сигналів при дії завад дискретною кореляційною системою з вхідними ортогональними фільтрами. *Вісник ТДТУ*. 2010. Том 15. № 2. С. 172-181.
42. Жаровський Р.О. Задачі обробки геофізичних сигналів кореляційною системою з вхідними ортогональними фільтрами. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій". Т., 2010. С. 258.
43. Жаровський Р.О. Інформаційна система моделювання і обробки сейсмічних сигналів. Матеріали III науково-технічної конференції Інформаційні моделі, системи та технології. Тернопіль. 2013. С. 21.
44. Жаровський Р.О. Комп'ютерне моделювання стаціонарного РС шуму з дискретним часом. *Вісник ТДТУ*. 2008. Том 13. №1. С. 157-161.
45. 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.
46. 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: ФМІ НАНУ, 2010. С. 108 – 110

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

48. Жаровський Р.О. Опис шумових процесів в геофізиці з допомогою моделі дискретного лінійного випадкового процесу. Матеріали XXVIII Науково-технічна конференція «*Моделювання*», Інститут проблем моделювання в енергетиці ім.Г.Є.Пухова. Київ. 2009. С. 27.

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

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

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

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

53. Жаровський Р.О., Марченко Н.Б. Кореляційні системи обробки сигналів з вхідними системними дискретними ортогональними фільтрами. Матеріали науково - практичної конференції молодих вчених та аспірантів *Інтегровані інформаційні технології та системи* - 2005 р. К.: НАУ, С.76-77

54. 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.

55. Жаровський Р.О., Щербак Л. М. Моделі геофізичних сигналів на основі лінійних випадкових процесів. *Вісник ТДТУ*. 2009. №1. С. 138 – 144.
56. Жуков А.П. Новые направления вибрационной сейсморазведки и её научное и экспериментальное обоснование.// Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, спец.25.00.10, Москва 2001
57. Жуков А.П., Шнеерсон М.Б. Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки. М.: ОАО Издательство «Недра», 2000.
58. Заславский Ю. М. Излучение сейсмических волн вибрационными источниками. Нижний Новгород. ИПФ. 2007 с. 198.
59. Зверев М.А. Метод частотно-разделенного подавления высокоамплитудных шумов в данных сейсморазведки/ Зверев М.А. *Вестник Югорского Государственного университета*, 2006 г. Выпуск 4. С. 36-40
60. Зотеев В.Е., Дубинина И.Н. Математическое моделирование сейсмической волны в форме импульса Берлаге на основе разностных уравнений. *Математическое моделирование и краевые задачи*. Материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием: в 2х томах. 2019. с. 304-308
61. Иноземцев А.Н., Колесов С.В., Анискина О.В. Спектрально временные характеристики корреляционных шумов в вибрационной сейсморазведке. *Разведочная геофизика*, М. Недрa, 1991, вып. 113, с. 10-13.
62. Исаев Ю.М. Математические модели источников сейсмических колебаний и их эффективность. Разработка и исследование источников сейсмических сигналов и методов невзрывной сейсморазведки. ГСКТБ сейсмич. техники, г.Гомель. М. ВНИИОЭНГ, 1986.
63. Кауфман А. А.. Левшин А. Л. Введение в теорию геофизических методов. Часть 4. Акустические и упругие волновые поля в геофизике. М.: ООО Недрa-Бизнесцентр. 2003. 661 с.
64. Козлов Е.А. Анализ современного состояния геофизического оборудования и технологий в зарубежных геофизических и нефтяных компаниях. 1998. 65 с.

65. Козубовский С.Ф. Корреляционные экстремальные системы К.: Наук думка 1983р -224с.
66. Колмогоров А. Н. Основные понятия теории вероятностей. – М.: Наука, 1974. – 120с.
67. Колосов Б.М., Кобылкин И.А., Голиченко А.М. Особенности возбуждения, регистрации и оценки слабых сейсмических сигналов при минимизации взрывной технологии. Тезисы доклада на Международной геофизической конференции и выставке SEG-2003, Москва
68. Копчиков А.В. Использование корреляционного анализа для повышения эффективности обработки данных сейсморазведки. Материалы научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых *Молодые - наукам о Земле*, 155, 2006.
69. Копчиков А.В., Ференци В.Н., Табаков А.А., Решетников А.В. Выделение регулярных волн на фоне интенсивных помех методом "ПОЛИКОР". Материалы научно-практической конференции Гальперинские чтения 2004", 70-74, 2004.
70. Кострыкин Ю. П, Сейсморазведка на сложных сигналах. Тверь: Изд-во ГЕРС, 2002. 416 с.
71. Кричлоу Г.Б. Современная разработка нефтяных месторождений - проблемы моделирования. М.: Недра, 1979. 303 с.
72. Куля В.И. Ортогональные фильтры. К.: Техника, 1967. – 240 с.
73. Кушнир А.Ф., Варыпаев А.В., Рожков М.В., Епифанский А.Г., Дрикер И. Определение параметров очагов микросейсмических событий по данным поверхностных сейсмических групп при сильных коррелированных помехах и сложных механизмах источников излучения. *Физика Земли*. 2014. №3. С. 28-50.
74. Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Чупрін Л.И., Щербак Л.М. Алгоритм моделювання дискретних стаціонарних лінійних випадкових процесів. *Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій*. Дніпропетровськ: Навчальна книга. – 2001. - Т.4. - С. 52-58.
75. Лоэв М. Теория вероятностей. М.: Изд-во иностр. лит. 1982. – 720 с.

76. Лугинец А. И., Электрогидравлические вибраторы для возбуждения упругих колебаний в сейсморазведке, М., 1981;
77. Луховицкий Ф.М., Парфиянович Б.А. Использование ударной установки в производственных сейсмических работах. В сб.: *Разведочная геофизика*, вып. I. М., "Недра", 1964,
78. Ляховицкий Ф.М. Методика и интерпретация данных сейсморазведки при инженерно-геологическом картировании. М., ШЭМЗ, 1970.
79. Марченко Б. Г. Щербак Л.Н. Линейные случайные процессы и их приложения. К.: Наукова думка. 1975. 143 с.
80. Марченко В.Б. Ортогональные функции дискретного аргумента и их приложение в геофизике. – К.: Наукова думка, 1992. – 212 с.
81. Марченко Н.Б. Анализ точностных характеристик при моделировании линейных субгауссовых случайных процессов и их использование в информационно-измерительных системах. *Электронное моделирование*. 2004. Т. 26, №6. С. 63-71.
82. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. Изд-во Советское радио , т. I, 1961
83. Миндель И.Г. Определение физико-механических свойств лессовых пород сейсмоакустическими методами. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. М., ПНМНИС, 1970.
84. Мирский Г. Я- Измерение временных интервалов. «Энергия», М., 1964.
85. Мирский Г. Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. М., Л.: Энергия. 1972. – 432 с.
86. Мостовой С.В. Оптимальные параметры оценки сейсмических волновых полей. К.: Наук. Думка. 1979. – 112 с.
87. Назаров Г.Н. Новые данные о скоростях распространения упругих волн в грунтовых массивах. *Инженерно-строительные изыскания*, № 2 (27), М, Изд-во литературы по строительству, 1972.

88. Назаров Т.Н. Методические указания по комплексным сейсмогеологическим и инженерно-геологическим исследованиям с применением портативных сейсморазведочных установок. М., ВИА, 1969.
89. Напалков Ю.В., Сердобольский Л.А. Линейные преобразования и системы в геофизике. Части 1, 2. М., РГУНГ, 2007
90. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации: Геофиз. методы поисков и разведки месторождений по лез. ископаемых. – М.: Недра, 1986. – 341 с.
91. Павленкова Н.И., Смелянская Т.В. Методы определения скоростей по годографам преломленных волн. В кн.: "Геофизический сборник", вып. 29. Киев, изд-во "Наукова думка", 1969.
92. Пузырев Н.Н. Измерение сейсмических скоростей в скважинах. М., Гостоптехиздат, 1957.
93. Рабинович Е. В., Ганчин К. С., Пупышев И. М., Шефель Г. С. Модель сейсмического импульса, возникающего при гидравлическом разрыве пласта. Математическое и компьютерное моделирование : Сб. материалов междунар. науч. конф. Омск : Изд-во Ом. гос. ун-та, 2014. – С. 19–20
94. Роман В.І. Спектри відношення сигнал-завада адаптивних геофізичних досліджень. *Геофизический журнал*. — 2014. — Т. 36, № 2. — С. 185-191.
95. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А Вопросы прикладного анализа случайных процессов. – М.: Советское радио, 1968. – 256 с.
96. Рошмаков Ю. В., Столбова Т. А., Лаптев А. П., Неганов В. М., Черепанов С. С., Ланцев В. Ф. Технологии сейсморазведки при подготовке объектов в транзитных зонах. *Технологии сейсморазведки*. М.: Изд-во ГЕРС, - 2010. - Вып. 2. - С. 85-89.
97. Рудаков А.Г., Цимбал Т.Н. О некоторых экспериментальных исследованиях динамических характеристик ударного импульсного воздействия. В сб.: *Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн*. Л., изд-во ЛГУ, 1959.

98. Санфи́ров И.А., Яросла́вцев А.Г. Возможности сейсморазведки МОВ при инженерно-геологических изысканиях. *Инженерная геология*. 2007: - № 2. - с. 27-31.
99. Се́ге Г. Ортогональные многочлены. М. Физматгиз. 1962г. 500 с.
100. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Том 5. М. Физматгиз. 1959. 656 с.
101. СП 11-105-97. «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. «Правила производства геофизических исследований» / Госстрой России. - М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России, 2004.
102. Телегин А.Н. Методика и технология сейсморазведочных работ методом отраженных волн. – СПб. 2010. С.83.
103. Телегин А.Н. Сейсморазведка методом преломленных волн. СПб., СПГУ, 2004
104. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1982. - 624 с.
105. Толстой М.І., Гожик А.П., Рева М.В. та ін. Основи геофізики. К.: Київський університет, 2006. - 446 с.
106. Троян В.Н., Киселёв Ю. В. Статистические методы обработки и интерпретации геофизических данных. СПб гос. ун-т. - СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. – 577 с.
107. Урупов А.К. Изучение скоростей в сейсморазведке. М., "Недра", 1966.
108. Урупов А.К. Основы трехмерной сейсморазведки. М.: Изд. Нефть и газ РГУНГ. 2004. 584 с.
109. Урупов А.К. Сейсмические модели и эффективные параметры геологических сред. Части 1, 2. М., РГУНГ, 2007
110. Чайковский В. И. Методы экспериментального определения корреляционных функций. Изв. вузов СССР, Радиотехника, 1960, 5.

111. Чеботарева И.Я., Кушнир А.Ф., Рожков М.В. Устранение интенсивной помехи при пассивном мониторинге месторождений углеводородов методом эмиссионной томографии. *Физика Земли*. 2008. № 12. С. 65–82.
112. Чичинин И. С. Вибрационное излучение сейсмических волн. М. 1984. С.223.
113. Шериф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. Том 2. Обработка и интерпретация данных. М.: Мир, 1988. – 400 с.
114. Широков В.Н., Лобанов В.М. Методы обеспечения качества первичной геофизической информации. М., РГУНГ, 2007
115. Шнеерсон М.Б., Жуков А.П. Наземная невзрывная сейсморазведка XXI века. Приборы и системы разведочной геофизики, №3, Саратов: Издательство Саратовского отделения ЕАГО, 2004. 5-8с.
116. Шнеерсон М.Б., Жуков А.П. Современное состояние наземной невзрывной сейсморазведки. Обзор "Разведочная Геофизика" АО "Геоинформмарк", М., 1994.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача

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. *(індексується в Google Scholar)*.

2. Жаровський Р.О. Комп'ютерне моделювання стаціонарного РС шуму з дискретним часом. Вісник ТДТУ. 2008. Том 13. №1. С. 157–161. *(індексується в Google Scholar)*.

3. Жаровський Р.О., Щербак Л. М. Моделі геофізичних сигналів на основі лінійних випадкових процесів. Вісник ТДТУ. 2009. №1. С. 138–144. *(індексується в Google Scholar)*.

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. *(індексується в Google Scholar)*.

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 Google Scholar)*.

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. *(індексується в Google Scholar)*.

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, CrossRef, Index Copernicus, Applied Science & Technology Source, DOAJ, Google Scholar)*.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Жаровський Р.О. Ортогональні фільтри Лаггера 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, 7-8 жовтня 2010 р 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 Лагера 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.

ДОДАТОК Б

Геофізичні методи дослідження земної кори

Модифікації	Параметри, що вивчаються	Використовувані частоти	Види досліджень	Глибина / роздільна здатність (n - ціле число від 1 до 9)*	Вирішувані завдання
<i>Методи природного поля</i>					
Метод природного електричного поля постійного струму (ЕП)	Природні потенціали електрохімічного і електрокінетичного походження (ЕП)		Наземна і екваторіальна профілізація, площадкова зйомка; каротаж		Виявлення місць корозії металевих конструкцій, областей живлення і розвантаження підземних вод, місць просочування вод через земляні споруди.
Метод природних імпульсів електромагнітного поля Землі (ЕІЭМПЗ)	Амплітудні і частотні характеристики природних електромагнітних імпульсів Землі				Встановлення напруженого стану масиву, локалізація місць можливих порушень сплошности, міри трещинообразования.
<i>Електророзвідка постійним (чи низькочастотним) струмом</i>					
Електропрофілізація (ЕП) різними установками	Уявні електричні опори, поля постійного струму, що є параметрами; питомі електричні опори (УЕС) порід	0 - 0 - 30 Гц	Наземні	Від $n \cdot 0,1$ до $n \cdot 10$ м // від $0,1$ м до $n \cdot 10$ м Залежать від співвідношення УЕС порід	Визначення меж порід різного складу, вологості, пористості, виявлення і визначення субвертикальних геологічних тел.
Вертикальне електричне зондування (ВЕЗ) різними установками			Наземні, на екваторіях		
Електропрофілізація і зондування по методу двох складових (ЕП МДС) і (ВЕЗ МДС), метод векторних вимірів електричного поля	Інтенсивність електричного поля постійного струму, виміряна в різних напрямках		Наземні		Те ж, що і ЕП і ВЕЗ, але з можливістю вивчення складно побудованих середовищ при спостереженнях на одному профілі або в одній точці.
Електрокаротаж опорів (КС); струмовий каротаж	Уявні електричні опори, УЭС; сила струму в живлячому ланцюзі	0 - 0 - 30 Гц	Свердловинні	//від $0,01$ м залежно від розмірів зонду	Розчленовування розрізу, виявлення зон підвищеної кількості тріщин, пористості, водомісткості, визначення складу, будови і властивостей порід.
Метод зарядженого тіла (МЗТ)	Поле проводить тіла, що електрично заряджається				До 100 м
Резистивиметрія	УЭС рідин		Лабораторні, свердловинні, екваторіальні		Оцінка корозійної агресивності ґрунтів; оцінка складу ґрунтів; вивчення режиму підземних вод, забруднення.

Модифікації	Параметри, що вивчаються	Використовувані частоти	Види досліджень	Глибина / роздільна здатність (n - ціле число від 1 до 9)*	Вирішувані завдання
<i>Метод викликаної поляризації</i>					
Електропрофілізація зондування методом викликаної поляризації	Поляризуемость ґрунтів.	0 - 0 - 30 Гц	Наземні	Ті ж, що і у ЕП і ВЄЗ	Уточнення літологічного складу і вологості при спільному використанні з методом опору.
<i>Електророзвідка змінними сталими електромагнітними полями</i>					
Частотне електромагнітне зондування (ЧЕМЗ)**: частотне зондування (ЧЗ), дистанційне зондування (ДЗ), ізопараметричне зондування (З)	Параметри гармонійних полів, що створюються електричними і магнітними диполями.	1 кГц - n · 100 кГц	Наземні	глибина залежить від частоти е.-м. хвиль і відстані між випромінювачем і приймачем	Розріз розрізу по вертикалі з виділенням субгоризонтальних меж порід, що розрізняються по УЕС і діелектричній проникності.
Дипольне електромагнітне, профілізація (ДЕМП): височастотне (ВЧЕП)** , безперервне (НЕП)**	Ті ж, що і при зондуваннях, але виміри виконуються на профілях або площі при постійних частоті і відстанях випромінювач-приймач		Наземні	n · м - n · 100 м // 0,5 кроку	Визначення меж порід різного складу, вологості, пористості, виявлення і побудова субвертикальних геологічних тіл, пошук металевих конструкцій, за сприятливих умов визначення рельєфу високоомних порід.
Радіохвильове просвічування (РВП)	Вивчення електричного і (чи) магнітного компонентів електромагнітного поля при збудженні в одній свердловині і прийомі в іншій, на поверхні або ж в тій же свердловині	0,0,1 - 30 МГц	Свердловинні, свердловинно-наземні	10 м - n · 10 м // 1 м - 15 м	Оцінка стану і моніторинг ґрунтів і гідрогеологічних умов безпосередньо під основою споруд або на глибоких горизонтах, де недостатньо роздільній здатності наземних методів, а також на ділянках щільної міської забудови і при високому рівні техногенних завад.
Зондування методом становлення поля (ЗСП) і перехідних процесів (МПП)	Аналіз процесу становлення поля в ближній зоні, що створюється електричним диполем, після його відключення	0, 0, спостереження починаючи з 3 - 5 мс	Наземні	1 м - n · 100 м // 0,5 - 10 м	Розчленовування розрізу по вертикалі на шари з різними УЕС
<i>Електророзвідка змінними несталими електромагнітними полями</i>					
Зондування (РЛЗ) радіолокації	Вивчення динамічних і кінематичних x-тик електромагнітних імпульсів, що пройшли через досліджуване середовище	Короткі імпульси (нсек); 10 - n · 100 кГц	Наземні, на акваторіях, аерометоди	n · м - n · 10 м	Визначення положення меж, оцінка складу і стану порід. Особливо сприятливі середовища для цього методу лід і сухі піски.

Модифікації	Параметри, що вивчаються	Використовувані частоти	Види досліджень	Глибина / роздільна здатність (n - ціле число від 1 до 9)*	Вирішувані завдання
Зйомка радіолокації (РЛ)	Вивчення електромагнітних імпульсів, відбитих від денної поверхні	Те ж	Аеро- і космічна	n · 0,1 м	Вивчення стану приповерхневого шару порід або ґрунтів, в першу чергу його обводнює
Радіотеплова і інфрачервона зйомка	Вивчення природного э.-м. випромінювання земної поверхні	НВЧ	Аеро, наземні	Приповерхневий шар	Виділяє таликові ділянки серед мерзлих, можливе виявлення не занадто глибоко залягаючих внутрішньогрунтових льодів
<i>Сейсмічні</i>					
Кореляційний метод заломлених хвиль (КМПВ, МПВ), метод відбитих хвиль (МОВ), в модифікації загальної глибинної точки (МОВ ОГТ)	Вивчення динамічних і кінематичних характеристик пружних коливань в середовищі, викликаних штучними джерелами збудження коливань	< 1 кГц	Наземні	Залежно від використовуваних частот від n метрів до n · 100 м // 0,5 м - 10 м	Розчленовування розрізу, вивчення положення геологічних меж, обумовлених зміною літологічного складу, стану тріщин, вологонасиченості; вивчення зсувних і карстових ділянок; вивчення фізико-механічних властивостей, їх анізотропії.
Сейсмічний каротаж (СК), сейсмічне просвічування (СП), вертикальна сейсмічна профілізація (ВСП).			Свердловини	Визначається завглибшки свердловини // 0,1 м - 1 м	Розчленовування розрізу, виявлення меж нижче за забій і в стороні від свердловини, виділення зон тріщин і оцінка фізико-механічних властивостей.
Безперервна сейсмічна профілізація НСП		150 - 750 Гц	На акваторіях	До n · 100 м // 0,1 - n · м	Вивчення будови дна, розріз розрізу по літології, оцінка складу і властивостей ґрунтів.
<i>Акустичні</i>					
Акустичне просвічування (АП), акустичний каротаж (АК), профілізація по стінках	Вивчення кінематичних і динамічних х-тик змущених пружних коливань	1 - 17 кГц	На поверхні і усередині масиву	До n · 10 м // 0,05 м	Вивчення властивостей масиву порід, будівельних матеріалів і стану конструкцій, виявлення дефектів.
НСП		> 1 кГц	На акваторіях		
Акустична емісія (АЕ)	Вивчення акустичної емісії		На поверхні, в шпурах, у свердловинах	Віддаленість від джерела збудження · 10 м	Локалізація місць зміщення ґрунтів і тріщиноутворення, виявлення ділянок їх підготовки.
<i>Ультразвукові</i>					
Ультразвуковий каротаж (УЗК)	Вивчення динамічних і кінематичних х-тик пружних коливань, що виначені властивостями досліджуваного	> 10 кГц	На поверхні, в шпурах і свердловинах	До 1 м // 0,01 м	Вивчення складу, будови і властивостей ґрунтів, в т.ч. мерзлих, розріз розрізу по вертикалі.

Модифікації	Параметри, що вивчаються	Використовувані частоти	Види досліджень	Глибина / роздільна здатність (n - ціле число від 1 до 9)*	Вирішувані завдання
	матеріалу				
УЗ просвічування і профілізація			На зразках	До 0,5 м // 0,001 м	Вивчення складу, будови і властивостей ґрунтів, анізотропії, встановлення однорідності зразків.
<i>Магніторозвідка</i>					
Профільна і площадкова магнітна зйомка (М)	Вивчення магнітного поля Землі, магнітній сприйнятливості	-	Наземні		Розріз за літологічними ознаками осадових і четвертинних відкладень, вивчення тріщин скельних порід, вивчення геодинамічних процесів на зсувних і карсто небезпечних ділянках.
<i>Гравірознавдя</i>					
Профільна і площадкова гравірознавдя зйомка (Г)	Вивчення аномалій поля сили тяжіння	-	Наземні	До 10 м	Виявлення і визначення геометрії аномальних тіл, глибини їх залягання
<i>Ядерно-фізичні</i>					
Гамма-гамма метод (ГГМ), нейтрон-нейтронний метод (ННМ), метод природної радіоактивності	Вивчення ядерних властивостей порід	-	Свердловинні, підземні	Визначається завглибшки свердловини // 0,1 м	Визначення щільності, вологості і глинистості ґрунтів в природному стані.
Метод протонного магнітного резонансу (ПМР)		-	Наземні		Детектування підземних вод.
<i>Газові еманції</i>					
Радон-тороновий метод, метод (Г-Е) газової еманції	Вивчення газового складу повітря підґрунтя	-	Наземні		Структурно-геодинамічне, виділення стійких блоків порід і геодинамічних зон з різним рівнем активності, пов'язаним з розривною тектонікою, зсувами, карстом .

*Величина умовна. У сейсмоакустичних методах роздільна здатність визначається в основному частотою використовуваних хвиль

**Методи, що рідко застосовуються в інженерній геофізиці, оскільки не забезпечені відповідною серійною апаратурою.

ДОДАТОК В

Ортогональні поліноми Лагера дискретного аргументу

Поліноми Лагера задані на дискретній множині точок $x \in \overline{[0, \infty)}$. Вагова функція для цих поліномів визначається згідно виразу:

$$j(x) = e^{-\lambda x}, \lambda > 0, x \in \overline{[0, \infty)}$$

Поліноми Лагера визначаються наступним чином:

$$l_n(x) = \frac{a^n}{(a+1)^n} \cdot \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \frac{(-1)^k \cdot x^{[k]}}{a^n \cdot k!}, x, n \in \overline{[0, \infty)},$$

де a визначається по формулі

$$a = (e^{-\lambda} - 1)^{-1}$$

Графіки чотирьох поліномів Лагера представлені на рис. 1.

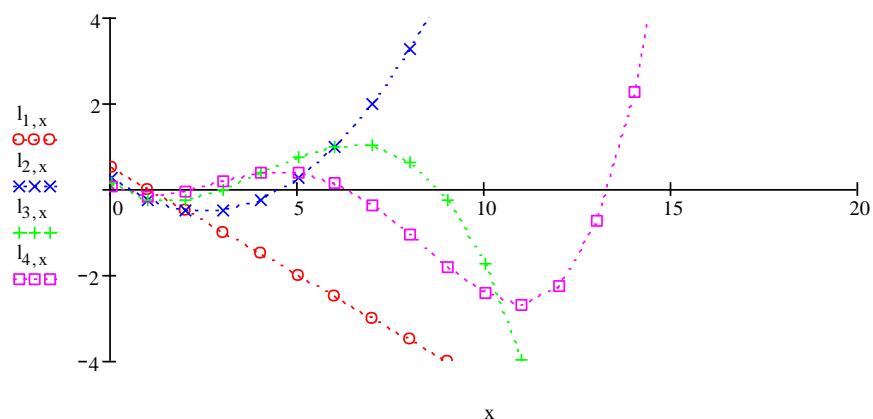


Рис. В.1. Поліноми Лагера дискретного аргументу

$$l_n(x); x \in \overline{[0, 15)}; e^{-\lambda} = 2; n = \overline{[1, 4]}$$

Функції Лагера дискретного аргументу.

Функції Лагера дискретного аргументу ортогональні на півінтервалі $[0, \infty)$ і визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned}\varphi_n(x) &= (-1)^n e^{-\lambda x/2} \hat{l}_n(x) U(x) = \\ &= (-1)^n \left[e^{\lambda(n-x)} (1 - e^{-\lambda}) \right]^{\frac{1}{2}} l_n(x) U(x), n \in [0, \infty), x \in (-\infty, \infty)\end{aligned}$$

Перші функції Лагера зображені на рис. 2.

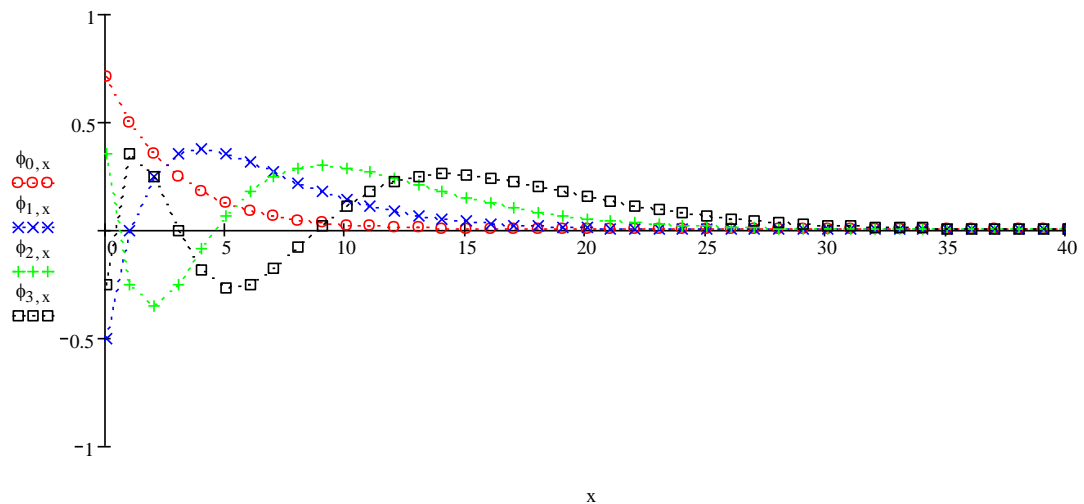


Рис. В. 2. Функції Лагера дискретного аргументу

$$\varphi_n(x); x \in [0, 40]; e^\lambda = 2; n \in [0, 3]$$

Взаємне кореляційне перетворення функцій Лагера дискретного аргументу визначається таким чином:

$$\begin{aligned}h_{mn}(\tau) &= \sum_{x=0}^{\infty} \varphi_m(x) \varphi_n(x + \tau) = \\ &= (-1)^{m-n} e^{-\lambda \tau/2} \sum_{x=0}^{\infty} \hat{l}_m(x) \hat{l}_n(x + \tau) j(x), \tau \in [0, \infty)\end{aligned}$$

Взаємні кореляційні перетворення функцій Лагера дискретного аргументу зображені на рис.3.

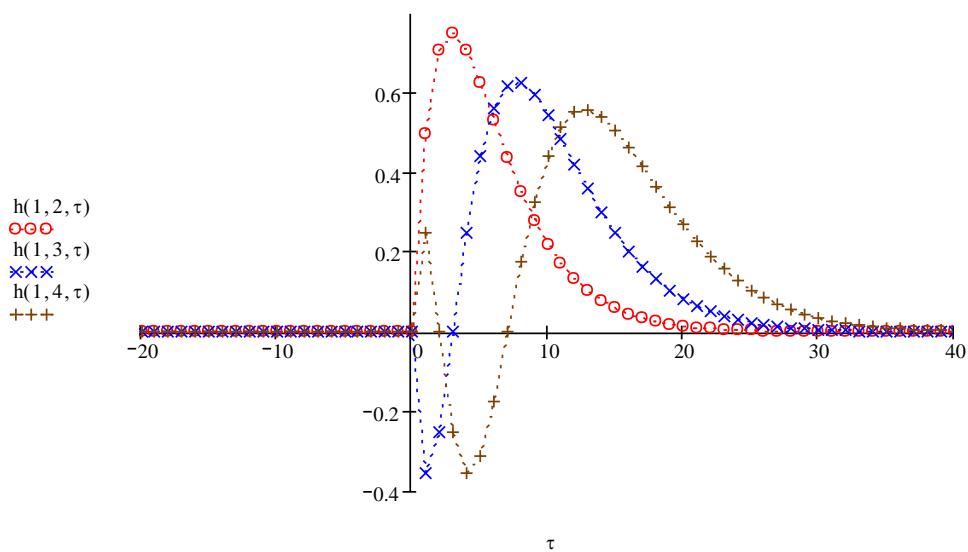


Рис.В.3. Взаємне кореляційне перетворення функцій Лагера

$$h_{mn}(\tau); \tau \in [-20, 40]; e^\lambda = 2; n - m \in [1, 3]$$

ДОДАТОК Д

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

Україна
 НАЦІОНАЛЬНА АКЦІОНЕРНА КОМПАНІЯ
НАФТОГАЗ УКРАЇНИ
 ВІДКРИТЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО ПО ГАЗОПОСТАЧАННЮ ТА ГАЗИФІКАЦІЇ
«ТЕРНОПІЛЬМІСЬКГАЗ»

46006 м. Тернопіль, вул. Шептицького, 20 Тел. (0352) 251-483, факс 250-492. Код ЗКПО 21155959, р/р. 26000939 ТОД
 АПБ «АВАЛЬ» МФО 338501 Номер свідоцтва платника ПДВ 26722022. Індивідуальний номер 211559519187. Телетайп:
 202-221 «Метан»,

E-mail: miskgaz@tr.ukrtel.net

«Затверджую»
 головний інженер
 ПАТ «Тернопільміськгаз»

(підпис) _____ (П.І.Б.)
 «Тернопіль-Міськгаз» 2014 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, що нижче підписались, представник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя асистент кафедри комп'ютерних систем та мереж Жаровський Р.О. з однієї сторони та головний інженер ПАТ «Тернопільміськгаз» з іншої сторони, склали дійсний акт у тім, що результати дисертаційного дослідження «Математичне моделювання і статистична обробка сейсмічних сигналів з використанням ортогональної фільтрації» впроваджено у ПАТ «Тернопільміськгаз», та використовують розроблені у дисертаційній роботі інструментальні засоби при обробці результатів зондування підземних комунікацій в умовах дії завад.

Використання запропонованого методу фільтрації дозволяє підвищити інформативність і точність даних вимірювань.

Представник ТНТУ ім. І. Пулюя

 (Жаровський Р.О.)

Представники підприємства (організації),
 що впроваджує результати наукових розробок

 ПАТ «Тернопіль-Міськгаз»
 21155959



«Затверджую»

начальник об'єднання

ПАТ «Тернопільгаз»

Караванський О.І.

(П.І.Б.)



«17» вересня 2014 р.


АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Жаровського Руслана Олеговича на тему «Математичне моделювання і статистична обробка сейсмічних сигналів з використанням ортогональної фільтрації»

Ми, що нижче підписались, представник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя асистент кафедри комп'ютерних систем та мереж Жаровський Руслан Олегович з однієї сторони та начальник об'єднання ПАТ «Тернопільгаз» Караванський Олег Іванович з іншої сторони, склали даний акт у тому, що результати дисертаційної роботи: система комп'ютерних програм для обробки та імітаційного моделювання сигналів зондування підземних об'єктів (комунікацій), була апробована в ПАТ «Тернопільгаз».

Розроблений в дисертаційній роботі комплекс програм дозволяє проводити фільтрацію сигналів, які отримані пристроєм vLocDM, з використанням ортогональних фільтрів, що підвищує інформативність результатів вимірювань при дії випадкових завад.

Представник ТНТУ ім. І. Пулюя

Представники підприємства (організації),
що впроваджує результати наукових розробок


(Жаровський Р.О.)