УДК 621.391

П. Ю. Костенко, Р. О. Качайло, Р. А. Лук'янюк, Ю. А. Шевченко, М. Ю. Коротков

НЕПАРАМЕТРИЧНІ ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СИНГУЛЯРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Анотація. *Доповідь присвячена дослідженню можливостей відновлення часових рядів методом "Гусениця-SSA" в умовах впливу на спостереження сигналу як гаусівських, так і негаусівських шумових спотворень. Визначено особливості обробки сигналів за умов дії шумових завад і невизначеності їх статистичних характеристик. Розглянуто можливості використання сингулярного спектрального аналізу та непараметричних статистичних показників для оцінювання результатів відновлення спотворених сигналів.*

Ключові слова: *відновлення сигналу, непараметричний показник, обробка сигналів, радіомоніторинг, сигнал, сингулярний спектральний аналіз, шумова завада.*

Abstract. *The report is devoted to investigating the possibilities of time series restoration using the "Caterpillar-SSA" method under conditions where the observed signal is affected by both gaussian and non-gaussian noise distortions. The specific features of signal processing under noise interference and uncertainty regarding the statistical characteristics of noise are identified. The possibilities of using singular spectrum analysis and nonparametric statistical indicators to evaluate the restoration results of distorted signals are considered.*

Keywords*: signal restoration, nonparametric indicator, signal processing, radio monitoring, signal, singular spectrum analysis, noise interference.*

Вступ

Ефективність функціонування систем радіомоніторингу значною мірою залежить від достовірності виявлення, аналізу та обробки радіосигналів в умовах складної сигнально-завадової обстановки. Наявність шумових завад, невизначеність їх статистичних характеристик і можливість спотворення структури корисних сигналів ускладнюють процеси їх обробки та подальшого аналізу.

Традиційні параметричні методи часто передбачають наявність апріорної інформації про модель сигналу та статистичні властивості завад. Однак, у реальних умовах радіомоніторингу така інформація може бути обмеженою або відсутньою. Це зумовлює необхідність застосування підходів, які забезпечують аналіз сигналів без попереднього задання конкретного закону розподілу шумової складової.

Одним із перспективних напрямів вирішення зазначеної проблеми є використання методу "Гусениця-SSA", що не потребує апріорної інформації щодо щільності розподілу завад в спостережені.

Результати дослідження

Під час радіомоніторингу прийнятий радіосигнал доцільно розглядати як часову реалізацію, що містить корисну складову та компоненти, які спотворені шумовою завадою. Внаслідок їх впливу можуть змінюватися амплітудні, частотні та структурні характеристики сигналу, що ускладнює його виявлення, розпізнавання та подальшу обробку.

Одним із відомих методів обробки сигналів є сингулярний спектральний аналіз (singular spectrum analysis). Його застосування ґрунтується на перетворенні початкової часової реалізації в матрицю траєкторій, виконанні сингулярного розкладання та подальшому виділенні окремих адитивних складових досліджуваного спостереження.

Такий підхід забезпечує відновлення сигналу за наявності шумових адитивних спотворень в спостереженні [1-2].

Особливістю застосування методу “Гусениця-SSA” є можливість аналізу та відновлення часових реалізацій без попереднього задання законів розподілу шумових завад, присутніх у спостережувані. Основним параметром при аналізі часового ряду (спостереження) є довжина вікна L, обирається таким, щоб $1<L<N$ (N – довжина часового ряду). Для аналізу структури часового ряду рекомендується обирати значення довжини вікна L, що становить половину від довжини досліджуваного часового ряду [2]. Запропоновано виконувати оцінювання якості відновлення часових рядів із використанням непараметричних показників, а саме індексів SG та PI в якості критеріїв реконструкції часових рядів. Комплексне використання зазначених непараметричних показників створює можливість оцінювання змін властивостей радіосигналу в процесі цифрової обробки [3-4].

Проведене в роботі моделювання показало, що метод обробки “Гусениця-SSA” забезпечує відновлення сигналів в умовах дії шумів з різними законами розподілу, а саме рівномірним, логістичним та Коші. Відновлені сигнали зберігають основні структурні особливості вихідного сигналу та характеризуються зменшенням шумової складової в спостереженні.

Порівняння отриманих значень непараметричних показників якості відновлення до та після застосування методу “Гусениця-SSA” показує ступінь відновлення передбачуваності сигналів після шумового спотворення. Отримані результати показали зростання значень непараметричних індексів SG та PI, після відновлення сигналів та робастність методу “Гусениця-SSA” до розподілу ймовірності шуму в спостереженні. Якщо значення непараметричних індексів близькі до одиниці, це свідчить про незначний залишковий вплив шуму на структуру сигналу.

Висновки

Отже, спотворення сигналів гаусівськими та негаусівськими шумами з рівномірним, логістичним і розподілом Коші не перешкоджають застосуванню методу “Гусениця-SSA” для їх відновлення. Для кількісного оцінювання якості відновлення доцільно використовувати непараметричні показники, зокрема SG-індекс та індекс локальної передбачуваності PI. Встановлено, що після застосування методу “Гусениця-SSA” значення зазначених показників зростають для всіх досліджених типів шумових завад, що свідчить про підвищення структурованості та передбачуваності відновлених часових рядів (сигналів). Отримані результати підтверджують можливість застосування методу “Гусениця-SSA” за умов дії негаусівських шумів без попереднього визначення їх законів розподілу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення особливостей застосування методу за умов мультиплікативного спотворення сигналів, а також на дослідження можливостей його використання для відновлення нелінійних сигналів.

Список використаних джерел:

1. Centofanti F., Hubert M., Palumbo B., Rousseeuw, P. Multivariate Singular Spectrum Analysis by Robust Diagonalwise Low-Rank Approximation. *Journal of Computational and Graphical Statistics*. 2024. № 34(1). P. 360-373. https://doi.org/10.1080/10618600.2024.2362222.

2. Костенко П. Ю., Васюта К. С., Слободянюк В. В., Василишин В. І., Качайло Р. О. Використання сурогатних даних при реалізації метода “Гусениця-SSA” для зменшення похибок відновлення часового ряду. *Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка*. 2025. № 68 (4), С. 235- 246. https://doi.org/10.20535/S0021347025040016.

3. Robert Savit, Matthew Green. Time series and dependent variables. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1991. Vol. 50. № 1. P. 95-116. https://doi.org/10.1016/0167-2789(91)90083-L.

4. Костенко П. Ю., Васюта К. С., Слободянюк В. В., Качайло Р. О. Класифікація сигналів з цифровою модуляцією параметрів з використанням SG-статистики. *Кібернетика та системний аналіз.* 2025. Том 61, № 3. С. 176-189. https://doi.org/10.34229/KCA2522-9664.25.3.15.

Костенко Павло Юрійович *– доктор технічних наук, професор, професор кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: kpyu@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3382-0684.*

Качайло Руслан Олександрович *– доктор філософії, науковий співробітник наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: rkacajlo@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6063-0448.*

Лук'янюк Роман Анатолійович *– ад'юнкт Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: romanlukianiuk94@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1557-8136.*

Шевченко Юрій Андрійович *– старший науковий співробітник наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e- mail: shevuran@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6572-5390.*

Коротков Михайло Юрійович *- науковий співробітник наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e- mail: mkorotkov86@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9433-6841.*

Pavlo Yuriiovych Kostenko *– Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: kpyu@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3382-0684.*

Ruslan Oleksandrovych Kachailo *– PhD, Research Fellow, Air Force Research Center, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: rkacajlo@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6063-0448.*

Roman Anatoliyovych Lukianiuk*– adjunct, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: romanlukianiuk94@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1557-8136.*

Yurii Andriiovych Shevchenko *– Senior Research Fellow, Air Force Research Center, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: shevuran@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6572-5390.*

Mykhailo Yuriiovych Korotkov *– Research Fellow, Air Force Research Center, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: mkorotkov86@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9433-6841.*