

УДК 621.391

В.І. Васишин, К.Г. Мацина, Р.А. Лук'янюк, Р.В. Косіхін

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ МОДИФІКОВАНИМ МЕТОДОМ SSA

У роботі проаналізовано вплив точності оцінки дисперсії шуму спостереження на ефективність попередньої обробки сигналів модифікованим методом SSA. Показано, що використання оцінки дисперсії шуму, що отримана на основі результатів загального статистичного аналізу, дозволяє покращити ефективність спектрального аналізу при попередній обробці сигналів модифікованим методом SSA.

Ключові слова: зменшення шуму в спостереженні, сингулярні значення, сингулярні вектори, модифікований метод SSA.

Вступ

На сьогоднішній день при обробці сигналів в антенних решітках, обробці мови, зображень, розпізнаванні образів знаходять застосування процедури, пов'язані з розкладенням простору подання сигналів на ортогональні підпростори меншого розміру. При цьому використовуються матриці проектування (проектори) на підпростір сигналу (ППС) та шуму (ППШ). Формування проекторів може бути здійснене з використанням власних векторів (ВВ), що отримуються в результаті спектрального розкладення кореляційної матриці (КМ) спостережень, процедури ортогоналізації Грама – Шмідта і інших процедур [1–3].

Спектральне розкладення КМ (пошук власних значень (ВЗ) і ВВ КМ спостережень) використовується в розкладенні Карунена-Лоева, аналізі головних компонент (principal component analysis-PCA), при реалізації сучасних методів спектрального аналізу (СА) [1–6]. Замість спектрального розкладення КМ може здійснюватися розкладення матриці даних (МД) за сингулярними значеннями (СИЗ) і сингулярними векторами (СІВ), тобто SVD (singular value decomposition).

Сучасні методи СА, що базуються на спектральному розкладенні КМ та формуванні проектору на ППС (ППШ), в технічній літературі називають основаними на використанні підпросторів ВВ (subspace-based), або також називають власноструктурними (ВС).

До відомих підходів по подавленню шуму (noise reduction) в спостереженні (фільтрації сигналу), на зображенні, відносяться метод SSA та його модифікація [3–5], технологія сурогатних даних, метод спектрального віднімання (spectral subtraction), вейвлет перетворення та інші [6–9]. Підходи по подавленню (зменшенню) шуму в спостереженні (фільтрації сигналу) можуть бути розглянуті як приклади попередньої обробки сигналів перед використанням методів СА чи інших методів обробки сигналів.

Реалізація модифікованого варіанта SSA [4–5] припускає оцінку дисперсії шуму спостереження. Окрім використання традиційної оцінки дисперсії шуму, яка базується на усередненні ВЗ (СИЗ), що відповідають ППШ, може використовуватися оцінка, основана на використанні загального статистичного аналізу (G-аналізу) [2].

В роботі [5] проведено аналіз впливу розміру сегментів, на які розбивається вхідна послідовність, на ефективність спектрального аналізу ВС методами при попередній обробці вхідної послідовності методом SSA та його модифікацією. Разом з тим, аналіз впливу точності оцінки дисперсії шуму спостереження на ефективність модифікованого методу SSA не проводився.

Тому **мета даної роботи** – аналіз впливу оцінки дисперсії шуму спостереження на ефективність попередньої обробки сигналів модифікованим методом SSA (ефективність спектрального аналізу сигналів методами СА з використанням модифікованого методу SSA).

Основний розділ

Модель даних

Модель даних для задачі часового СА, що розглядається, наведена в [1; 3–6]. Шум спостереження є білим гаусівським шумом з нульовим математичним очікуванням та дисперсією σ^2 . По спостереженню $\{y(n)\}_{n=1}^N$ необхідно дати оцінки значенням частот V гармонічних компонент сигналу $\omega_v, v = 1, \dots, V$.

Для формування матриці даних ганкелевої структури використовуються вектори (сегменти) розміром $m > 2V$ виду [3–6]

$$y(n) = [y(n) \dots y(n+m-1)]^T; \quad n = 1, \dots, K, \quad (1)$$

де $K = N - m + 1$, $()^T$ означає транспонування. Дані сегменти формуються із вхідної вибірки розміром N . Таким чином, МД має наступний вигляд [5–6]:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \dots & y(N-m+1) \\ y(2) & y(3) & \dots & y(N-m+2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ y(m) & y(m+1) & \dots & y(N) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Вибіркова КМ спостереження отримується як $\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_{n=1}^K \mathbf{y}(n)\mathbf{y}^T(n) = \frac{1}{K} \mathbf{Y}\mathbf{Y}^T$. Після спектрального розкладення КМ (після SVD МД) реалізуються ВС методи СА, що дозволяють отримати оцінки компонент сигналу.

В роботі особливості спільного застосування методу SSA з ВС методами покажемо на прикладі методу Root-MUSIC, оцінки частот в якому знаходять по кореням поліному [4; 6]:

$$P_m(z) = \mathbf{a}^T(z^{-1})\hat{\mathbf{U}}_n\hat{\mathbf{U}}_n^T\mathbf{a}(z), \quad (3)$$

де $\mathbf{a}(z) = [1, z, \dots, z^{M-1}]^T$, $z = \exp(j\omega)$, $\hat{\mathbf{U}}_n - m \times (m - \hat{V})$ матриця ВВ підпростору шуму КМ $\hat{\mathbf{R}}$. При використанні дійсної моделі даних кожній гармонічній компоненті відповідає два корені. Порядок відбору коренів поліному для оцінювання частот приведено в [6]. Крім того, використовується метод ESPRIT (оцінювання параметрів сигналу за допомогою інваріантності щодо обертання), особливості реалізації якого наведені в [10].

Аналіз впливу оцінки дисперсії шуму спостереження на ефективність попередньої обробки сигналів

Попередня обробка сигналів та полів (зображень) може бути виконана з використанням методів фільтрації і т.д. Для реалізації модифікованого методу SSA виконуються такі кроки [4-5]: 1) по вибірці $\{y(n)\}_{n=1}^N$ формується ганкелева МД \mathbf{Y} ; 2) здійснюється пошук СІВ та СІЗ МД \mathbf{Y} (або ВЗ та ВВ КМ $\hat{\mathbf{R}}$); 3) відбираються \hat{V} найбільших СІЗ і відповідних їм СІВ 4) формується відфільтрована від шуму спостереження МД $\mathbf{Y}_{\text{фільтр.}} = \sum_{q=1}^{\hat{V}} (\hat{\mu}_q - \hat{\sigma})\hat{\mathbf{u}}_q\mathbf{v}_q^T$, де $\hat{\mu}_q$ – СІЗ, $\hat{\mathbf{u}}_q$ ($\hat{\mathbf{v}}_q$) – лівий (правий) СІВ ППС МД \mathbf{Y} , $\hat{\sigma}$ – середньоквадратичне відхилення шуму; 5) формується відфільтрована вибірка часового ряду $y_{\text{фільтр.}}(n)$ усередненням елементів матриці $\mathbf{Y}_{\text{фільтр.}}$, що перебувають на її крос-діагоналях (шляхом ганкелізації матриці). Оцінка дисперсії шуму, що основана на використанні результатів G-аналізу, наведена в [4]. Як видно з виразу для $\mathbf{Y}_{\text{фільтр.}}$, оцінка $\hat{\sigma}$ впливає на ефективність фільтрації вхідної послідовності від шуму спостереження.

Для подальшого використання ВС методів виконуються такі кроки: 1) по $y_{\text{фільтр.}}(n)$ формується МД і здійснюється її SVD, у результаті якого одер-

жують СІВ ППС (або ППШ); 2) по СІВ ППС (або ППШ) реалізується ВС метод СА.

Моделювання здійснювалося для $N = 64$, число випробувань $L = 1000$. Сигнал містив дві рівнопотужні гармонічні компоненти з частотами: $f_1 = 0,2$ Гц і $f_2 = 0,211$ Гц (рознесення за частотою менше межі розділення по Релею). З урахуванням дійсної моделі сигналу $\hat{V} = 4$ [11]. Відношення сигнал-шум (ВСШ) визначалося як $10 \log_{10}(\sum_{v=1}^V \alpha_v^2 / \sigma^2)$,

де σ^2 – дисперсія шуму, α_v – амплітуда v -ї гармонічної компоненти, $v = 1, \dots, V$. Середньоквадратична похибка (СКП) оцінювання гармонічних компонент визначалась як в [11].

Результат попередньої обробки сигналів, по якому здійснюється оцінка ефективності попередньої обробки, можна показати різними шляхами – приведенням рисунків реалізацій спостереження з шумом та очищеного від шуму спостереження, обчисленням деякої міри близькості сигналу та відфільтрованої вибірки часового ряду і т.д. В роботі ефективність попередньої обробки розглядається після використання методу СА.

На рис. 1 показані залежності СКП оцінювання частот методом Root-MUSIC для: початкових даних, результату фільтрації сигнальних компонент у спостереженні методом SSA, модифікованим методом SSA при використанні традиційної та покращеної оцінок дисперсії шуму (RM with modified SSA2 та RM with modified SSA1) від розміру сегменту m .

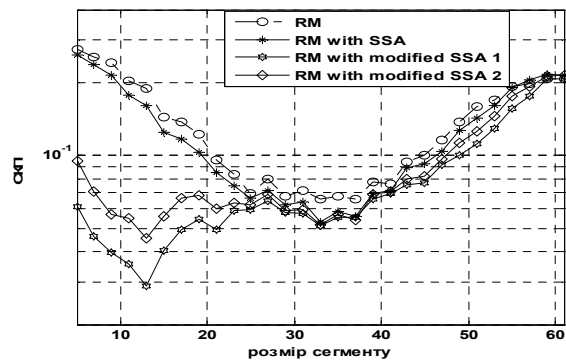


Рис. 1. Залежності СКП оцінювання частот гармонічних компонент сигналу від розміру сегменту, ВСШ=5дБ

Розмір сегменту для методу SSA вибирався рівним m . Аналіз залежностей, наведених на рис.1, показує, що переваги використання покращеної оцінки дисперсії шуму при застосуванні модифікованого методу SSA разом з методом СА Root-MUSIC найбільш очевидні при значеннях $m=5 \dots 24$. Також має місце покращення в точності оцінювання при $m > 41$. Певні пояснення щодо такої поведінки залежностей СКП оцінювання частот від ВСШ наведені в роботі [5].

На рис. 2 показані залежності СКП оцінювання частот методом ESPRIT для: початкових даних, результату фільтрації сигнальних компонент у спостереженні методом SSA, модифікованим методом SSA при використанні традиційної та покращеної оцінок дисперсії шуму (ESPRIT with modified SSA2 та ESPRIT with modified SSA1) від ВСШ.

Розмір сегменту для методу ESPRIT вибирався рівним $m = 18$. Для методу SSA і його модифікації розмір сегменту був рівний 16.

Із аналізу залежностей видно, що переваги використання покращеної оцінки дисперсії шуму для вказаних умов найбільш суттєві після ВСШ, що є пороговим для методу ESPRIT при попередній обробці модифікованим методом SSA з використанням традиційної оцінки дисперсії шуму (на рис. 2 для ВСШ менших 18 дБ).

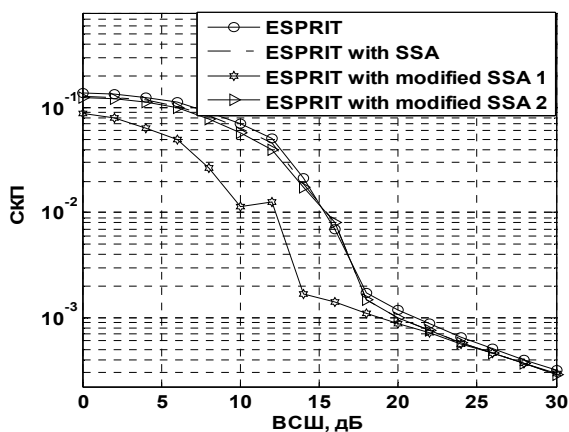


Рис. 2. Залежності СКП оцінювання частот гармонічних компонент сигналів методом ESPRIT від ВСШ, $m = 18$

При розглянутих умовах моделювання модифікований метод SSA, що використовує традиційну оцінку дисперсії шуму спостереження, дозволяє підвищити точність оцінювання частот у порівнянні з випадком використання початкового методу SSA (переважно в області високих ВСШ). Слід зауважити, що зменшення розміру сегменту для модифікованого методу SSA до $m/2$ дозволяє покращити точність оцінювання частот.

На рис. 3 показані залежності СКП оцінювання частот методом Root-MUSIC. Умови проведення моделювання аналогічні умовам моделювання для рис. 2.

Аналіз залежностей, наведених на рис. 3, дозволяє зробити висновки, що аналогічні наведеним для рис. 2. Попередня обробка з використанням модифікованого методу SSA є найбільш ефективною.

На рис. 4 показані залежності СКП оцінювання частот методом Root-MUSIC для випадку $m = 54$. В ході реалізації методу SSA та модифікованого методу SSA розмір сегменту приймався рівним $m/2$.

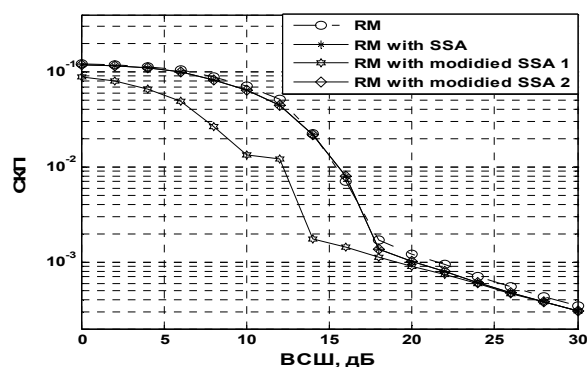


Рис. 3. Залежності СКП оцінювання частот гармонічних компонент сигналів методом Root-MUSIC від ВСШ, $m = 18$

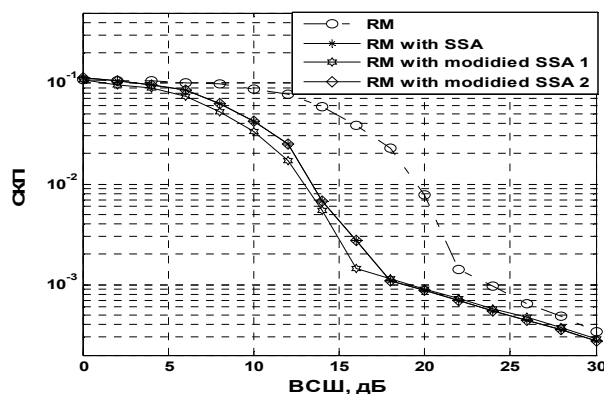


Рис. 4. Залежності СКП оцінювання частот гармонічних компонент сигналів методом Root-MUSIC від ВСШ, $m = 54$

В умовах, коли розмір сегменту m незначно відрізняється від розміру вхідної вибірки, що відповідає зменшенню числа сегментів $K = N - m + 1$, які використовуються при формуванні КМ, різниця між ефективністю початкового та модифікованого методу SSA (з використанням покращеної оцінки дисперсії шуму) є невеликою. Крім того, СКП оцінювання частот початкового та модифікованого методу SSA з використанням традиційної оцінки дисперсії шуму практично співпадають. Разом з тим, вже при невеликому збільшенні різниці частот гармонічних компонент сигналів ця різниця поступово зростає на користь модифікованого методу SSA.

Висновки

Ефективність модифікованого методу SSA, який використовується для попередньої обробки сигналів до застосування методів спектрального аналізу, залежить від точності оцінювання дисперсії шуму спостереження. Використання оцінки дисперсії шуму, що основана на використанні результатів узагальненого статистичного аналізу, дозволяє підвищити ефективність попередньої обробки сигналів та спектрального аналізу сигналів, що здійснюється після такої обробки.

Викликає інтерес використання розглянутого методу попередньої обробки та інших методів для зниження акустичного шуму в мовних сигналах, що є актуальним при забезпеченні радіозв'язку при використанні традиційних режимів роботи та сучасних, таких як режим з псевдовипадковою перебудовою робочої частоти.

Крім того викликає інтерес проведення порівняльного аналізу розглянутих методів фільтрації сигналу з іншими методами фільтрації (подавлення шуму), такими як метод спектрального віднімання (віднімання амплітудних спектрів), метод нелокального усереднення, технологією сурогатних даних, вейвлет перетворення, комбінаціями даних методів [12].

Список літератури

1. Фалькович С.Е. Статистическая теория измерительных радиосистем / С.Е. Фалькович, Э.Н. Хомяков. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
2. Гурко В.Л. Многомерный статистический анализ / В.Л. Гурко. – К.: Выща шк., 1988. – 320 с.
3. Golyandina N. Singular spectrum analysis for time series / N. Golyandina, A. Zhigljavsky. – Springer, London, 2013.
4. Василюшин В.И. Предварительная обработка сигналов с использованием метода SSA в задачах спектрального анализа / В.И. Василюшин // Прикладная радиоэлектроника: науч.-техн. журнал. – 2014. Том 13, № 1. – С. 43-50.
5. Василюшин В.И. Эффективность спектрального анализа собственноструктурными методами при предварительной обработке сигналов модифицированным методом SSA / В.И. Василюшин // Системы обработки информации. – 2016. – Вып. 8 (145). – С. 21-24.

6. Василюшин В.И. Адаптивный вариант технологии сурогатных данных для повышения эффективности спектрального анализа сигналов собственноструктурными методами / В.И. Василюшин // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2015. – Т. 58, №3. – С. 26-39.

7. Снижение уровня шума на цифровом изображении с использованием технологии сурогатных данных и его сингулярного разложения / П.Ю. Костенко, В.И. Василюшин, В.В. Слободянюк [и др.] // Системы обработки информации. – 2015. – Вып. 3 (128). – С. 22-25.

8. Boll S.F. Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction / S.F. Boll // IEEE Trans. on Acoustic, Speech and Signal Processing. – 1979. – Vol. 27. – P. 113-120.

9. Новоселов С.А. Подавление шума в речевых сигналах на основе метода нелокального усреднения / С.А. Новоселов, А.И. Топников, А.И. Савватин, А.Л. Приоров // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 1. – С. 23-28.

10. Василюшин В.И. Спектральный анализ методом ESPRIT при предварительной обработке данных методом SSA / В.И. Василюшин // Системы обработки информации. – 2015. – Вып. 1(126). – С. 12-15.

11. Gershman A.B. Pseudo-randomly generated estimator banks: a new tool for improving the threshold performance of direction finding / A.B. Gershman // IEEE Trans. SP. – 1998. – Vol. 46, No. 5. – Pp. 1351-1364.

12. Костенко П.Ю. Технология формирования сурогатных данных с использованием метода SSA для повышения эффективности спектрального анализа сигналов / П.Ю. Костенко, В.И. Василюшин // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2015. – Т. 58, №8. – С. 25-31.

Надійшла до редколегії 30.05.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. К.С. Васюта, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ SSA

В.И. Василюшин, К.Г. Мацина, Р.А. Лукьянюк, Р.В. Касихин

В работе проанализировано влияние оценки дисперсии шума наблюдения на эффективность предварительной обработки сигналов модифицированным методом SSA. Показано, что использование оценки дисперсии шума, которая получена на основе результатов общего статистического анализа, позволяет улучшить эффективность спектрального анализа при предварительной обработке сигналов модифицированным методом SSA.

Ключевые слова: уменьшение шума в наблюдении, сингулярные значения, сингулярные векторы, модифицированный метод SSA.

ANALYSIS OF THE SIGNAL PREPROCESSING EFFICIENCY BY MODIFIED SSA METHOD

V. Vasylyshyn, K. Matsina, R. Lukianiuk, R. Kasihin

The influence of estimate of observation noise variance on the effectiveness of signal preprocessing by modified SSA method is analyzed in the paper. It is showed that using the noise variance estimate obtained with application of general statistical analysis results allows to improve the performance of spectral analysis when using signal preprocessing by modified SSA method.

Keywords: noise reduction in observation, singular vectors, singular values, modified SSA method.