

Десятерик О.О.

<https://orcid.org/0000-0002-7591-3846>

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Інститут інформаційних технологій та систем
Національної академії наук України

Кунтиш О.С.

<https://orcid.org/0009-0001-0192-4104>

Інститут інформаційних технологій та систем
Національної академії наук України

Ревунова О.Г.

<https://orcid.org/0000-0002-3053-7090>

Інститут інформаційних технологій та систем
Національної академії наук України

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИГНІЧЕННЯ АКТИВНИХ ЗАВАД У АНТЕННІЙ СИСТЕМІ

Активна завада, що створюється з метою зниження ефективності роботи радіолокаційних систем, зенітно-ракетних комплексів, систем зв'язку веде до великих втрат. Тому актуальним є вдосконалення систем пригнічення активних завад.

Робота присвячена вдосконаленню методів пригнічення активних завад в умовах невизначеності, тобто при: малій довжині вибірки сигналу, наявності власного шуму вимірювальної системи, невідомому чисельному рангу матриці перетворення вхід-вихід, відсутності апріорної інформації про корисний сигнал. Розглянуто існуючі підходи до пригнічення активних завад та проаналізовано їх недоліки.

В даній статті пропонується для пригнічення завад в однорідній антенній системі використовувати методи виділення прихованих джерел (blind source separation), які обробляють суміш сигналів таким чином, що на виході отримуємо оцінки сигналів – складових суміші. Найбільш відомими підходами до виділення прихованих джерел є аналіз головних компонент PCA та аналіз незалежних компонент ICA. Для вирішення завдання виділення прихованих джерел використовуються наступні апріорні припущення про джерела: статистична незалежність та не гаусів розподіл (аналіз незалежних компонент), некорельованість та гаусів розподіл (аналіз головних компонент).

Проведено експериментальне дослідження залежності відношення сигнал-шум від рівня власного шуму антенних каналів, та залежності відношення сигнал-шум від рівня активної завади. Експерименти підтвердили ефективність методів усунення активних завад заснованих на аналізі головних компонент та аналізі незалежних компонент відносно методів апроксимаційного підходу, що традиційно використовуються для усунення завад в неоднорідній антенній системі. Для корисного сигналу імпульсної форми, – відношення сигнал-шум для методів заснованих на PCA та ICA монотонно зростає до сталого значення в залежності від рівня активної завади. Метод пригнічення завад на основі мінімальної довжини опису забезпечує високе та, практично, постійне відношення сигнал-шум в усьому дослідженому діапазоні рівнів активної завади.

Ключові слова: пригнічення завад, аналіз головних компонент, аналіз незалежних компонент, однорідна антенна система, активна завада.

Постановка проблеми. Навмисна завада (т.зв. активна завада), що створюється з метою зни-

ження ефективності роботи радіолокаційних систем, зенітно-ракетних комплексів, систем зв'язку веде до великих втрат. Зростає потужність актив-



ної завади, удосконалюються стратегії формування (генерації) та постановки активної завади. Тому актуальним є вдосконалення систем пригнічення активних завад.

Важливою вимогою при цьому є стійка робота за умов невизначеності, тобто при: малій довжині вибірки сигналу, наявності власного шуму вимірювальної системи, невизначеному чисельному рангу матриці перетворення вхід-вихід, відсутності апріорної інформації про корисний сигнал. Також вимогою є робота в реальному часі та проста апаратна реалізованість методів.

Підвищення ефективності систем пригнічення активних завад (стійкості та швидкодії) пов'язано з розробкою та вдосконаленням підходів, методів та алгоритмів усунення збурень в даних що надходять з антенної системи. Для усунення збурень в даних використовуються методи на основі матричних розкладань (як інструмента для забезпечення стійкості та точності) та рандомізованих обчислень, що забезпечують зниження обчислювальної складності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційний підхід до пригнічення завад в однорідній антенній системі полягає у визначенні напрямку надходження (DOA – direction of arrival [1]) завад і наступному формування провалу в діаграмі направленості у напрямках на джерела завади [1]. Методи визначення напрямку надходження сигналу діляться на методи без попередньої оцінки кількості джерел випромінювання та з попередньою оцінкою кількості джерел. Найбільш відомими представниками методів, що не потребують попередньої оцінки кількості джерел є метод Кейпона [1], [2] та метод Борджотті [1]. Метод Кейпона забезпечує правильне відновлення рівня потужності корисного сигналу, дає максимально правдоподібні оцінки інтенсивності джерел. Метод Борджотті підкреслює максимуми потужності, орієнтовані на джерела випромінювання, вирівнюючи вихідну потужність власного шуму, проте потребує апріорної інформації про корисний сигнал.

До методів визначення напрямків надходження сигналу з попередньою оцінкою числа джерел відносяться: метод Писаренко [3], MUSIC (Multiple Signal Classification множинної класифікації сигналів) [4], EV (Eigen Vector – власних векторів) [5]. Методи цієї групи містять наступні етапи: формування кореляційної матриці; обчислення власних векторів та власних значень кореляційної матриці і оцінка кількості джерел за кількістю власних значень кореляційної матриці, що перевищують

дисперсію шуму у деяку кількість разів; визначення кутових координат джерел з використанням матриці, оберненої до кореляційної. Недоліки: якість роботи сильно залежить від того, наскільки точно вдається розділити «шумові» та «сигнальні» власні значення та вектори кореляційної матриці, а також від розміру вибірки. Необхідна розробка методів пригнічення завад для однорідної антенної системи: який не потребує апріорної інформації про корисний сигнал, та є стійким до розміру вибірки.

Постановка завдання. Метою статті є підвищення ефективності пригнічення активних завад в антенній системі в умовах невизначеності на основі нових методів усунення збурень в даних та їх реалізації за допомогою матричної архітектури.

Виклад основного матеріалу. Завдання пригнічення активних завад полягає у максимально можливому очищенні від них корисного сигналу. Активна завада є джерелом випромінювання, яке не несе корисної інформації і має властивість нестаціонарності. При вирішенні завдання пригнічення активних завад працюють з двома типами антенних систем: однорідними та неоднорідними. Під *неоднорідною* антеною системою розуміють таку систему, де за рахунок відмінностей характеристик спрямованості антенних елементів виділяють основний канал і додаткові. У сигналах антенних елементів додаткових каналів переважають активні перешкоди, а складова корисного сигналу дуже мала. В основному каналі, складова корисного сигналу переважає.

Відомим підходом до пригнічення (компенсації) активних завад у неоднорідній антенній системі є застосування методів на основі декореляції. Робота цих методів полягає в оцінюванні коефіцієнтів кореляції завад каналах прийому, які потім використовуються для взаємної компенсації завад. Для виявлення кореляції застосовується ланцюг кореляційного зворотного зв'язку.

Недоліком багатоканального компенсатора зі зворотними кореляційними зв'язками є перехідний процес, який може за певних умов істотно затягуватися. Показано, що тривалість перехідного процесу збільшується: у разі зростання кількості джерел завад; зі збільшенням ступеня кореляції завад у додаткових каналах, що робить коваріаційну матрицю погано обумовленою. Зазначені недоліки призводять до неможливості роботи алгоритму на основі декореляції в ситуації, коли параметри завад змінюються швидко (відносно тривалості перехідного процесу). Це значно погіршує показники пригнічення завади.

В даній роботі ми будемо розглядати підходи до пригнічення активних завад в однорідній антенній системі.

Під однорідною антенною системою ми маємо на увазі систему, у якій сигнальна інформація у всіх антенних каналах є сумішшю трьох складових – корисного сигналу, активних завад, та власного шуму каналу. Тому канали однорідної антенної системи можуть розглядатися як аналоги додаткових каналів неоднорідної антенної системи. Сигнали активних завад і корисний сигнал статистично незалежні. Методи на основі декореляції і безпосереднього обернення матриці, розроблені для неоднорідної антенної системи, у цьому випадку не можуть бути застосовані, оскільки через наявність корисного сигналу у всіх каналах він у результаті апроксимації пригнічується разом з сигналами активних завад.

Оскільки в однорідній антенній системі сигнальна інформація в усіх антенних каналах є сумішшю трьох складових: корисного сигналу, активних завад та власного шуму каналу, – використання апроксимаційного підходу не є ефективним. При апроксимаційному підході до пригнічення завад сигнал основного каналу подають у вигляді лінійного розкладання за базисом сигналів додаткових каналів, які не містять корисного сигналу. Далі, корисний сигнал отримують як нев'язку, однак, якщо сигнали додаткових каналів містять складову корисного сигналу, то нев'язка не буде містити складової корисного сигналу.

Будемо розглядати сигнали N антенних каналів як виходи, а сигнали активних завад та корисний сигнал як невідомі входи. Відомо, що сигнали завад є статистично незалежними. Також вважається, що число джерел завади не більше, ніж число антенних елементів. За таких припущень ми пропонуємо використовувати для пригнічення завад в однорідній антенній системі методи виділення прихованих джерел (blind source separation), для яких присутність корисного сигналу в усіх каналах є однією з вимог найкращої роботи. Розглянемо постановку завдання виділення прихованих джерел, та короткий огляд відомих методів.

Завдання виділення прихованих джерел. В задачах виділення прихованих джерел дані подають у вигляді вибірки векторів виходів: $D_L = \{y_i\}_{i=1, \dots, L}$, $y_i \in \mathcal{R}^N$. Відомо, що вектор виходів у пов'язаний з вектором входів $x \in \mathcal{R}^N$ лінійним перетворенням: $y = Ax$, де $A \in \mathcal{R}^{N \times N}$ – матриця змішування повного рангу – невідома. Завдання полягає у відновленні L не спостережуваних векторів x (матриці X) за L спостереженнями y (за матрицею

$Y \in \mathcal{R}^{L \times N}$) шляхом пошуку розділяючої матриці $W = (w_1, \dots, w_N)$, $W \in \mathcal{R}^{N \times N}$ такої, що $YW = X$.

Для вирішення завдання виділення прихованих джерел відомі методи використовують наступні апріорні припущення про джерела:

- статистична незалежність та не гаусів розподіл (аналіз незалежних компонент ICA),
- некорельованість та гаусів розподіл (аналіз головних компонент PCA),
- розрідженість (аналіз розріджених компонент SCA).

Аналіз головних компонент. В аналізі головних компонент перетворення сигналів сумішей здійснюється наступним чином: $x^* = V^T y$, $W = V^T$. Тут V – матриця власних векторів для коваріаційної матриці $C = E\{Y^T Y\}$ вихідних даних (сигналів сумішей), отримана з використанням розкладання за власними значеннями: $C = V D V^T$, D – матриця власних значень. PCA здійснює перетворення, що орієнтує осі системи координат у напрямку максимальної дисперсії [6]. Перший головний компонент $x_1^* = v_1^T y$ визначає нормалізовану лінійну комбінацію тих компонентів вихідних векторів, які дають найбільше середнє значення дисперсії. Недоліком аналізу головних компонент є те, що виділення прихованих джерел з його допомогою працює ефективно тільки в тому разі, коли сигнали джерел мають нормальний розподіл та не корелюють між собою.

Аналіз незалежних компонент. Базовим для аналізу незалежних компонент є припущення про те, що сигнали джерел мають розподіл, відмінний від нормального, та є статистично незалежними. Випадкові змінні x_i є взаємно незалежними, якщо сумісну щільність вірогідності $f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ можна подати у вигляді добутку маргінальних щільностей вірогідності $f_i(x_i)$: $f(x_1, x_2, \dots, x_N) = f_1(x_1) f_2(x_2) \dots f_N(x_N)$.

Використовуючи диференціальну ентропію $H(f) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log f(x) dx$, взаємну інформацію I між N випадковими змінними x_i , $i = 1, \dots, N$ визначають наступним чином: $I(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N H(x_i) - H(x)$. Для незалежних сигналів взаємна інформація дорівнює нулю, так як $H(x_1, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N H(x_i | x_1, \dots, x_{i-1}) \leq \sum H(x_i)$ та рівність виконується тільки для незалежних (x_1, x_2, \dots, x_N) . Взаємна інформація еквівалентна відстані Кульбака-Лейблера $(f_1, f_2 -$ щільності вірогідності) $\delta(f_1, f_2) = \int f_1(x) \log(f_1(x) / f_2(x)) dy$ між сумісною щільністю вірогідності $f(x)$ та

добутком маргінальних щільностей. Для некорельованих випадкових змінних взаємна інформація подається з використанням негентропії [7], [8].

У якості цільової функції (ЦФ) у оптимізаційній задачі з відшукування розділяючої матриці використовуються формули наведені вище. У роботі [9] запропонована ЦФ, що базується на негентропії. Оскільки при обчисленні негентропії виникає необхідність оцінювати $f_i(x_i)$, що є трудомістким і не завжди дає достатню точність, запропоновано [8] використовувати апроксимацію негентропії:

$$J(x) \approx [E\{G(x)\} - E\{G(v)\}]^2,$$

де E – математичне сподівання, G – деяка не квадратична функція, x – нормована центрована (стандартизована) випадкова змінна, v – стандартизована випадкова змінна з нормальним розподілом. Метод аналізу незалежних компонент, що використовує ЦФ, яка базується на негентропії, запропоновано у [8] і називається FastICA. За даними [10] FastICA демонструє найкращу точність відновлення сигналу джерела серед таких методів, як JADE [11], InfoMax, Extended InfoMax [12]. Міри незалежності використовують поняття теорії інформації Шеннона [13]. Існує також алгоритмічна теорія інформації. Аналогом ентропії в теорії інформації Шеннона є алгоритмічна складність в алгоритмічній теорії інформації.

Порівняння функціонування PCA та ICA. Розглянемо приклади роботи алгоритмів ICA та PCA. Нехай маємо дві рівномірно розподілені статистично незалежні випадкові змінні x_1 та x_2 . Їх сукупний розподіл зображено на рис. 1а. Сукупний розподіл сумішей y_1 та y_2 , отриманих шляхом множення x_1 та x_2 на матрицю змішування A , подано на рис. А.2б. Подамо суміші y_1 та y_2 на вхід алгоритмів ICA та PCA. Розглянемо результат роботи алгоритму PCA (рис. 1в). Бачимо, що при зміні змінної x_1^* математичне сподівання змінної x_2^* не змінюється – це означає, що змінні декорельовані. При цьому розподіл величини x_2^* залежить від того, яке значення набула x_1^* : $f(x_2^*|x_1^*) = f(x_2^*)$. Це означає, що змінні статистично незалежні. Отриманий сукупний розподіл далекий від вихідного (рис. 1а), тобто суміш розділена невірно. Це відбувається оскільки вихідне для розділення джерел за допомогою PCA припущення про нормальність розподілу джерел у даному випадку не виконується.

Розглянемо результат роботи алгоритму ICA (рис. 1г). Бачимо, що при змінюванні змінної x_1^* , не змінюється не тільки математичне сподівання змінної x_2^* , але і її розподіл. Це означає,

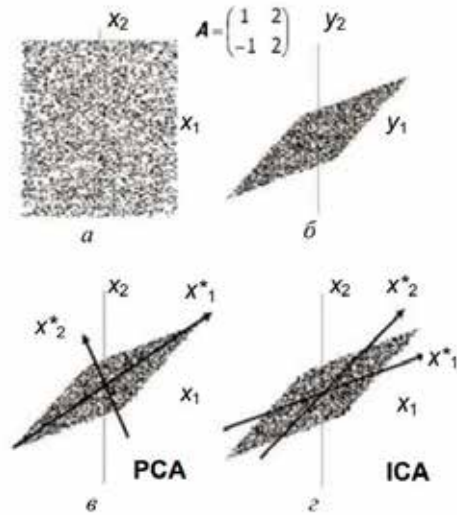


Рис. 1. Приклад розділення сумішей методами PCA та ICA. Сукупний розподіл: а – незалежних випадкових змінних x_1 та x_2 ; б – сумішей y_1 та y_2 ; в – PCA оцінок x_1^* та x_2^* ; г – ICA оцінок x_1^* та x_2^*

що змінні – статистично незалежні, оскільки розподіл величини x_2^* не залежить від того, яке значення набула x_1^* : $f(x_2^*|x_1^*)=f(x_2^*)$. Сукупний розподіл змінних x_1^* та x_2^* співпадає з вихідним (рис. 1а). Отже, задача виділення прихованих джерел розв’язана.

Експериментальне дослідження пригнічення завад в однорідній антенній системі.

Ефективні методи, що використовується при пригнічення активних завад на основі матричних розкладань розроблено у [14].

На відміну від неоднорідних систем, де для оцінки якості використовується коефіцієнт пригнічення завади, для однорідної антенної системи якість відновлення сигналу із суміші оцінюється відношенням сигнал-шум (ВСШ) на виході алгоритму:

$$ВСШ = 10 \log_{10}(\|\mathbf{x}\|^2/\|\mathbf{x}-\mathbf{x}^*\|^2),$$

де $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^L$ – вектор сигналу джерела, $\mathbf{x}^* \in \mathcal{R}^L$ – вектор оцінки сигналу джерела, отриманий як результат роботи алгоритму розділення суміші. В експериментальному дослідженні моделюється наступна ситуація. Завади випромінюються в ефір $N-1$ антенними системами (всього $N-1$ завада). Окрім того, в ефірі присутній один корисний сигнал.

Приймальна антенна система налічує N каналів. Позначимо A_{ij} – коефіцієнт підсилення (КП) i -го каналу для j -го сигналу – активної завади або корисного сигналу, який надходить з напрямку α_j . Коефіцієнти підсилення сигналу, що надходить з напрямку α , визначаються діаграмою спрямованості антени.

Таким чином, \mathbf{A} ($N \times N$) – матриця змішування, елементи якої є коефіцієнтами підсилення для приймаючих каналів. Номер стовпчика матриці \mathbf{A} відповідає номеру антенного каналу, номер рядка 1 відповідає корисному сигналу. Матриця \mathbf{A} повинна бути не виродженою. Сигнали антенних каналів однорідної антенної системи імітувалися з використанням лінійної моделі: $\mathbf{Y} = \mathbf{XA} + \mathbf{\Xi}$, де \mathbf{Y} – матриця сигналів антенних каналів розміром $L \times N$; L – кількість зразків, N – кількість каналів, \mathbf{X} – матриця сигналів активних завад (сформована випадковими величинами з рівномірним розподілом); $\mathbf{\Xi}$ – матриця власних шумів каналів (сформована центрованими випадковими величинами з нормальним розподілом).

З моделі змішування сигналів видно, що рівень сигналу на виході антенного каналу визначається: рівнями корисного сигналу та активних завад на вході антенного каналу, а також значеннями елементів матриці змішування \mathbf{A} . Зміна діаграми спрямованості антени (наприклад, за рахунок обертання антени) відповідає зміні значень елементів матриці змішування. При цьому може скластися така ситуація, коли стовпці або рядки матриці змішування виявляються лінійно залежними. Таким чином, діаграма спрямованості та обумовленість матриці змішування – пов'язані. При моделюванні, рівнем власних шумів антенних каналів та рівнем активної завади будемо називати коефіцієнт, на який множаться реалізації відповідних випадкових процесів з одиничною дисперсією.

Дослідження залежності ВСШ від рівня власного шуму.

Мета експерименту – дослідити залежність ВСШ від РВШК каналів при різних коефіцієнтах підсилення корисного сигналу (КПС) в одному з каналів для методів PCA, ICA та MDL. Корисний сигнал подано імпульсом з тривалістю 5 відліків та одиничною амплітудою, сигнал активної завади моделюється реалізацією випадкового процесу довжиною $L=100$ відліків з рівномірним розподілом та математичним сподіванням, що дорівнює нулю, $PA3=10$. Відповідно, сигнали сумішей подано $L=100$ зразками. Досліджувана ситуація відповідає випадку, коли: – завада, що випромінюється в ефір, має постійний рівень ($PA3=10$), – корисний сигнал надходить на різні відтинки діаграми спрямованості антенних елементів і тому множиться на різні коефіцієнти підсилення. Далі, із суміші методами PCA, ICA та MDL виділявся імпульс корисного сигналу та обчислювалися відповідні ВСШ.

При значенні КПС=3 проведено дослідження ВСШ= $f(\text{РВШК})$ в діапазоні власних шумів каналів: РВШК={0.005, 0.01, ..., 2.56} для PCA, FastICA, MDL та пригнічення завад на основі апроксимаційного підходу PRGM.

Виявлено наступне. Зі зростанням амплітуди адитивного шуму від 0.005 до 2.56, ВСШ спадає: для MDL з 70.84дБ (при 0.005) до 16.8 дБ (при 2.56), для FastICA – з 59.27 до 16.8 дБ, для PCA – з 12.6 до 11.09 дБ, для PRGM – з 15.2 до 12.87 дБ. При малих значеннях РВШК (від 0.005 до 0.08), РВШ MDL більший за РВШ FastICA, а при РВШ PRGM – у всьому діапазоні власних шумів (рис. 2).

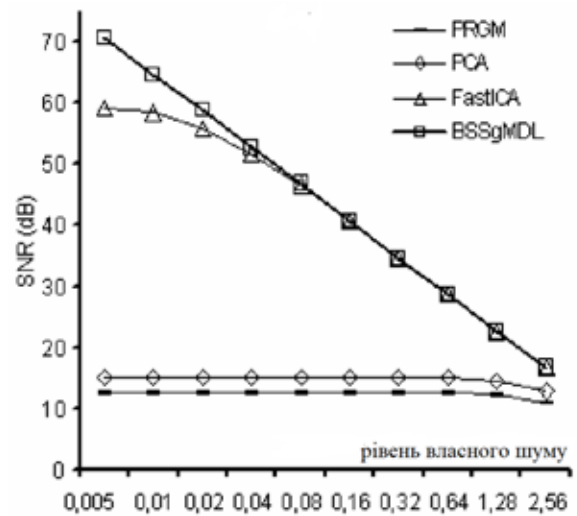


Рис. 2. Залежність відношення сигнал-шум від рівня власного шуму

Висновок. Таким чином, порівняння залежностей якості відновлення корисного сигналу від РВШК для алгоритмів пригнічення завад PRGM, PCA, FastICA, MDL показало наступне. Для всіх досліджених алгоритмів ВСШ падає з ростом РВШК. Для алгоритмів PRGM, PCA ВСШ спадає повільніше, ніж для FastICA та MDL, однак при цьому ВСШ для PRGM та PCA менше, ніж для FastICA та MDL.

Низькі значення ВСШ для PRGM пов'язані з тим, що цей метод відноситься до апроксимаційного підходу, а для нього в однорідній антенній системі порушується припущення про наявність корисного сигналу тільки в одному каналі антенної системи. Низькі значення ВСШ для PCA, можливо, пов'язані з тим, що порушується припущення про гаусовість розподілу сигналів джерел. Перевищення ВСШ для MDL над FastICA при низьких значеннях РВШК пов'язано з тим, що MDL, на відміну від FastICA, враховує власний

шум за рахунок побудови моделі для оцінок сигналів джерел в процесі вирішення відповідного оптимізаційного завдання.

Дослідження залежності ВСШ від рівня активної завади. На відміну від рівня власних шумів антенних каналів, які в даній задачі можуть регулюватися, рівень активної завади – це зовнішній відносно антенної системи чинник, не досяжний для регулювання. Тому, актуальним є дослідження впливу рівня активної завади на ВСШ для методів на основі PCA, ICA та MDL.

Проведемо експериментальне дослідження залежності ВСШ від рівня активної завади для випадку, коли довжина корисного сигналу складає 15 відліків. Мета експерименту – дослідження точності відновлення корисного сигналу з суміші двох сигналів при зростанні рівня активної завади. Експеримент дасть можливість зрозуміти, чи погіршує зростаючий рівень активної завади характеристики пригнічення для методів на основі PCA, ICA та для MDL. В даному експерименті суміші сигналів були сформовані шляхом множення матриці сигналів джерел на матрицю змішування A .

Сигнали джерел в експерименті наступні: перший – імпульс довжиною 15 відліків та одиничною амплітудою, другий – реалізація випадкового процесу довжиною в 100 відліків з нормальним розподілом та математичним сподіванням, що дорівнює нулю. Рівень активної завади змінювався з 5 до 10^5 . Далі, з суміші методами PCA, ICA, MDL виділявся імпульс корисного сигналу та обчислювалося відповідне ВСШ. Залежність відношення сигнал-шум від рівня активної завади

за відсутності адитивного власного шуму наведено на рис. 3.

Для PCA ВСШ спочатку зростає з ростом рівня активної завади, але при подальшому зростанні рівня завади – утримує постійне значення. Таке поведіння пов'язано з тим, що PCA орієнтує осі нової системи координат у напрямку максимальної дисперсії. В разі, коли амплітуди джерел сигналу порівнювані, вибір напрямку максимальної дисперсії є чутливим до співвідношення амплітуд джерел сигналу. Відповідно, при змінненні PAЗ з 10 до 10^3 відношення сигнал-шум зростає. В тому разі, коли амплітуда одного з джерел набагато перевищує амплітуду іншого, напрямком максимальної дисперсії визначається максимальною амплітудою, тому для PAЗ з 10^3 до 10^5 – ВСШ постійно. Для алгоритмів ICA та MDL – ВСШ не залежить від PAЗ. Це пов'язано з тим, що ICA та MDL використовують апріорне припущення про незалежність джерел сигналів.

При одночасному збільшенні амплітуди однієї з компонент в обох складових суміші сигналів – взаємна інформація між сигналами сумішей не змінюється, та ВСШ не залежить від PAЗ одного з джерел (при незмінному PAЗ другого джерела). Залежність $BCШ=f(PAЗ)$ за наявності в сумішах сигналів власного шуму каналів – наведена на рис. 3. Описані вище тенденції поведінки характеристики $BCШ=f(PAЗ)$ зберігаються для випадку, коли в сумішах сигналів наявний власний шум антенних каналів.

Отже, метод пригнічення завад на основі MDL забезпечує високе та, практично, постійне відношення сигнал-шум в усьому дослідженому

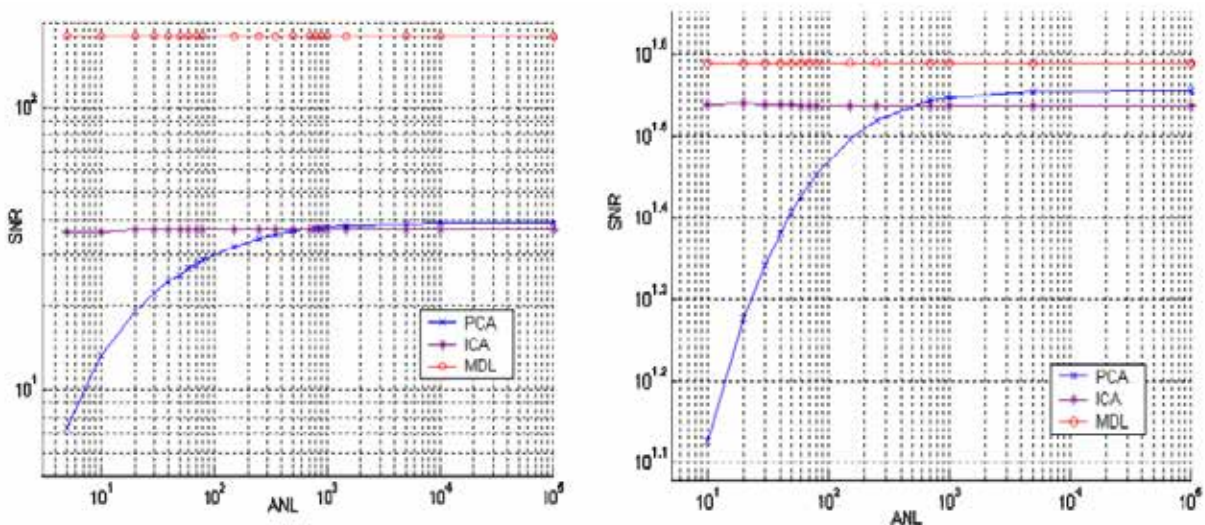


Рис. 3. Залежність відношення сигнал-шум від рівня активної завади. Ліворуч – за відсутності адитивного власного шуму; праворуч – за наявності в сумішах сигналів власного шуму каналів

діапазоні рівнів активної завади. Для імпульсу корисного сигналу тривалістю в 15 відліків, – відношення сигнал-шум для методів PCA та FastICA змінюється (зростає до сталого значення) монотонно в залежності від рівня активної завади.

Висновки. У даному дослідженні для пригнічення завад в однорідній антенній системі використано методи виділення прихованих джерел (blind source separation), які обробляють суміш сигналів таким чином, що на виході отримуємо оцінки сигналів – складових суміші.

В проведеному експериментальному дослідженні встановлено залежності відношення сигнал-шум від рівня власного шуму антенних каналів, та залежності відношення сигнал-шум від рівня активної завади. Експериментами

підтверджено ефективність методів усунення активних завад заснованих на аналізі головних компонент та аналізі незалежних компонент відносно методів апроксимаційного підходу, що традиційно використовуються для усунення завад в неоднорідній антенній системі. Для корисного сигналу імпульсної форми, – відношення сигнал-шум для методів заснованих на PCA та ICA монотонно зростає до сталого значення в залежності від рівня активної завади. Метод пригнічення завад на основі мінімальної довжини опису забезпечує високе та, практично, постійне відношення сигнал-шум в усьому дослідженому діапазоні рівнів активної завади. Напрямок майбутніх досліджень є розвиток методів в напрямку підвищення стійкості розв'язку до адитивного шуму.

Список літератури:

1. Monzingo R. A., Miller T. W. Introduction to Adaptive Arrays. SciTech Publishing. 2004
2. Capon J. High-resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis. *Proceedings of the IEEE*. 1969. vol. 57. pp. 1408–1418. <https://doi.org/10.1109/proc.1969.7278>
3. Pisarenko V. F. The retrieval of harmonics from a covariance function *Geophysics. J. Roy. Astron. Soc.* 1973. vol. 33. pp. 347–366. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1973.tb03424.x>
4. Stoica P., Nehorai Aryl. Performance comparison of subspace rotation and MUSIC methods for direction estimation. *IEEE Trans. on Acoust., Speech., Signal Process.* 1991. vol. 39, no 2. pp. 446–453. <https://doi.org/10.1109/78.80828>
5. Roy R., Kailath T. ESPRIT – estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. *IEEE Trans Acoust., Speech and Signal Process.* 1989. vol. 37, № 7. pp. 984–995.
6. Haykin, S. Neural Networks and Learning Machines. Third Edition, Pearson Education, Inc., McMaster University, Hamilton. 2009.
7. Comon P. Independent component analysis: a new concept. *Signal Processing*. 1994. vol. 36. pp. 287–314.
8. Hyvarinen A. New approximation of differential entropy for Independent Component Analysis and Projection Pursuit. *Advances in Neural Information Processing Systems. MIT Press.* 1998. vol. 10. pp. 273–279.
9. Hyvarinen A., Karhunen J., Oja E. Independent Component Analysis. John Wiley, New York. 2001.
10. Bach F.R., Jordan M.I. Kernel Independent Component Analysis. *Journal of Machine Learning Research.* 2002. vol. 3. pp. 1–48. <https://doi.org/10.1162/15324430376896608>
11. Cardoso J.F. High-order contrasts for independent component analysis. *Neural Computation.* 1999. vol. 11, no. 1. pp. 157–192.
12. Bell A.J., Sejnowski T.J. An information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution. *Neural Computation.* 1995. vol. 7, no 6. pp. 1129–1159. <https://doi.org/10.1162/neco.1995.7.6.1129>
13. Shannon C.E. A mathematical theory of communication. Pt. I, II. *Bell. Syst. Techn. J.* 1948. vol. 27, no 3. pp. 379–423. vol. 27, no 4. pp. 623–656.
14. Ревунова О.Г. Рандомізовані матричні обчислення та сингулярне розкладання для ефективного пригнічення активних завад в радіолокаційних системах. *Кібернетика та обчислювальна техніка.* 2023. 3(213). сс. 36–52. <https://doi.org/10.15407/kvt213.03.036>

Desiateryk O.O., Kuntysch O.S., Revunova E.G. THE EFFICIENCY INCREASING OF JAMMING CANCELATION IN AN ANTENNA SYSTEM

Jamming which is formed with a purpose of decreasing of a work efficiency of an antenna system, anti-aircraft missile systems, communication systems leads to large losses. Therefore, it is relevant to improve jamming cancelation systems.

The work is devoted to improving methods for jamming cancellation under conditions of uncertainty. By uncertainty we mean small signal sampling length, presence of the measuring system noise, undetermined numerical rank of the input-output transformation matrix, lack of a priori information about the useful signal. Existing approaches to jamming cancellation are considered and their flaws are analyzed.

In this article we propose to use blind source separation methods for jamming cancellation in a homogeneous antenna system. After processing signal mixtures by these methods as an output there are obtained estimations for mixture signals. The most well-known approaches to blind source separation are principal component analysis PCA and independent component analysis ICA. To solve the problem of blind source separation, the following a priori assumptions about the sources are used: statistical independence and non-Gaussian distribution (independent component analysis), uncorrelation and Gaussian distribution (principal component analysis).

We conducted an experimental study of the dependence of the signal-to-noise ratio on the level of noise of antenna channels, and the dependence of the signal-to-noise ratio on the level of jamming. Experiments have confirmed the effectiveness of jamming cancellation methods based on principal component analysis and independent component analysis compared to the approximation approach methods traditionally used to jamming cancelation in a heterogeneous antenna system. For a useful impulse-shaped signal, the signal-to-noise ratio for methods based on PCA and ICA monotonically increases to a constant value depending on the level of active interference. The jamming cancellation method based on the minimum description length provides a high and, practically, constant signal-to-noise ratio throughout the studied range of jamming levels.

Keywords: *jamming cancelation, principal component analysis, independent component analysis, heterogeneous antenna system, jamming.*

Дата першого надходження статті до видання: 25.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026