

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І  
ЗВ'ЯЗКУ

**ТКАЧУК ОЛЕНА ВІКТОРІВНА**

УДК 621.391.8



**ВІДНОВЛЕННЯ СИГНАЛІВ ЗОБРАЖЕНЬ В УМОВАХ ШУМОВИХ  
ЗАВАД МЕТОДОМ ІНВЕРСІЇ ВИБІРКОВИХ ОЦІНОК КОРЕЛЯЦІЙНОЇ  
МАТРИЦІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Військовій академії (м. Одеса) Міністерства оборони України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Скачков Валерій Вікторович**,  
Військова академія (м. Одеса),  
головний науковий співробітник Наукового  
центру

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент  
**Іохов Олександр Юрійович**,  
Національна академія Національної гвардії  
України (м. Харків),  
начальник кафедри військового зв'язку та  
інформатизації

кандидат технічних наук, доцент  
**Перелигін Борис Вікторович**,  
Одеський державний екологічний  
університет,  
завідувач кафедри автоматизованих систем  
моніторингу навколишнього середовища

Захист дисертації відбудеться « 06 » травня 2021 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.816.01 Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.

Автореферат розісланий « 03 » квітня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



---

В.І. Тіхонов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В процесі передачі та прийому в інформаційних радіотехнічних системах, сигнали зображень піддаються впливу різних шумових завад довільної інтенсивності, що в результаті призводить до погіршення візуальної якості та, зокрема, до втрати ділянок зображення.

Послаблення результату дії завад досягається за рахунок просторової або частотної фільтрації. При цьому, зображення розглядається як двомірний сигнал, який є значно більш ємним носієм інформації, ніж звичайний одновірний (часовий) сигнал і, отже, потребує застосування специфічних методів обробки, відмінних від традиційних. Ідея двомірної фільтрації полягає у заміні яскравості кожної спотвореної завадою точки растру зображення на інше значення яскравості з околу цієї точки (маски фільтру), найменш спотворене завадою. Питання вибору іншого значення яскравості вирішують, зазвичай, спираючись на ймовірнісні моделі зображення та завад. Отже, задача оптимальної двомірної фільтрації зводиться до пошуку такої раціональної обчислювальної процедури, яка дозволяє досягти найкращої якості відновлення зображення.

На даний час, існує безліч різноманітних методів двомірної просторової, частотної та вейвлет обробки зображень. Просторова фільтрація елементів прийнятої реалізації зображення така, як лінійна, нелінійна та байєсівська має обмежену здатність до пригнічення шумових завад значного рівня, оскільки вибір розміру маски залежить від наявності апріорної інформації про початкове (не зашумлене) зображення та характеристик шумової складової.

Методи частотної та вейвлет фільтрації базуються на переході від просторової до частотної області за допомогою фур'є-перетворень. При цьому, процес обробки зображень потребує використання потужних обчислювальних засобів, навіть при застосуванні швидкого фур'є-перетворення. Слід зазначити, що спектральним методам обробки притаманні систематичні похибки, пов'язані з процедурою переходу до частотної області. Крім того, якщо потужність шумової завади значно перевищує потужність сигналу зображення, то перетворення Фур'є не впливають на спектр прийнятої реалізації і відновлення зображення не відбувається.

Значний внесок в розробку методів вирішення задачі відновлення зображення на фоні шумових завад зробили Бакушинський А.Б., Верлань А.Ф., Воскобойников Ю.Є., Грузман І.С., Красильников М.М., Претт У., Сойфер В.О., Старовойтов В.В., Тербиж В.Ю., Хуанг Т., Яне Б., Ярославський Л.П. та інші.

На жаль, в дійсний час відсутні методи двомірної фільтрації, в яких об'єднані максимально можлива якість відновлення зображення та незначні обчислювальні затрати. Більш того, в силу самої ідеї фільтрації, їх застосування ефективно лише у випадку значного перевищення потужності сигналу зображення над потужністю шумової завади і, тому, в умовах прийому сигналу зображення на фоні шумових завад значної інтенсивності такі методи можуть розглядатися тільки як засіб вторинної обробки.

Збільшення течії інформації, що передається в сучасних радіотехнічних системах приводить до високої динаміки змінення «сигнально-завадової» обстановки та непередбачуваності параметрів завад, що актуалізує задачу відновлення сигналів зображень в умовах апріорної невизначеності, коли з боку прийому невідомими є кількість джерел шумових завад, їх розташування в просторі та інтенсивність.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами**

Дисертаційна робота є фрагментом науково-дослідних робіт «Відновлення зображень об'єктів на основі адаптації інформаційно-вимірювальних радіотехнічних систем» (ОДАТРЯ, 2016-2017 р., № держреєстрації 0116U003479) та «Дослідження проблеми забезпечення ефективності функціонування наземного робототехнічного комплексу шляхом стабілізації динамічних параметрів адаптивної інформаційно-керуючої системи в умовах дестабілізуючих факторів» (ВА (м. Одеса), 2019-2020 р., ТТЗ № 2256 від 26.04.2019 р.), виконаних на замовлення МОН України та начальника Воєнно-наукового управління ГШ ЗСУ, відповідно.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка та дослідження методу відновлення сигналів зображень в умовах шумових завад довільної інтенсивності в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою на основі інверсії вибіркового оцінок кореляційної матриці спостережень. Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання:

- провести аналіз та узагальнити сучасні дані літератури з питань обробки зображень на фоні адитивних шумів та сформулювати в операторній формі задачу відновлення сигналів зображень в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою;
- дослідити вибірково оцінки кореляційної матриці спостережень, сформовані безпосередньо та методом статичної регуляризації (регуляризації зі сталим параметром), на стійкість і слухність за критерієм збіжності матричних норм;
- розробити метод регуляризації вибіркового оцінок кореляційної матриці спостережень, який дозволить вирішити проблему обчислювальної стійкості і слухності цих оцінок та застосувати його до задачі відновлення сигналів зображень в умовах шумових завад довільної інтенсивності;
- розробити метод відновлення сигналів зображень в умовах шумових завад довільної інтенсивності, інваріантний до кореляції корисних сигналів;
- побудувати статистичні моделі розроблених методів відновлення сигналів зображень в умовах шумових завад довільної інтенсивності в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою та провести аналіз отриманих результатів.

**Об'єкт дослідження:** процес відновлення сигналів зображень в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою.

**Предмет дослідження:** методи та алгоритми відновлення сигналів зображень в умовах шумових завад довільної інтенсивності в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою.

**Методи дослідження:** матричне числення, математичний аналіз, комплексний аналіз, обчислювальна лінійна алгебра, теорія звичайних диференціальних рівнянь, методи рішення некоректних задач, методи багатомірної оптимізації, теорія випадкових процесів, методи статистичного моделювання за допомогою пакета прикладних програм MATLAB.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У ході виконання дисертаційної роботи отримано наступні нові наукові результати:

1. Вперше запропоновано використання методу, заснованого на інверсії кореляційної матриці спостережень для відновлення сигналів зображень в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою. Запропонований метод, на відміну від існуючих, передбачає оцінку кореляційної матриці спостережень в умовах апіорної невизначеності з її подальшою інверсією, що дозволяє відновлювати сигнали зображень на фоні шумових завад довільної інтенсивності.

2. Вперше запропоновано метод динамічної регуляризації вибірових оцінок кореляційної матриці спостережень з оптимальним за критерієм мінімуму матричної норми параметром, рівним розмірності кореляційної матриці (розмірності адаптивної антенної решітки). Цей метод, на відміну від відомого методу статичної регуляризації (регуляризації зі сталим параметром), не порушує властивість саморегуляризації вибірової оцінки кореляційної матриці і, тому, задовольняє критерій оптимальності «обчислювальна стійкість – слухність», що непринятно методу статичної регуляризації.

3. Розроблено метод відновлення сигналів зображень, що базується на розв'язку перевизначеної системи рівнянь, складених по результатах просторового спектрального аналізу «сигнально-завадової» обстановки. На відміну від відомих методів, цей метод оснований на псевдооберненій матриці, яка формується по результатах спектрального аналізу, що дозволяє скоротити об'єм вибірки потрібний для якісного відновлення сигналів зображень в умовах шумових завад довільної інтенсивності.

4. Розроблена дослідницька стохастична модель процесу відновлення сигналів зображень на фоні шумових завад довільної інтенсивності в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою за допомогою пакета прикладних програм MATLAB, яка дозволяє порівнювати якість відновлення зображень за розробленим та відомими методами.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в наступному:

1. Розроблені методи дозволяють відновлювати сигнали зображень на фоні зовнішніх шумів істотного та штучного походження довільної інтенсивності в інформаційних радіотехнічних системах з адаптивною антенною решіткою.

2. Розроблений метод динамічної регуляризації вибірових оцінок кореляційної матриці спостережень дозволяє отримати рішення оберненої задачі в режимі реального часу без залучення апіорних даних та додаткових обчислювальних затрат на пошук оптимального параметра регуляризації.

3. Запропонований інваріантний до кореляції корисних сигналів метод використовує тільки результати просторового спектрального аналізу і, тим самим, скорочує обчислювальні затрати на процес відновлення сигналів зображень.

4. Розроблений метод відновлення сигналів зображень, що базується на розв'язку перевизначеної системи рівнянь, може бути використаний в умовах прийому довільної кількості як сигналів зображень, так і шумових завад довільної інтенсивності від незалежних джерел.

5. Запропоновані математичні моделі та методи можуть бути використані під час розробки, впровадження і використання в інформаційних радіотехнічних системах, які призначені для передачі сигналів зображень в умовах шумових завад істотного та штучного походження довільної інтенсивності.

**Особистий внесок здобувача.** Усі математичні обґрунтування, що підтверджують результати проведених статистичних експериментів зроблені здобувачем особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, внесок здобувача полягає в наступному: монографія [1] – систематизація методів двомірної обробки зображень та постановка в операторній формі задачі відновлення сигналів зображень в адаптивній інформаційній системі; монографії [2], [3] – вступ, аналіз літературних джерел, математичні викладки; розділ монографії [4] – отримана математична модель сигналу зображення на фоні внутрішнього шуму; стаття [5] – аналіз літературних джерел та математичне обґрунтування методу динамічної регуляризації, ілюстративний матеріал; стаття [6] – вивід виразу функції правдоподібності для вибірки з багатомірного комплексного нормального стаціонарного процесу з фіксованим рівнем середнього; стаття [7] – математичне обґрунтування інваріантного до кореляції корисних сигналів методу визначення вагових коефіцієнтів та статистичне моделювання процесу відновлення сигналів зображень в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою за допомогою пакета прикладних програм MATLAB; статті [8], [9] – написані особисто; стаття [10] – аналіз літературних джерел, висновки, ілюстративний матеріал.

#### **Апробація результатів дисертації**

Основні положення роботи викладено та обговорено на науково-практичних конференціях різного рівня: Всеукраїнська науково-практична конференція «Спільні дії військових формувань держави: проблеми та перспективи» (Одеса, 10-11 вересня 2014); Третя Всеукраїнська науково-практична конференція «Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи» (Одеса, 22-23 вересня 2016); Шоста Міжнародна науково-практична конференція «Метрологія, технічне регулювання, якість: досягнення та перспективи» (Одеса, 11-12 жовтня 2016); Шоста Всеукраїнська науково-практична конференція «Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи» (Одеса, 12-13 вересня 2019).

**Публікації.** За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 15 наукових праць, з яких 3 монографії (1 монографія у іноземному виданні); 1

розділ монографії у іноземному виданні; 5 статей у фахових наукових виданнях України з технічних наук (1 – у наукометричній базі Scopus; 2 – у наукометричній базі Index Copernicus); 1 стаття у науковому виданні України з технічних наук; 5 публікацій в збірниках матеріалів міжнародних та всеукраїнських конференцій.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота викладена на 168 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 113 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 5 таблицями, 31 рисунком, 9 схемами та 3 програмами, написаними в пакеті MATLAB. Список використаних джерел містить 94 найменування.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, висвітлено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та їх апробацію, особистий внесок здобувача, опубліковані наукові праці, структуру та обсяг дисертації.

У **першому розділі «Основні положення теорії прийому зображення по цифровому каналу зв'язку»** розглянута узагальнена модель цифрового каналу передачі зображення та проаналізовані існуючі методи двомірної просторової, частотної та вейвлет обробки зображень на фоні шумових завад довільної інтенсивності.

Показано, що для методів двомірної фільтрації математична модель прийнятої на фоні адитивного шуму реалізації зображення  $\mathbf{Y}(x, y)$  має вигляд  $\mathbf{Y}(x, y) = \mathbf{L}(x, y) + \mathbf{N}(x, y)$ , де  $\mathbf{L}(x, y) = \{L_{ij}\}; i = \overline{1, M}; j = \overline{1, N}$  – початкове (не зашумлене) зображення, що є матрицею, елементами якої є значення інтенсивності зображення;  $\mathbf{N}(x, y)$  – адитивний шум. Просторова фільтрація елементів прийнятої реалізації зображення  $Y_{ij}, i = \overline{1, M}; j = \overline{1, N}$  за допомогою фільтра розміру  $m \times n$  задається виразом вигляду  $\tilde{L}_{ij} = \sum_{(k, p) \in S_{xy}} w_{kp} Y_{kp}, k = \overline{1, m}; p = \overline{1, n}$ , де  $w_{kp}$  – коефіцієнти маски фільтра,  $S_{xy}$  – окіл, покритий маскою фільтра.

Проаналізовано існуючі методи двомірної обробки зображень такі, як лінійна, нелінійна, байєсовська, частотна та вейвлет фільтрації, стосовно їх здатності пригнічувати адитивні шуми значного рівня. Зроблено висновок, що ці методи ефективно пригнічують шум тільки при  $\|\mathbf{L}(x, y)\|_{G^2} \geq \|\mathbf{N}(x, y)\|_{G^2}$ , де  $\|\cdot\|_{G^2}$  – норма у гільбертовому просторі. Інакше, вони не є ефективними, що наочно підтверджено результатами проведених імітаційних випробувань при різних значеннях відношення сигнал/шум.

Зазначено, що для відновлення зображення у випадку, коли  $\|\mathbf{L}(x, y)\|_{G^2} < \|\mathbf{N}(x, y)\|_{G^2}$ , необхідно перейти від двомірного зображення до

одномірному сигналу-носію зображення за допомогою формул зв'язку між матричним та векторним поданням двомірного масиву

$$\mathbf{s}(t) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=(j-1)N+1}^{j \cdot N} \mathbf{A}_{ij} \cdot \mathbf{L}(x, y) \cdot \mathbf{B}_{i-(j-1)N}, \quad \text{де } \mathbf{A}_{ij} \text{ розміру } M \cdot N \times M \text{ та}$$

$\mathbf{B}_{i-(j-1)N}$  розміру  $N \times 1$  є матрицями, в яких відповідні елементи  $a_{ij}$  та  $b_{i-(j-1)N,1}$  дорівнюють 1, а всі інші дорівнюють 0. Тоді, задача відновлення сигналу зображення  $\mathbf{s}(t)$  зводиться до пошуку лінійного обмеженого оператора  $P: G^1 \rightarrow G^1$ , якій перетворює вхідний векторний процес  $\mathbf{y}(t)$  в оцінку  $\tilde{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{y}(t)$ , параметрично залежну від вагових коефіцієнтів  $\mathbf{w}^T = \{w_i\}; i = \overline{1, m}$  та мінімізує нормовану середньоквадратичну помилку

$$\varepsilon(\mathbf{w}) = \min_{\mathbf{w} \in \Omega_{\mathbf{w}}} \frac{\|\tilde{\mathbf{s}}(t) - \mathbf{s}(t)\|_{G^1}^2}{\|\mathbf{s}(t)\|_{G^1}^2}, \quad (1)$$

де  $\Omega_{\mathbf{w}}$  – область припустимих значень вагових коефіцієнтів;  $G^1$  – одномірний гільбертів простір.

У другому розділі «Синтез адаптивної системи прийому сигналів зображень в умовах адитивних шумових завад» розглянуто процес формування сигналів, що надходять до інформаційної системи з  $N$ -мірною адаптивною антенною решіткою. Якщо джерело сигналу  $s(t)$  розташовано під кутом  $\theta$  відносно нормалі до вісі антенної решітки, то фронт плоскої хвилі надходить до елементів  $k = \overline{1, N}$  із затримкою за часом  $(k-1)\Delta\tau$ , де  $\Delta\tau = d \sin \theta / v$ ;  $d$  – відстань між елементами антенної решітки;  $v$  – швидкість сигналу, що випромінюється. Тоді, сигнал  $s(t)$  якій надходить до елементів  $k = \overline{1, N}$  буде прийнято у вигляді  $s(t - (k-1)\Delta\tau)$ . Використавши розклад функції  $s(t - k\Delta\tau)$  до ряду Тейлора по степенях  $k\Delta\tau$ , доведено, що сигнали на виході з кожного елемента антенної решітки відрізняються тільки фазовими зсувами  $(k-1)\varphi(\theta) = (k-1)2\pi d \sin \theta / \lambda_0$ ;  $k = \overline{1, N}$ . Отже, вектор сигналу, що надходить до відповідних елементів можна записати у вигляді  $\mathbf{s}(t) = s(t) \mathbf{v}(\theta)$ , де  $\mathbf{v}(\theta) = \{e^{-(k-1)j\varphi(\theta)}\}; k = \overline{1, N}$  – вектор-стовпець амплітудно-фазового розподілу сигналу  $s(t)$  по розкритву  $N$ -мірної антенної решітки, залежний від зсуву фаз  $\varphi(\theta)$ .

На підставі цього факту побудована математична модель вузькосмугового сигналу, що формується в інформаційній системі на вході елементів адаптивної антенної решітки в просторово-часовому змісті

$$\mathbf{y}(t) = \sum_{m=1}^M s_m(t) \mathbf{v}(\theta_m) + \sum_{k=M+1}^{M+K} n_k(t) \mathbf{v}(\theta_k) + \mathbf{n}_0(t),$$



де  $s_m(t)$ ;  $m = \overline{1, M}$  – джерела корисної інформації;  $n_k(t)$ ;  $k = \overline{M+1, M+K}$  – джерела завад;  $\mathbf{n}_0(t) = \{n_{n_1}(t)\}$ ;  $n = \overline{1, N}$  – вектор-стовпець внутрішніх шумів каналів прийому антенної решітки.

Розглянуто властивості апроксимації кореляційної матриці багатомірною випадкового процесу  $\mathbf{y}(t)$ , яка використовується для вирішення задач виявлення і оцінки параметрів сигналів, що приймаються в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою та має наступний вигляд  $\mathbf{R} = \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_j + \mathbf{R}_n$ , де  $\mathbf{R}_s = \mathbf{V}_s \mathbf{P}_s \mathbf{V}_s^H$ ;  $\mathbf{R}_j = \mathbf{V}_j \mathbf{P}_j \mathbf{V}_j^H$  та  $\mathbf{R}_n = P_0 \cdot \mathbf{I}$  – кореляційні матриці сигналів зображень, адитивних шумів і внутрішнього шуму;  $\mathbf{V}_s = \{\mathbf{v}(\theta_m)\}$ ;  $m = \overline{1, M}$  та  $\mathbf{V}_j = \{\mathbf{v}(\theta_k)\}$ ;  $k = \overline{M+1, M+K}$  – матриці фазових зсувів сигналів зображень і адитивних шумів;  $\mathbf{P}_s = \{M [s_m(t) \cdot s_u(t)]\}$ ;  $m, u = \overline{1, M}$  та  $\mathbf{P}_j = \text{diag}(\sigma^2(n_k(t)))$ ;  $k = \overline{M+1, M+K}$  – матриці моментів сигналів зображень і адитивних шумів;  $P_0$  – потужність елементів антенної решітки;  $\mathbf{I}$  – одинична матриця порядку  $N$ ;  $(\cdot)^H$  – знак ермітового спряження. Зазначено, що властивості цієї матриці, вибіркова оцінка якої застосовується для аналізу просторового спектру радіовипромінювань та обчислення оптимального вектора вагових коефіцієнтів, визначають особливості адаптивної обробки сигналів зображень, що приймаються від декількох джерел на фоні шумів.

Отримано вираз для системи оптимальних незалежних параметричних вагових векторів, необхідних для відновлення сигналів зображень на фоні шумових завад довільної інтенсивності, що приймаються від декількох незалежних джерел в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою

$$\mathbf{w}_i^H = K(\theta_i) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(\theta_i); \quad i = \overline{1, M+K}, \quad (2)$$

де через  $K(\theta_i)$  позначено скаляр  $K(\theta_i) = 1/\mathbf{v}^H(\theta_i) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(\theta_i)$ .

Показано, що отримана система параметричних вагових векторів з точністю до постійного множника є вінеровським розв'язком. Оскільки точна кореляційна матриця  $\mathbf{R}$  відома тільки при проведенні досліджень на моделях, то на практиці замість неї використовують оцінку  $\tilde{\mathbf{R}}$ , отриману з вибірки змінного об'єму  $L$  вхідного векторного процесу  $\mathbf{y}(t)$ , яка також використовується методами просторового спектрального аналізу для визначення необхідної оцінки напрямку фокусування  $\tilde{\theta}_i$  на джерело сигналу.

Відповідно до системи (2) побудовано алгоритм обробки сигналів в адаптивному процесорі  $N$ -мірної адаптивної антенної решітки

$$\tilde{\mathbf{s}}_i = \mathbf{w}_i^H \mathbf{y}(t) = K(\tilde{\theta}_i) \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{v}(\tilde{\theta}_i) \mathbf{y}(t); \quad i = \overline{1, M+K}. \quad (3)$$

Реалізація цього алгоритму наведена на рис. 1 у вигляді багатоканального процесору.

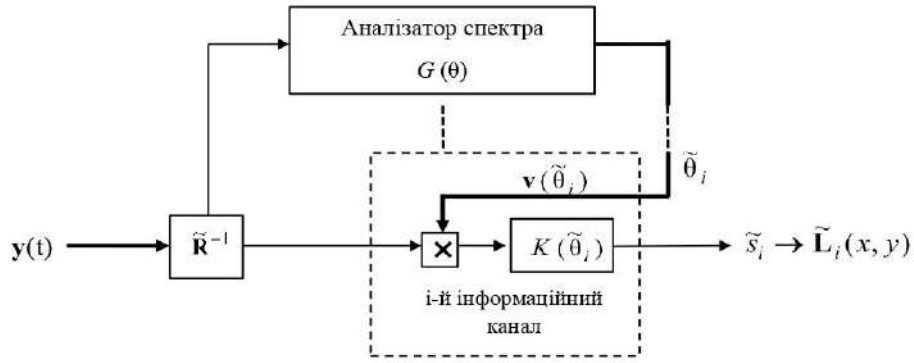


Рис. 1 Структура адаптивного процесору  $N$ -мірної адаптивної антенної решітки, що реалізує обробку  $i = 1, M + K$  сигналів, відповідно до методу (3)

Виходячи з основних понять багатомірного комплексного статистичного та матричного аналізу, виведено аналітичний вираз функції правдоподібності для тотожно розподілених випадкових величин, які є вибіркою з багатомірного комплексного нормального стаціонарного процесу з ненульовим середнім значенням

$$\Lambda(\mathbf{R}) = \left( \pi^N \det \mathbf{R} \right)^{-L} \cdot e^{-L(\mathbf{y}^* - \mathbf{s})^H \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}^* - \mathbf{s}) + L \mathbf{y}^* \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}^*)^H} \cdot e^{-L \text{tr}[\mathbf{R}^{-1} \mathbf{R}^*]} \quad (4)$$

Знайдено значення локального максимуму функції правдоподібності, яке є оцінкою максимальної правдоподібності для кореляційної матриці спостережень

$$\tilde{\mathbf{R}}(L) = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \mathbf{y}(j) \cdot \mathbf{y}^H(j). \quad (5)$$

Ця оцінка відома у випадку, коли вхідний векторний процес має тільки шумову складову. Правомірність використання цієї оцінки, зокрема її слушність та достатність, доведена і за наявності корисного сигналу у вхідному векторному процесі. Показано, що відома функція правдоподібності  $\Lambda(\mathbf{R}) = \left( \pi^N \det \mathbf{R} \right)^{-L} \cdot \exp\left(-L \text{tr}[\mathbf{R}^{-1} \mathbf{R}^*]\right)$  для вибірки з багатомірного комплексного нормального стаціонарного процесу з нульовим середнім є частинним випадком отриманої функції правдоподібності (4), що підтверджує правомірність використання вибіркової оцінки (5) в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою при фіксованому рівні корисного сигналу.

В третьому розділі «Алгоритми формування вибірових оцінок кореляційної матриці спостережень» розглянута задача формування вибірових оцінок прямої  $\tilde{\mathbf{R}}(L)$  та оберненої

$$\tilde{\mathbf{R}}^{-1}(L) = L \left( \sum_{j=1}^L \mathbf{y}(j) \cdot \mathbf{y}^H(j) \right)^{-1} \quad (6)$$

кореляційної матриці спостережень та проведено дослідження їх стійкості і слушності. Для зменшення об'єму обчислень, виведені рекурентні формули, що реалізують алгоритми отримання вибірових оцінок (5) та (6)

$$\tilde{\mathbf{R}}(k) = \frac{1}{k} \left( (k-1) \cdot \tilde{\mathbf{R}}(k-1) + \mathbf{R}_k \right), \quad (7)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}^{-1}(k) = k \left( (k-1) \cdot \tilde{\mathbf{R}}(k-1) + \mathbf{R}_k \right)^{-1}, \quad (8)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}^{-1}(k) = \frac{k}{k-1} \left( \mathbf{I} - \frac{\tilde{\mathbf{R}}^{-1}(k-1) \cdot \mathbf{R}_k}{(k-1) + \text{tr}[\tilde{\mathbf{R}}^{-1}(k-1) \cdot \mathbf{R}_k]} \right) \tilde{\mathbf{R}}^{-1}(k-1), \quad (9)$$

де  $\mathbf{R}_k = \mathbf{y}(k) \cdot \mathbf{y}^H(k)$ ;  $k = \overline{2, L}$ ;  $\tilde{\mathbf{R}}(1) = \mathbf{y}(1) \cdot \mathbf{y}^H(1)$  – початкова умова, що визначає кореляційну матрицю власних шумів в каналах прийому антенної решітки.

Проаналізована стійкість і слушність оцінок кореляційної матриці спостережень, отриманих безпосередньо (5), (6) та за рекурентними формулами (7), (8), (9) за критерієм збіжності матричних норм

$$\alpha(L) = \left\| \mathbf{R} - \tilde{\mathbf{R}}(L) \right\|^2 / \left\| \mathbf{R} \right\|^2, \quad \beta(L) = \left\| \mathbf{R}^{-1} - \tilde{\mathbf{R}}^{-1}(L) \right\|^2 / \left\| \mathbf{R}^{-1} \right\|^2. \quad (10)$$

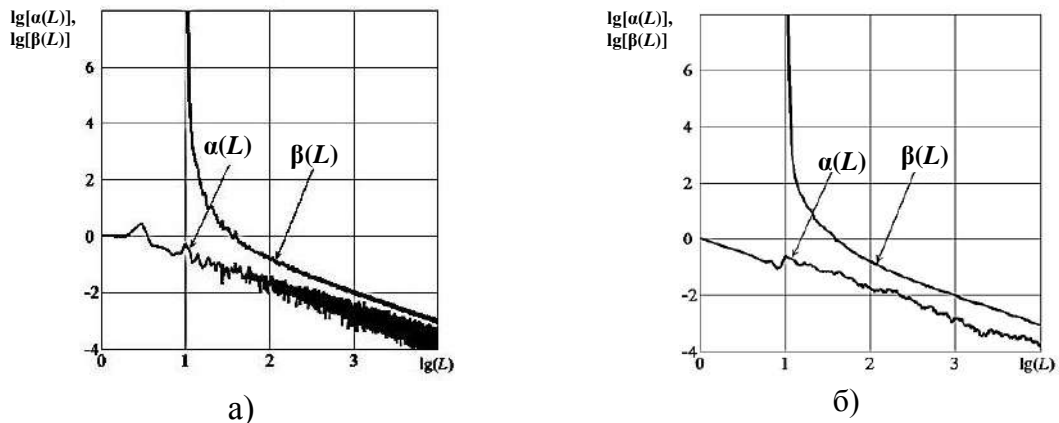


Рис. 2 Залежності матричних норм (10) від об'єму вибірки  $L$  для матриці 10-го порядку за алгоритмами: а) (5) і (6); б) (7) і (8).

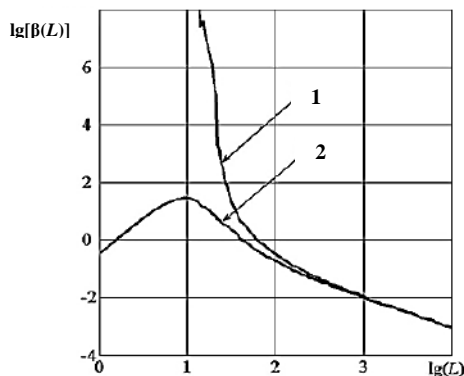


Рис. 3 Залежності  $\beta(L)$  від об'єму вибірки  $L$  для матриці 10-го порядку за алгоритмом (9).

норма  $\beta(L) \rightarrow \infty$  при  $L < N$  (рис. 2, 3 – графік 1); при початковій умові

Аналіз поведінки залежностей матричних норм  $\alpha(L)$  та  $\beta(L)$  від об'єму вибірки  $L$  вказує на ряд особливостей, притаманних алгоритмам обчислення оцінок  $\tilde{\mathbf{R}}(L)$  та  $\tilde{\mathbf{R}}^{-1}(L)$ , а саме: оцінки (5) - (9) є слушними; алгоритм (9) дозволяє отримати більш згладжену оцінку  $\tilde{\mathbf{R}}^{-1}(L)$  порівняно з алгоритмами (6) та (8), що свідчить про його ефективність; для алгоритмів (6), (8) і (9) при початковій умові  $\mathbf{R}(1) = \mathbf{y}(1) \cdot \mathbf{y}^H(1)$ , внаслідок виродженості оцінки  $\tilde{\mathbf{R}}^{-1}(L)$ , матрична

$\mathbf{R}(1) = \mathbf{I}$  матрична норма  $\beta(L)$  буде обмеженою, але не буде монотонною на всій області визначення  $L$  (рис. 3 – графік 2).

Розглянуто розв'язок цієї проблеми за допомогою методу статичної регуляризації  $\tilde{\mathbf{R}}_{\mu}(L) = \tilde{\mathbf{R}}(L) + \mu \cdot \mathbf{I}$ , де  $\mu = const > 0$  – параметр регуляризації. Оскільки  $\det \tilde{\mathbf{R}}_{\mu}(L) \geq \mu$ , то інверсія матриці  $\tilde{\mathbf{R}}_{\mu}(L)$  можлива при будь-якому об'ємі вибірки  $L$ . Аналітичне дослідження збіжності відповідних матричних норм та показало, що

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \alpha_{\mu}(L) = \mu^2 \frac{N}{\|\mathbf{R}\|^2} > 0; \quad \lim_{L \rightarrow \infty} \beta_{\mu}(L) = \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{\lambda_i^2} \right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^N \left( \frac{\mu}{\lambda_i(\lambda_i + \mu)} \right)^2 > 0.$$

Отже, статична регуляризація цих оцінок при фіксованому параметрі обмежує можливість саморегуляризації та не гарантує отримання слушних та стійких оцінок кореляційної матриці. Цей висновок наочно демонструють результати моделювання (рис.4). Тут суцільними лініями надані усереднені стаціонарні залежності матричних норм  $\beta_{\mu}(L)$ , а штриховими лініями – відповідні до них теоретичні граничні значення. На рис. 4 в) у якості початкової умови обрана  $\mathbf{R}(1) = \mathbf{I}$ .

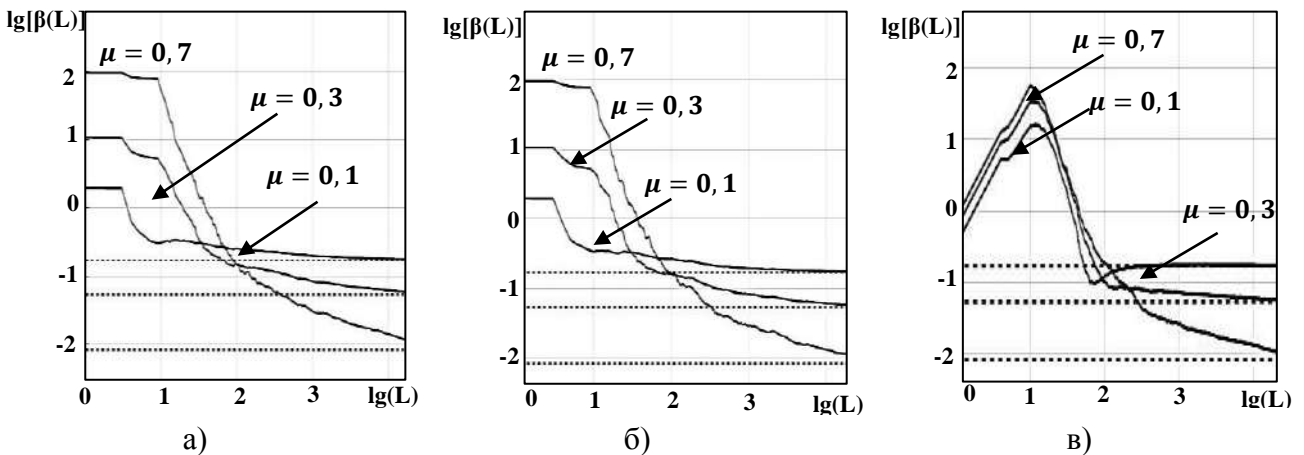


Рис. 4 Залежності матричної норми  $\beta_{\mu}(L)$  від об'єму вибірки для матриці 10-го порядку: а – оцінка (6); б – оцінка (8); в – оцінка (9).

Використані істотні властивості максимально правдоподібних оцінок кореляційної матриці спостережень, зокрема, їх слушність та здатність до саморегуляризації, для переходу від статичної регуляризації ( $\mu = const$ ) до динамічної регуляризації, тобто до регуляризації зі змінним параметром у вигляді неперервної, монотонно спадаючої функції  $\mu(L) = g(L)/L$ , при  $g(L) \geq 0$  та  $\lim_{L \rightarrow \infty} \mu(L) = 0$ . Такий вид регуляризації вибірових оцінок кореляційної матриці класифіковано як динамічну регуляризацію.

У випадку динамічної регуляризації матрична норма є функцією двох змінних  $\beta_{\mu}(L, g)$  та, на відміну від статичної регуляризації,

$\lim_{L \rightarrow \infty} \beta_{\mu}(L, g) = 0$ , що свідчить про слушність оцінки  $\tilde{\mathbf{R}}_{\mu}^{-1}(L)$ . Отже, задача пошуку функції динамічної регуляризації зводиться до знаходження функції  $g(L)$ , яка мінімізує матричну норму  $\beta_{\mu}(L, g) \rightarrow \min$ . Аналітичний розв'язок цієї задачі є проблематичним, оскільки передбачає обчислення матриці Гессе, складеної із других частинних похідних матричної норми за змінним об'ємом вибірки  $L$ . А це, в свою чергу, приводить до проблеми знаходження похідної від матриці  $\tilde{\mathbf{R}}_{\mu}^{-1}(L)$ , яка не є фіксованою та отримана в результаті множення векторів  $\mathbf{y}(t)$ , складених з невідомих параметрів сигналів від  $M+K$  незалежних джерел. Тому, задача мінімізації матричної норми  $\beta_{\mu}(L, g)$  вирішувалась за допомогою статистичного моделювання та чисельних методів.

Функція  $\beta_{\mu}(L, g)$  квадратична та її графічним зображенням є поверхня з так званим «яром». Характер поведінки поверхні  $\beta_{\mu}(L, g)$  та «дна яру» при довільних значеннях параметра  $g > 0$  функції динамічної регуляризації (рис. 6) вказує на збіжність за експоненціальним законом значень теоретичної кривої  $g(L)$  до розмірності  $N$  адаптивної решітки при збільшенні об'єму вибірки  $L$ , тобто до кривої  $g(L) = N + C e^{-L/N}$ , де  $C$  – невідомий коефіцієнт та  $g(1) = 1$ . З системи рівнянь, складених з функції  $g(L)$  та її похідної  $g'(L)$ , отримано лінійне неоднорідне рівняння I-го порядку  $g'(L) + g(L)/N = 1$  з початковою умовою  $g(1) = 1$ . Розв'язком задачі Коші для даного диференціального рівняння є функція  $g(L) = N + (1 - N)e^{-(L-1)/N}$ , графік якої надано на рис. 5 б) неперервною гладкою лінією.

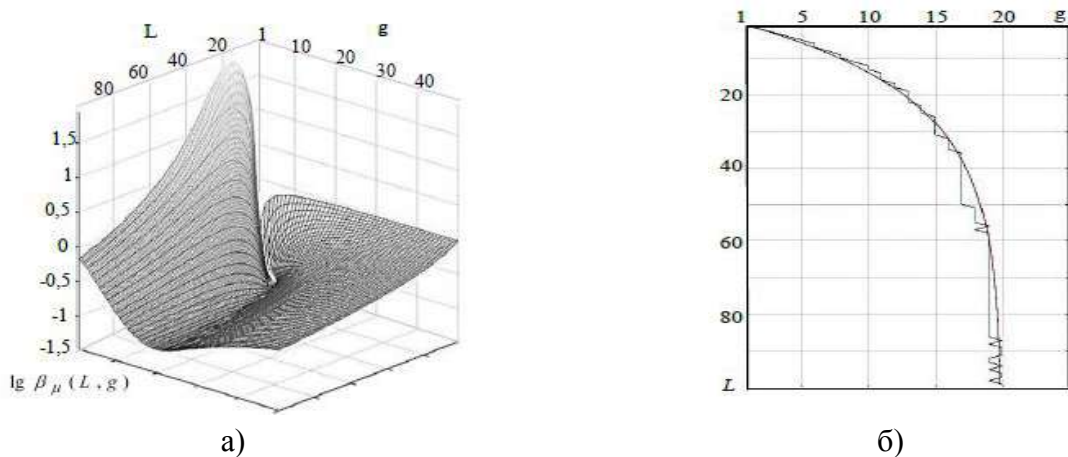


Рис. 5 Значення матричної норми  $\beta_{\mu}(L, g)$  в залежності від об'єму вибірки  $L$  та параметра  $g$ : а – поверхня; б – теоретична та експериментальна траєкторії  $g(L)$  для матриці порядку  $N = 20$  та інверсії  $\tilde{\mathbf{R}}_{\mu}^{-1}(L)$ , обчисленої за рекурентним алгоритмом (9).

Очевидно, що оптимальна функція динамічної регуляризації має вигляд

$$\mu_{opt}(L) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{g(L)}{L} = \frac{N}{L}.$$

Вона однозначно пов'язує розмірність матриці  $N$  із об'ємом  $L$  вибірки, що спостерігається і знімає проблему вибору параметра регуляризації в умовах апріорної невизначеності відносно початкових даних обчислювальної задачі. Основною перевагою функції динамічної регуляризації  $\mu_{opt}(L)$  є задоволення оптимального критерію «обчислювальна стійкість – слухність» оцінок (6), (8), (9) матриці  $\tilde{\mathbf{R}}_{\mu}^{-1}(L)$  довільного порядку  $N$ .

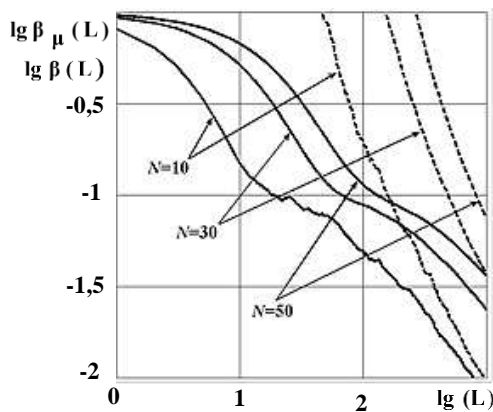


Рис. 6 Траєкторії регуляризованої та нерегуляризованої оцінок для матриць порядку  $N = 10; N = 30$  та  $N = 50$ .

Вірність цього висновку підтверджено результатами моделювання траєкторій матричної норми  $\beta_{\mu}(L)$  для вибіркової оцінки  $\tilde{\mathbf{R}}_{\mu}^{-1}(L)$  порядку  $N = 10; N = 30$  та  $N = 50$  (рис. 6). Тут же, для порівняння, штриховими лініями наведені траєкторії  $\beta(L)$  не регуляризованої оцінки  $\tilde{\mathbf{R}}^{-1}(L)$ . Надані траєкторії залежностей ілюструють втрату обчислювальної стійкості оцінки  $\tilde{\mathbf{R}}^{-1}(L)$  при  $L < N$ , що непринятно оцінці  $\tilde{\mathbf{R}}_{\mu}^{-1}(L)$  з

оптимальною функцією динамічної регуляризації  $\mu_{opt}(L)$ .

**Четвертий розділ «Дослідження процесу відновлення сигналу зображення на фоні адитивних шумових завад довільної інтенсивності методами імітаційного моделювання»** присвячений моделюванню процесу

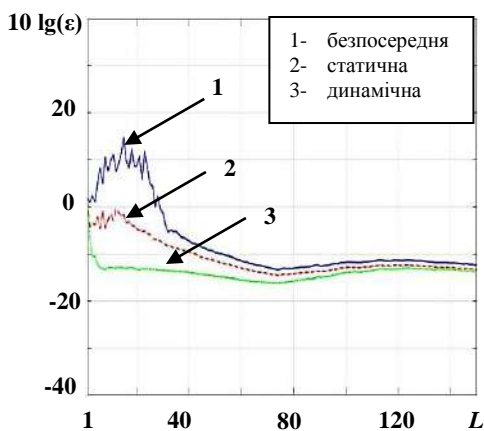


Рис. 7 Функціональні залежності середньоквадратичної помилки від об'єму вибірки.

відновлення сигналу зображення на фоні шумових завад довільної інтенсивності в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою розробленим методом просторової фільтрації за допомогою пакету MATLAB.

При достатньо великому об'ємі вибірки інверсія вибіркової оцінки кореляційної матриці, внаслідок її здатності до саморегуляризації, є стійкою незалежно від методу, яким вона була отримана. Але, при короткій вибірці зі вхідного процесу, застосування до процесу відновлення сигналів зображень в умовах шумових завад

довільної інтенсивності оцінки, отриманої безпосередньо або за методом статичної регуляризації, на відміну від метода динамічної регуляризації, приводить до втрати якості відновлення зображення.



Рис.8 (а) Початкове зображення;  
(б) зображення, спотворене адитивним нормальним шумом при  $SNR = -10$  дБ.

Цей висновок підтверджено результатами моделювання функціональних залежностей середньоквадратичної помилки від об'єму вибірки (рис. 7) та процесу відновлення сигналу зображення за наявності адитивного нормального шуму при  $SNR = -10$  дБ (рис. 8).

Відновлення сигналу зображення проводилось на основі методів безпосередньої інверсії, статичної та динамічної регуляризації вибіркової оцінки кореляційної матриці спостережень при об'ємі вибірки  $L=50$ .

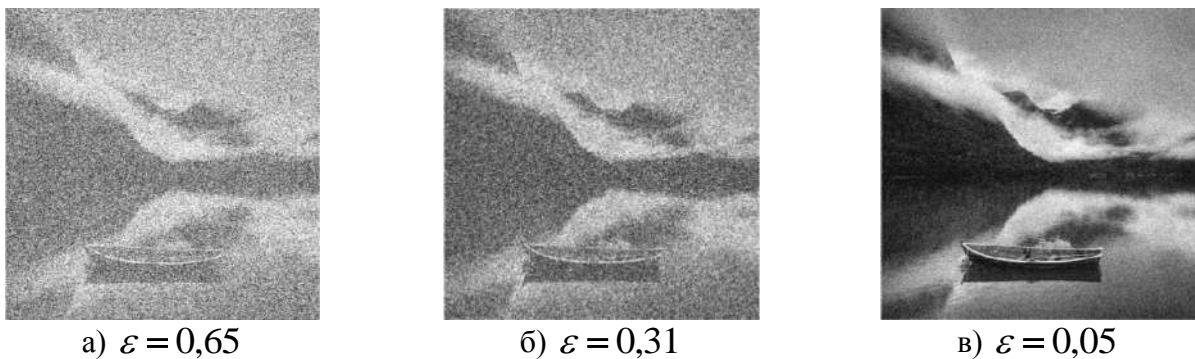


Рис.9 Результати обробки зображення спотвореного адитивним нормальним шумом з використанням методів: (а) безпосередньої інверсії, (б) статичної регуляризації, (в) динамічної регуляризації вибіркової оцінки кореляційної матриці спостережень.

Отримані результати (рис.9) підтверджують перевагу застосування методу динамічної регуляризації вибіркової оцінки кореляційної матриці до процесу відновлення сигналу зображення в умовах шумових завад у випадку короткої вибірки. Тут же надані відповідні значення середньоквадратичної помилки.

Показана проблема, притаманна класичним методам знаходження оптимального вагового вектору в умовах прийому декількох сигналів зображень одночасно. Кореляція сигналів зображень впливає на властивості кореляційної матриці спостережень та, як наслідок, методи їх відновлення, основані на інверсії вибіркових оцінок кореляційної матриці спостережень втрачають ефективність. Отже, актуальною стає задача розробки методу відновлення сигналів зображень, функціонування якого інваріантне до їх кореляції.

Розроблено метод знаходження оптимального вагового вектора  $\mathbf{w}_i = \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{e}_i$ ;  $i = \overline{1, M+K}$  на основі псевдооберненої матриці  $\mathbf{V}^{-1} = \mathbf{V} \cdot [\mathbf{V}^H \cdot \mathbf{V}]^{-1}$ , сформованої тільки по результатах просторового спектрального аналізу, де  $\mathbf{V}$  – матриця фазових зсувів всіх сигналів, що надходять до інформаційної системи;  $\mathbf{e}_i$ ;  $i = \overline{1, M+K}$  – одиничні орти-стовпці. Отримано алгоритм інваріантного до кореляції сигналів зображень методу їх відновлення на фоні шумових завад довільної інтенсивності в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою

$$\tilde{s}_i = \mathbf{e}_i^T \cdot [\mathbf{V}^H \cdot \mathbf{V}]^{-1} \cdot \mathbf{V}^H \cdot \mathbf{y}; \quad i = \overline{1, M+K}. \quad (11)$$

Реалізація цього методу наведена на рис. 10 у вигляді багатоканального адаптивного процесору.

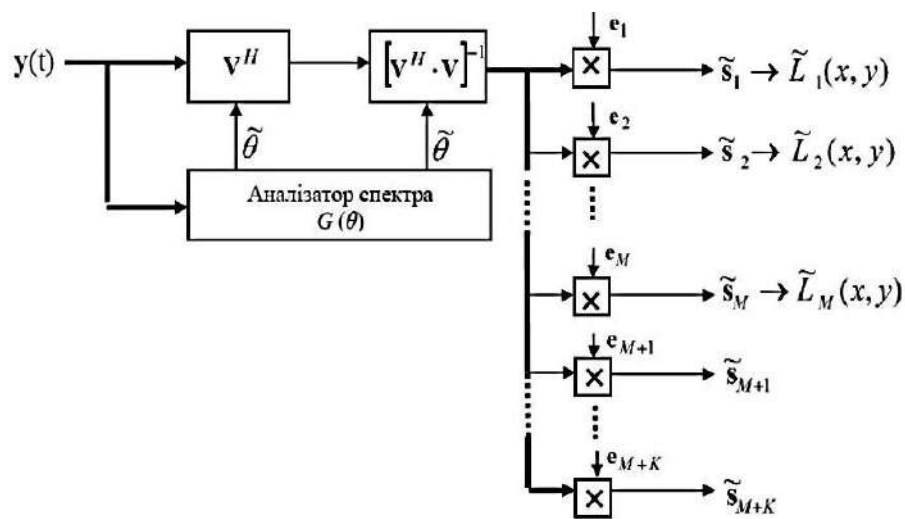


Рис.10 Структура адаптивного процесору  $N$ -мірної ААР, яка реалізує обробку  $(M+K)$  сигналів, відповідно до методу (11).

Побудована імітаційна модель процесу відновлення корельованих між собою сигналів зображень на фоні шумових завад довільної інтенсивності. Сигнали зображень надходять від двох незалежних джерел на фоні зовнішньої завади та, в каналах прийому, корелюють між собою (рис. 11).



а)



б)



в)

Рис. 11 а), б) початкові зображення; в) вплив взаємної кореляції зображень та шуму при відношенні завади/шум 28 дБ



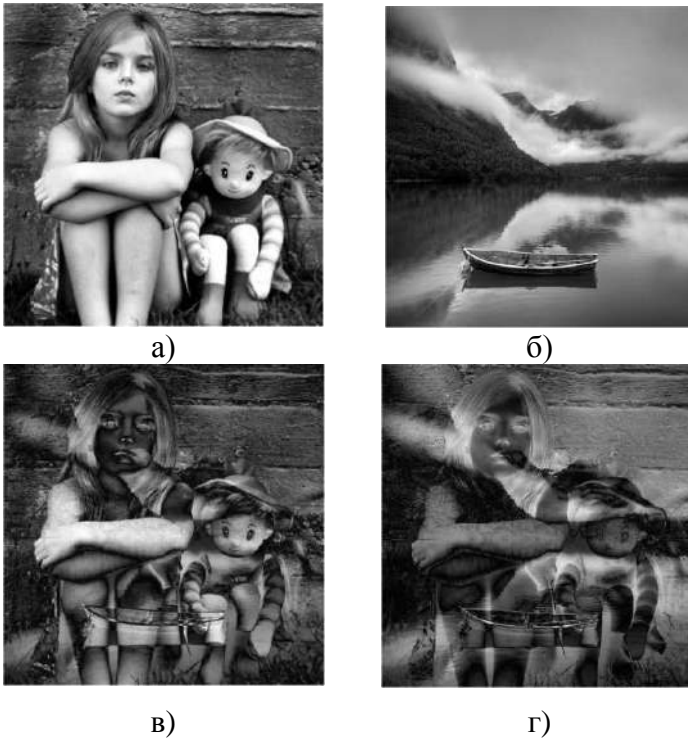


Рис. 12. Результат відновлення зображень:  
а), б) методом (11); в), г) методом (3).

На рисунку 12 надано результат відновлення сигналів зображень інваріантним до кореляції корисних сигналів методом та методом, що використовує інверсію вибіркової оцінки кореляційної матриці спостережень.

Розроблений інваріантний до кореляції корисних сигналів метод показав, що оскільки при обчисленні вагових коефіцієнтів не використовується кореляційна матриця спостережень, то, на відміну від методу, що використовує інверсію вибіркової оцінки кореляційної матриці спостережень, це дає можливість вести прийом довільної кількості як сигналів

зображень, так і шумових завад довільної інтенсивності від незалежних джерел.

Адекватність отриманих результатів проілюстровано на рис. 13, де наведені теоретичні та експериментальні залежності якості відновлення сигналу зображення (значення середньоквадратичної помилки за формулою (1))

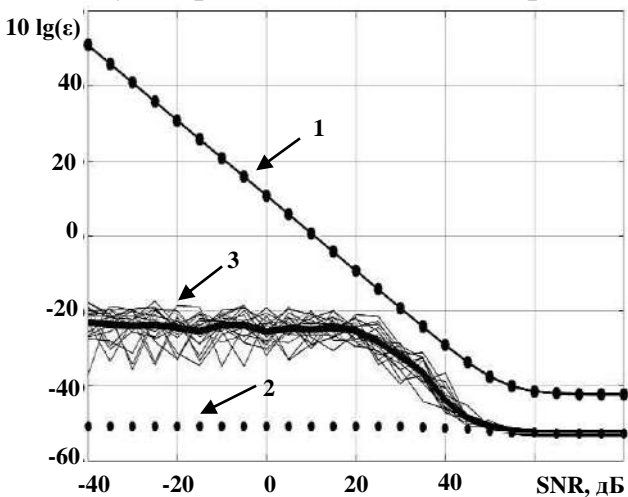


Рис. 13. Функціональні залежності якості відновлення зображення від відношення сигнал/шум.

від відношення сигнал/шум. Експеримент проведено методом статистичного моделювання при об'ємі вибірки  $L=1000$ .

Тут графіки 1 та 2 ілюструють результати отриманої якості відновлення сигналу зображення в неадаптивній та адаптивній інформаційній системі розміру  $N$ , відповідно. На них маркерами позначені теоретичні результати, а суцільними лініями результати статистичного моделювання.

На графіку 3 надані експериментальні статистичні

результати проведених випробувань, які відображають отриману якість відновлення сигналу зображення на основі методу інверсії вибірових оцінок кореляційної матриці спостережень. Очевидно, що результати моделювання цілком узгоджені з теоретичними положеннями.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача відновлення сигналів зображень в умовах істотних та штучних шумових завад довільної інтенсивності на основі методу інверсії кореляційної матриці спостережень.

1. Розроблений метод відновлення сигналів зображень на фоні шумових завад довільної інтенсивності на основі інверсії вибіркової оцінки кореляційної матриці спостережень був реалізований у вигляді двох алгоритмів, які передбачають інверсію кореляційної матриці спостережень та формування псевдооберненої матриці по результатах спектрального аналізу.

2. Запропонований метод динамічної регуляризації вибірових оцінок кореляційної матриці спостережень з оптимальним за критерієм мінімуму матричної норми параметром, рівним розмірності кореляційної матриці (розмірності адаптивної антенної решітки) дозволяє відновлювати сигнал зображення на фоні шумових завад довільної інтенсивності без залучення апріорних даних та додаткових обчислювальних затрат на пошук оптимального параметра регуляризації.

3. Розроблений метод відновлення сигналів зображень, що використовує псевдо обернену матрицю, сформовану по результатах просторового спектрального аналізу сигнально-завадової обстановки, може бути застосований в умовах прийому довільної кількості як сигналів зображень так і завад довільної інтенсивності від незалежних джерел.

4. Запропоновані математичні моделі та методи можуть бути використані підчас розробки, впровадження і використання в інформаційних радіотехнічних системах, які призначені для передачі сигналів зображень в умовах шумових завад істотного та штучного походження довільної інтенсивності.

5. Адекватність і висока ефективність розроблених теоретичних положень і математичних моделей підтверджені результатами експериментальних досліджень, отриманих методами статистичного і імітаційного моделювання.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Братченко Г.Д., Скачков В.В., Ткачук Е.В., Смаглюк Г.Г., Григорьев Д.В., Пивторак О.В. Адаптивные методы восстановления изображений в информационно-измерительных радиотехнических системах: монографія. Одесса: Бондаренко М.О., 2016. 196 с.
2. Skachkov V.V., Bratchenko H.D., Milković M., Tkachuk O.V., Smahliuk H.H., Grygoryev D.V. Adaptive Methods for Measuring Coordinates ad Radar Imaging: monograph. Odesa: Bondarenko M.O., 2017. 76 p.
3. Skachkov V.V., Bratchenko H.D., Milković M., Tkachuk O.V., Smahliuk H.H., Grygoryev D.V. Adaptive Methods for Measuring Coordinates ad Radar Imaging: monograph. Croatia: University North, 2018. 77 p.
4. Skachkov V., Bratchenko H., Kazakova N., Tkachuk H. Image restoration received by radio channel on the background of external noise in the above-ground objects monitoring system. *Information Technology in Selected areas of Management 2017*: monograph. Krakow: Wydawnictwa AGH University of

- Science and Technology Press, 2018. P. 61–71.
5. Skachkov V., Chepkyi V., Bratchenko H., Tkachuk H., Kazakova N. Development of the method for dynamic regularization of selected estimate in the correlation matrices of observations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Mathematics and Cybernetics – Applied Aspects*. 2017. vol. 6/4 (90). P. 11–18.
  6. Tkachuk O.V., Skachkov V.V. Estimation of correlation matrix of observations at the fixed signal level by maximum likelihood criterion. *Збірник наукових праць «Цифрові технології» ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2019. № 25. С. 58–64.
  7. Skachkov V.V., Tkachuk O.V. Image restoration method, invariant to signal correlation in the information system with adaptive antenna array. *Збірник наукових праць «Цифрові технології» ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2020. № 28. С. 64–76.
  8. Ткачук О.В. Операторна форма задачі відновлення зображення на фоні адитивних шумів. *Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). Технічні науки*. 2016. вип. 2(6). С. 25–30.
  9. Ткачук О.В. Оптимальна обробка сигналів зображень в умовах шумових перешкод в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2020. № 2(17). С. 27–34.
  10. Скачков В.В., Єфимчиков О.М., Ткачук О.В., Павлович В.І. Критеріальні показники оцінювання якості адаптивної інформаційно-вимірювальної системи в умовах внутрішньо системних збурень. *Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). Технічні науки*. 2014. вип. 2(2). С. 33–42.
  11. Ткачук О.В., Клименко В.В. Некоректні задачі в інформаційних системах військового спрямування. *Спільні дії військових формувань держави: проблеми та перспективи*: зб. матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Одеса, 10-11 вересня 2014. Одеса: Військова академія (м. Одеса). 2014. С. 249.
  12. Клименко В.В., Ткачук О.В. Проблеми стійкості обернених некоректних задач в динамічних системах. *Спільні дії військових формувань держави: проблеми та перспективи*: зб. матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Одеса, 10-11 вересня 2014, Одеса: Військова академія (м. Одеса). 2014. С. 104–106.
  13. Скачков В.В., Чепкій В.В., Єфимчиков О.М., Ткачук О.В., Павлович В.І. Робоча гіпотеза рішення проблеми некоректних задач методом динамічної регуляризації вибірових оцінок кореляційної матриці спостережень. *Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи*: зб. матеріалів Третьої Всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Одеса, 22-23 вересня 2016, Одеса: Військова академія (м. Одеса). 2016. С. 195–197.
  14. Скачков В.В., Братченко Г.Д., Чепкій В.В., Єфимчиков О.М., Ткачук О.В., Павлович В.І. Шляхи рішення некоректних задач методом динамічної регуляризації вибірових оцінок кореляційної матриці спостережень.

*Метрологія, технічне регулювання, якість: досягнення та перспективи: зб. матеріалів Шостої Міжнародної науково-практичної конференції, м. Одеса, 11-12 жовтня 2016, Одеса: ОДАТРЯ. 2016. С. 192–194.*

15. Ткачук О.В., Скачков В.В. Застосування вибіркової оцінки кореляційної матриці спостережень для відновлення сигналу зображення в інформаційній системі з антенною решіткою. *Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи: зб. Матеріалів Шостої Всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Одеса, 12-13 вересня 2019, Одеса: Військова академія (м. Одеса). 2019. С. 250.*

### АНОТАЦІЯ

Ткачук О.В. Відновлення сигналів зображень в умовах шумових завад методом інверсії вибіркового оцінок кореляційної матриці спостережень. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, МОН України, Одеса, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розробці та дослідженню методу відновлення сигналів зображень в умовах шумових завад довільної інтенсивності в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою на основі інверсії вибіркового оцінок кореляційної матриці спостережень.

Проведено дослідження стійкості та слухності вибіркового оцінок кореляційної матриці спостережень, сформованих безпосередньо та методом статичної регуляризації, за критерієм збіжності матричних норм. Показано, що отримані вибіркові оцінки кореляційної матриці спостережень не задовольняють оптимальний критерій «обчислювальна стійкість – слухність».

Знайдено оптимальний параметр регуляризації, як значення неперервної, монотонно спадаючої функції від «істотних» параметрів системи, а саме від розмірності адаптивної антенної решітки та об'єму вибірки. Показано, що метод динамічної регуляризації не порушує властивість саморегуляризації вибіркового оцінок кореляційної матриці і, тому задовольняє оптимальний критерій «обчислювальна стійкість – слухність».

Розроблено метод відновлення сигналів зображень, оснований на динамічній регуляризації вибіркового оцінок кореляційної матриці спостережень, якій не потребує апріорної інформації стосовно інтенсивності шумових завад.

Розроблено метод відновлення сигналів зображень, що базується на розв'язку перевизначеної системи рівнянь, складених по результатах просторового спектрального аналізу сигнально-завадової обстановки, якій може бути використаний в умовах прийому довільної кількості як сигналів зображень, так і шумових завад довільної інтенсивності від незалежних джерел.

Розроблена дослідницька стохастична модель процесу відновлення сигналів зображень на фоні шумових завад довільної інтенсивності в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою за допомогою пакета прикладних програм MATLAB.

*Ключові слова:* адаптивна антенна решітка, кореляційна матриця спостережень, вибіркова оцінка, стійкість, слухність, регуляризація, шумові завади довільної інтенсивності, інваріантність.

### АННОТАЦІЯ

Ткачук О.В. Восстановление сигналов изображений в условиях шумовых помех методом инверсии выборочных оценок корреляционной матрицы наблюдений. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. – Государственный университет интеллектуальных технологий и связи, МОН Украины, Одесса, 2021.

Диссертационная работа посвящена разработке и исследованию метода восстановления сигналов изображений в условиях шумовых помех произвольной интенсивности в информационной системе с адаптивной антенной решеткой на основе инверсии выборочных оценок корреляционной матрицы наблюдений.

Проведено исследование устойчивости и состоятельности выборочных оценок корреляционной матрицы наблюдений, сформированных непосредственно и методом статичной регуляризации, по критерию сходимости матричных норм. Показано, что полученные выборочные оценки корреляционной матрицы наблюдений не удовлетворяют оптимальному критерию «вычислительная устойчивость – состоятельность».

Найден оптимальный параметр регуляризации, как значение непрерывной, монотонно убывающей функции от «естественных» параметров системы, а именно от размерности адаптивной антенной решетки и объема выборки. Показано, что метод динамической регуляризации не нарушает свойство саморегуляризации выборочных оценок корреляционной матрицы и, поэтому удовлетворяет оптимальному критерию «вычислительная устойчивость – состоятельность».

Разработан метод восстановления сигналов изображений, основанный на динамической регуляризации выборочных оценок корреляционной матрицы наблюдений, не требующий априорной информации об интенсивности шумовых помех.

Разработан метод восстановления сигналов изображений, основанный на решении переопределенной системы уравнений, составленных по результатам пространственного спектрального анализа сигнально-помеховой обстановки, который может быть использован в условиях приема произвольного количества, как сигналов изображений, так и шумовых помех произвольной интенсивности от независимых источников.

Разработана исследовательская стохастическая модель процесса восстановления изображения на фоне шумовых помех произвольной интенсивности в информационной системе с адаптивной антенной решеткой с помощью пакета прикладных программ MATLAB.

*Ключевые слова:* адаптивная антенная решетка, корреляционная матрица наблюдений, выборочная оценка, устойчивость, состоятельность, регуляризация, шумовые помехи произвольной интенсивности, инвариантность.

### ABSTRACT

Tkachuk O.V. Image signal restoring in conditions of arbitrary intensity noise interference by inversion of sample estimates of correlation matrix of observations. – Manuscript.

Dissertation for the candidate degree in technical sciences on specialty 05.12.17 – Radio Engineering and Television Systems - State University of Intelligent Technologies and Telecommunications, MES of Ukraine, Odessa, 2021.

The dissertation work is devoted to the development and study of method for signal image restoration in conditions of arbitrary intensity noise interference in the information system with adaptive antenna array based on the inversion of sample estimates of the observation correlation matrix.

The task of forming sample estimates of correlation matrix of observations formed directly and by the method of static regularization is considered. The stability and solvency of these estimates according to the criterion of convergence of matrix norms is analyzed. It is shown that the obtained sample estimates of the observation correlation matrix do not satisfy the optimal criterion "computational stability - consistency".

The optimal regularization parameter is found as the value of a continuous, monotonically decreasing function of the "natural" parameters of the system, namely, the dimension of the adaptive antenna array and the sample size. It is shown that the method of dynamic regularization does not violate the property of self-regularization of sample estimates of the correlation matrix and, therefore, satisfies the optimal criterion "computational stability - consistency".

The signal image restoring method based on dynamic regularization of sample estimates of the observation correlation matrix, which does not require priory information about the intensity of noise interference has been developed.

The method for signal image restoration based on solving an overdetermined system of equations based on the results of spatial spectral analysis of the signal-interference environment, which can be used in conditions of receiving an arbitrary number of image signals and arbitrary intensity noises interferences from independent sources, has been developed.

The research stochastic model of the signal image restoration process against the arbitrary intensity of noise interference background in the information system with adaptive antenna array using the MATLAB application software package has been developed.

*Key words:* adaptive antenna array, correlation matrix of observations, sample estimate, stability, solvency, regularization, noise interference of arbitrary intensity, invariance.