УДК 681.514

О. В. Ткачук

Військова академія (м. Одеса)

ОПТИМАЛЬНА ОБРОБКА СИГНАЛІВ ЗОБРАЖЕНЬ НА ФОНІ ШУМОВИХ ПЕРЕШКОД В ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ З АДАПТИВНОЮ АНТЕННОЮ РЕШІТКОЮ

Розроблено метод відновлення сигналів зображень на фоні шумових перешкод довільної інтенсивності на основі інверсії кореляційної матриці спостережень в інформаційній радіотехнічній системі з адаптивною антенною решіткою. За критерієм максимуму правдоподібності отримано вираз для системи оптимальних незалежних параметричних вагових векторів, необхідних для відновлення сигналів зображень. Отримано алгоритм обробки сигналів в адаптивному процесорі N -вимірної адаптивної антенної решітки. Побудована імітаційна модель відновлення сигналу зображення на фоні шумів довільної інтенсивності в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою. Показано, що обчислення вагових коефіцієнтів на основі кореляційної матриці спостережень, внаслідок її властивостей, не дозволяє виокремити сукупність корельованих між собою сигналів зображень. Визначено напрямок подальшого розвитку отриманих результатів в класі інваріантних методів.

Ключові слова: адаптивна антенна решітка, сигнал зображення, оптимальний вектор вагових коефіцієнтів, критерій максимуму правдоподібності, кореляційна матриця спостережень.

Е. В. Ткачук

ОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ФОНЕ ШУМОВЫХ ПОМЕХ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С АДАПТИВНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

Разработан метод восстановления сигналов изображений на фоне шумовых помех произвольной интенсивности в информационной радиотехнической системе с адаптивной антенной решеткой. По критерию максимального правдоподобия получено выражение для системы оптимальных независимых параметрических весовых векторов, необходимых для восстановления сигналов изображений. Получен алгоритм обработки сигналов в адаптивном процессоре N -мерной адаптивной антенной решетки. Построена имитационная модель восстановления сигнала изображения, на фоне шумов произвольной интенсивности в информационной системе с адаптивной антенной решеткой. Показано, что вычисление весовых коэффициентов на основе корреляционной матрицы наблюдений, вследствие ее свойств, не позволяет разделить совокупность коррелированных между собой сигналов изображений. Определено направление дальнейшего развития полученных результатов в классе инвариантных методов.

Ключевые слова: адаптивная антенная решетка, сигнал изображения, оптимальный вектор весовых коэффициентов, критерий максимума правдоподобия, корреляционная матрица наблюдений.

O. V. Tkachuk

OPTIMAL IMAGE SIGNALS PROCESSING ON THE NOISE BACKGROUND IN THE INFORMATION SYSTEM WITH ADAPTIVE ANTENNA ARRAY

The method to restore image signals against the arbitrary intensity noise background in the information radio engineering system with adaptive antenna array has been developed. In order to use methods developed for processing one-dimensional signals for image recovery in the information system with adaptive antenna array, the transition from the two-dimensional array to vector representation is carried out. Mathematical model of narrowband signal formed at input of antenna array elements in space-time sense is obtained. Correlation matrices of image carrier signals, interference and noise are considered and features of adaptive processing of image signals coming from several sources are observed. An expression was found for the likelihood function if the incoming vector process is a multivariate stationary Gaussian process with a non-zero mean. According to the maximum likelihood criterion, the expression for the system of optimal independent parametric weight vectors necessary for image signals restoring against the arbitrary intensity

noise background coming from several independent sources in the information system with adaptive antenna array is obtained. In accordance to this system, a signal processing algorithm is built in the adaptive processor of N-dimensional adaptive antenna array. A simulation model of image signal restores coming from one source in the information system with adaptive antenna array against the arbitrary intensity noise background coming from several independent sources is built. It is shown that the use of weight coefficients calculated on the basis of the correlation matrix of observations, due to its properties, does not allow dividing the set of correlated image signals. The direction of further development of the obtained results in the class of invariant methods is determined.

Keywords: *adaptive antenna array, image signal, optimal vector of weight coefficients, likelihood maximum criterion, correlation matrix of observations.*

DOI 10.32684/2412-5288-2020-2-17-29-36

Вступ

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

Для боротьби із зовнішніми шумовими перешкодами при передачі сигналів зображень, зазвичай, використовується збільшення потужності сигналу. Чим більшою є інтенсивність шумової перешкоди, тим більше потрібно підсилювати корисний сигнал, щоб його можна було прийняти без спотворень. Інакше, вплив шумової перешкоди значної інтенсивності викликає втрату розрізнення прийнятої реалізації зображення [1].

На даний час, існує безліч різноманітних методів двовимірної просторової, частотної та вейвлет цифрової обробки прийнятої реалізації зображення [2].

Просторова фільтрація елементів прийнятої реалізації зображення така, як лінійна, нелінійна та байєсівська має обмежену здатність до пригнічення впливу зовнішніх шумів значного рівня, оскільки вибір розміру маски залежить від наявності апіорної інформації про початкове зображення та характеристик шумової складової [3].

Методи частотної та вейвлет фільтрації базуються на переході від просторової до частотної області. При цьому процес обробки зображень є достатньо трудомістким та потребує використання потужних обчислювальних засобів. Крім того, якщо потужність зовнішнього шуму перевищує потужність корисного сигналу, то перехід до частотної області не вирішує проблему пригнічення їх впливу на прийняту реалізацію зображення [4].

В дійсний час відсутні методи двовимірної фільтрації, які дозволяють відновлювати сигнали зображень в умовах адитивних шумових перешкод довільної інтенсивності [5].

Аналіз останніх досягнень і публікацій

При вирішенні проблеми підвищення завадостійкості інформаційних радіотехнічних систем найбільшу увагу приділяють системам з адаптивними антенними решітками. При цьому просторово-часову обробку сигналів в інформаційних системах з адаптивними антенними решітками можна розглядати як задачу оптимальної багатоканальної фільтрації, головною ціллю якої є покращення прийому та виявлення корисного сигналу на фоні шумів [6, 7].

Найбільше розповсюдження отримала лінійна обробка, яка полягає в підсумовуванні прийнятих сигналів з ваговими коефіцієнтами. Вагові коефіцієнти, необхідні для адаптивної просторової фільтрації, можуть бути сформовані за певними алгоритмами, обрання яких визначається критеріями ефективності. Вибір необхідного критерію ефективності залежить від кількості інформації про корисний сигнал, що приймається. Але незалежно від обраного критерію, всі вони відрізняються тільки скалярним множником, що забезпечує на виході інформаційної системи однакове відношення сигнал/шум [8].

Крім того, методи визначення вагових коефіцієнтів базуються на інверсії кореляційної матриці просторово-часових вибірок процесу на вході антенної решітки. Кореляційна матриця спостережень є відображенням шумової ситуації в адаптивній антенній решітці і визначає всі її основні характеристики [6, 8].

Просторово-часова обробка сигналів в інформаційній радіотехнічній системі з адаптивною антенною решіткою, зазвичай, використовується для обробки одновимірних сигналів. Оскільки зображення є двовимірними сигналами, то для можливості безпосереднього використання для них методів, розроблених для обробки одновимірних сигналів, слід виконати перехід до векторного подання двовимірного масиву [9].

Мета роботи полягає у розробці методу відновлення сигналів зображень в умовах шумових перешкод довільної інтенсивності в інфор-

маційній радіотехнічній системі з адаптивною антенною решіткою.

Основна частина

Зображення є двовимірним сигналом та вважається як дійсна функція двох змінних $L = L(x, y)$, значеннями якої є інтенсивність (яскравість) зображення. Його перетворення до цифрової форми потребує цілочисельної дискретизації та квантування, після чого воно може бути подано у вигляді матриці $\mathbf{L} = \{L_{xy}\}$ розміру $M \times N$. Перехід від двовимірного масиву до векторного подання здійснюється за формулою [9]

$$\mathbf{s}(t) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=(j-1)N+1}^{jN} \mathbf{A}_{ij} \cdot \mathbf{L} \cdot \mathbf{B}_{i-(j-1)N},$$

де матриця $\mathbf{A}_{ij}$ розміру $(M \cdot N) \times M$ та матриця-стовпець $\mathbf{B}_{i-(j-1)N}$ розміру $N \times 1$ мають вигляд

$$\mathbf{A}_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}_i,$$

$$\mathbf{B}_{i-(j-1)N} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}_{i-(j-1)N}.$$

Обернена операція перетворення вектора $\mathbf{s}(t)$ до матриці $\mathbf{L}$ задається співвідношенням

$$\mathbf{L} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=(j-1)N+1}^{jN} \mathbf{A}_{ij}^T \cdot \mathbf{s}(t) \cdot \mathbf{B}_{i-(j-1)N}^T,$$

де $[\cdot]^T$ – операція транспонування.

Розглянемо адаптивну антенну решітку, яка складається з N елементів, розташованих на відстані d один від одного. Нехай $s_m(t)$ – корисний сигнал, що відповідає прямокутному растру деякого зображення $L_m(x, y)$. Шумова перешкода $n_k(t)$ є стаціонарним гаусівським ергодичним процесом. Напрямки прийому корисного сигналу θ_m та перешкоди θ_k не співпадають між собою. Якщо елементи антенної

решітки ідентичні, то сигнали на виході кожного елементу відрізняються тільки фазовими зсувами відносно сигналу на виході першого елемента. Тоді, вектор-стовпець сигналу зображення та перешкоди на вході N -вимірної антенної решітки можна подати у вигляді

$$\mathbf{s}_m(t) = s_m(t) \cdot \mathbf{v}(\theta_m)$$

та

$$\mathbf{n}_k(t) = n_k(t) \cdot \mathbf{v}(\theta_k),$$

де $\mathbf{v}(\theta_m)$ та $\mathbf{v}(\theta_k)$ – вектор-стовпці амплітудно-фазового розподілу корисного сигналу $s_m(t)$ та перешкоди $n_k(t)$ по розкритті N -вимірної решітки

$$\mathbf{v}(\theta_m) = \{e^{-j(n-1)\cdot\varphi(\theta_m)}\};$$

$$\mathbf{v}(\theta_k) = \{e^{-j(n-1)\cdot\varphi(\theta_k)}\}; \quad n = \overline{1, N}.$$

Тут $\varphi(\theta_m)$ та $\varphi(\theta_k)$ – зсуви фаз, які є наслідком рознесення фазових центрів антени на відстань d , та для довільного аргументу θ дорівнюють

$$\varphi(\theta) = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta,$$

де λ – довжина електромагнітної хвилі.

Тоді, в загальному випадку, за наявності M джерел корисної інформації $s_m(t)$; $m = \overline{1, M}$ та K джерел перешкод $n_k(t)$; $k = \overline{M+1, M+K}$, векторний процес на вході антенної решітки можна подати у вигляді суми

$$\mathbf{y}(t) = \sum_{m=1}^M \mathbf{s}_m(t) + \sum_{k=M+1}^{M+K} \mathbf{n}_k(t) + \mathbf{n}_0(t), \quad (1)$$

де $\mathbf{n}_0(t) = \{n_i(t)\}$; $i = \overline{1, N}$ – вектор-стовпець внутрішніх шумів каналів прийому антенної решітки.

Вираз (1) є математичною моделлю просторово-часового сигналу що формується на вході антенної решітки за умови $\Delta F / f_0 \ll 1$, де ΔF – ширина спектру, f_0 – несуча частота.

Векторний процес $\mathbf{y}(t)$, сформований елементами антенної решітки, далі піддається лінійній обробці, яка має вигляд

$$\mathbf{w}^H(t) \cdot \mathbf{y}(t) = \tilde{\mathbf{s}}(t), \quad (2)$$

де $[\cdot]^H$ – знак ермітового спряження; $\mathbf{w}(t)$ – параметричний вектор вагових комплексних коефіцієнтів; $\tilde{\mathbf{s}}(t)$ – оцінка значень корисного

сигналу $\mathbf{s}(t)$ на виході інформаційної системи з адаптивною антенною решіткою.

Як було зазначено вище, для визначення вагових коефіцієнтів використовуються різні критерії ефективності, але незалежно від обраного критерію, для їх обчислення застосовується кореляційна матриця спостережень $\mathbf{R}$ вхідного векторного процесу $\mathbf{y}(t)$. Кореляційна матриця $\mathbf{R}$ вектора спостережень (1) є сумою кореляційних матриць трьох типів

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_j + \mathbf{R}_n,$$

де $\mathbf{R}_s$, $\mathbf{R}_j$ і $\mathbf{R}_n$ – кореляційні матриці сигналів зображень, зовнішніх перешкод та внутрішніх шумів, відповідно.

Вони мають вигляд

$$\mathbf{R}_s = \mathbf{M} \left[\sum_{m=1}^M \mathbf{s}_m(t) \cdot \sum_{m=1}^M \mathbf{s}_m^H(t) \right] = \mathbf{V}_s \mathbf{P}_s \mathbf{V}_s^H;$$

$$\mathbf{R}_j = \mathbf{M} \left[\sum_{k=M+1}^{M+K} \mathbf{n}_k(t) \cdot \sum_{k=M+1}^{M+K} \mathbf{n}_k^H(t) \right] = \mathbf{V}_j \mathbf{P}_j \mathbf{V}_j^H;$$

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{M}[\mathbf{n}(t) \cdot \mathbf{n}^H(t)] = P_0 \cdot \mathbf{I};$$

де $\mathbf{M}[\cdot]$ – оператор статистичного усереднення; $[\cdot]^H$ – знак ермітового спряження; P_0 – потужність внутрішнього (теплого) шуму каналів прийому антенної решітки; $\mathbf{I}$ – одинична матриця порядку N [6].

Прямокутні матриці $\mathbf{V}_s$ та $\mathbf{V}_j$ розміру $N \times M$ та $N \times K$, відповідно, об'єднують M і K вектор-стовпців $\mathbf{v}(\theta_m)$; $m=1, \overline{M}$ та $\mathbf{v}(\theta_k)$; $k = \overline{M+1}, \overline{M+K}$

$$\mathbf{V}_s = (\mathbf{v}(\theta_1) \quad \mathbf{v}(\theta_2) \quad \dots \quad \mathbf{v}(\theta_M)), \quad (3)$$

$$\mathbf{V}_j = (\mathbf{v}(\theta_{M+1}) \quad \mathbf{v}(\theta_{M+2}) \quad \dots \quad \mathbf{v}(\theta_{M+K})).$$

Внаслідок відсутності кореляції між перешкодами $\mathbf{n}_k(t)$; $k = \overline{M+1}, \overline{M+K}$, джерела яких рознесені в просторі, матриця $\mathbf{P}_j$ має діагональний вигляд

$$\mathbf{P}_j = \begin{pmatrix} \sigma^2(n_{M+1}) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma^2(n_{M+K}) \end{pmatrix}.$$

Матриця $\mathbf{P}_s$ порядку M не є діагональною та має вигляд

$$\mathbf{P}_s = \{P_{ij}\} = \begin{cases} \mathbf{M}[s_i^2(t)]; & i = j \\ \mathbf{M}[s_i(t) \cdot s_j(t)]; & i \neq j \end{cases}; \quad i, j = \overline{1, M}.$$

Оскільки зображення, що надходять від різних джерел, певною мірою корельовані між собою, то саме властивості матриці $\mathbf{P}_s$ визначають особливості адаптивної обробки сигналів зображень, які надходять від декількох джерел на фоні зовнішніх перешкод в інформаційній системі з адаптивною антенною решіткою.

Розглянемо задачу визначення оптимального вектора вагових коефіцієнтів $\mathbf{w} = \{w_i\}; i = \overline{1, N}$ за критерієм максимуму правдоподібності, який застосовується у випадку, коли корисний сигнал повністю невідомий.

Для зручності, перепишемо вхідний векторний процес (1) у вигляді

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (4)$$

де

$$\mathbf{s}(t) = \sum_{m=1}^M s_m(t) \mathbf{v}(\theta_m) \quad (5)$$

та

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

є корисною та шумовою складовою, відповідно.

Припустимо, що шумова складова $\mathbf{n}(t)$ є багатовимірним стаціонарним гауссівським процесом з середнім та відповідною щільністю розподілу [10]

$$p(\mathbf{n}) = \frac{1}{\pi^n \det \mathbf{R}_n} e^{-\mathbf{n}^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{n}},$$

де $\mathbf{R}_n^{-1}$ – матриця, обернена до кореляційної матриці $\mathbf{R}_n$.

Тоді, вхідний векторний процес $\mathbf{y}(t)$, за наявності корисної складової $\mathbf{s}(t)$, також є багатовимірним стаціонарним гауссівським процесом із середнім значенням $\mathbf{s}(t)$, що визначається згідно (5), та $s_m(t)$; $m = \overline{1, M}$ є детермінованими, але невідомими функціями із відповідною умовною щільністю розподілу

$$p(\mathbf{y} / \mathbf{y} = \mathbf{s} + \mathbf{n}) = \frac{1}{\pi^n \det \mathbf{R}} e^{-(\mathbf{y}-\mathbf{s})^H \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y}-\mathbf{s})},$$

де $\mathbf{R}^{-1}$ – матриця, обернена до кореляційної матриці $\mathbf{R}$.

Тоді, функція правдоподібності буде мати вигляд

$$\begin{aligned} \Psi[\mathbf{y}] &= \ln[p(\mathbf{y} / \mathbf{s} + \mathbf{n})] = \\ &= -\ln|\pi^n \det \mathbf{R}| - \left(\mathbf{y} - \sum_{m=1}^M s_m(t) \mathbf{v}(\theta_m) \right)^H \times \\ &\quad \times \mathbf{R}^{-1} \left(\mathbf{y} - \sum_{m=1}^M s_m(t) \mathbf{v}(\theta_m) \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Критерій максимуму правдоподібності полягає в тому, щоб знайти такі оцінки $\tilde{s}_m(t)$ значень сигналів зображень $s_m(t)$, що максимізують функцію правдоподібності (6). Для цього, обчислимо частинні похідні від функції $\Psi[\mathbf{y}(t)]$ по $s_m(t)$ та, дорівнявши їх до нуля, знайдемо оцінки максимальної правдоподібності $\tilde{s}_m(t)$.

Розглянемо спочатку випадок наявності одного джерела сигналу зображення $s_1(t)$. Тоді, функція правдоподібності та відповідна частинна похідна по $s_1(t)$ мають вигляд

$$\begin{aligned} \Psi[\mathbf{y}(t)] &= -\ln|\pi^n \det \mathbf{R}| - \\ &- (\mathbf{y} - s_1(t) \mathbf{v}(\theta_1))^H \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - s_1(t) \mathbf{v}(\theta_1)); \\ \frac{\partial \Psi}{\partial s_1} &= 2 \mathbf{v}^H(\theta_1) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} - \\ &- 2 s_1(t) \mathbf{v}^H(\theta_1) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(\theta_1) = 0. \end{aligned}$$

Звідки

$$s_1(t) \mathbf{v}^H(\theta_1) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(\theta_1) = \mathbf{v}^H(\theta_1) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y}.$$

Враховуючи, що $\mathbf{v}^H(\theta_1) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(\theta_1)$ – скаляр, отримаємо оцінку максимальної правдоподібності у вигляді

$$\tilde{s}_1(t) = \frac{\mathbf{v}^H(\theta_1) \mathbf{R}^{-1}}{\mathbf{v}^H(\theta_1) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(\theta_1)} \mathbf{y}(t).$$

Тоді, внаслідок (2), оптимальний за критерієм максимуму правдоподібності, параметричний вектор адаптивної антенної решітки визначається виразом

$$\mathbf{w}^H = \frac{\mathbf{v}^H(\theta_1) \mathbf{R}^{-1}}{\mathbf{v}^H(\theta_1) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(\theta_1)}.$$

Аналогічно, якщо адаптивною антенною решіткою приймаються сигнали зображень від $M+K \geq 1$ незалежних джерел, то для їх відновлення необхідно мати систему незалежних параметричних вагових векторів

$$\mathbf{w}_i^H = \frac{\mathbf{v}^H(\theta_i) \mathbf{R}^{-1}}{\mathbf{v}^H(\theta_i) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(\theta_i)}; i = \overline{1, M+K}. \quad (7)$$

Систему (7) можна записати у вигляді

$$\mathbf{w}_i^H = K(\theta_i) \mathbf{v}^H(\theta_i) \mathbf{R}^{-1}; i = \overline{1, M+K}. \quad (8)$$

якщо позначити через $K(\theta_i)$ скаляр

$$K(\theta_i) = \frac{1}{\mathbf{v}^H(\theta_i) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(\theta_i)}.$$

Оскільки точна кореляційна матриця $\mathbf{R}$ відома тільки при проведенні досліджень на моделях, то на практиці замість неї використовують оцінку $\tilde{\mathbf{R}}(L)$, отриману з вибірки вхідного векторного процесу $\mathbf{y}(t)$, об'єм якої L є змінною величиною.

Крім того, якщо напрямок надходження сигналу невідомий, то визначення необхідної оцінки напрямку фокусування θ_i на джерело сигналу передбачає застосування таких методів просторового спектрального аналізу, як алгоритми Бартлетта, Кейпона, теплового шуму, адаптивної кутової характеристики (AAR), лінійного передбачення, максимальної ентропії, мінімальної норми, багатосигнальної класифікації (MUSIC), власного вектора (EV) [11].

В цьому випадку, сигнал на виході i -го інформаційного каналу антенної решітки можна подати у вигляді

$$\tilde{s}_i = K(\tilde{\theta}_i) \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{v}(\tilde{\theta}_i) \mathbf{y}(t); i = \overline{1, M+K}. \quad (9)$$

де оцінка $\tilde{\theta}_i; i = \overline{1, M+K}$ є результатом спектрального аналізу просторового спектру потужності радіовипромінювань.

Реалізація цього алгоритму надана на рис. 1 у вигляді багатоканального процесора.

Рисунок 1 – Структура адаптивного процесора N -вимірної антенної решітки, що реалізує обробку $i = \overline{1, M+K}$ сигналів за алгоритмом (9)

Покажемо, що отримана система незалежних параметричних вагових векторів (8) задовольняє апроксимацію рівняння Вінера-Хопфа [6] в матричній формі

$$\mathbf{w}_i = \mathbf{R}^{-1} M[\mathbf{s}_i(t) \cdot \mathbf{y}^H(t)]; i = \overline{1, M}.$$

Враховуючи (8) та те, що

$$M[\mathbf{s}_i(t) \cdot \mathbf{y}^H(t)] = M[\mathbf{s}_i^2(t)] = S_i \cdot \mathbf{v}(\theta_i),$$

де S_i – потужності корисних сигналів, отримуємо

$$K(\theta_i) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(\theta_i) = S_i \cdot \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(\theta_i).$$

Отже, за умови $K(\theta_i) = S_i$, система (8) з точністю до постійного множника є вінеровським розв'язком.

Продемонструємо результат обробки сигналу зображення в адаптивній антенній решітці за алгоритмом (9), побудувавши імітаційну модель.

Статистичний експеримент, як результат усереднення 20 незалежних випробувань, проведемо для наступних умов: розмірність адаптивної антенної решітки $N = 20$; об'єм статистичної вибірки $L = 500$; джерела одного сигналу зображення та двох незалежних шумових гауссівських перешкод розташовані по відношенню до вісі нормалі адаптивної антенної решітки під кутами $\theta_1 = -10^\circ$; $\theta_2 = 5^\circ$; $\theta_3 = 20^\circ$; відношення сумарна перешкода/шум дорівнює 40 дБ; відношення сусідніх каналів прийому дорівнює $d/\lambda = 0,5$.

Візуальна (суб'єктивна) оцінка якості відновленого зображення в умовах шумових перешкод, надана на рис. 2 в), дозволяє зробити висновки про ефективність застосування алгоритму (9), який базується на інверсії кореляційної матриці спостережень.

На жаль, алгоритм (9) є ефективним тільки за наявності одного джерела сигналу зображення. Якщо приймаються сигнали зображень від декількох незалежних джерел, то їх взаємна кореляція впливає на властивості матриці $\mathbf{P}_s$ і, як наслідок, відокремлення сукупності сигналів зображень не відбувається.

Побудуємо імітаційну модель процесу відновлення корельованих між собою сигналів зображень на фоні шумових завад довільної інтенсивності за умов попереднього експерименту. Сигнали зображень (рис. 2 а, рис. 3 а) надходять від двох незалежних джерел на фоні зовнішньої завади та, в каналах прийому, корелюють між собою (рис. 3 б).

а)

б)

в)

Рисунок 2 – а) Початкове зображення.
б) Вплив перешкод на якість зображення при відношенні сумарна перешкода/шум 40 дБ
в) Результат обробки зображення за алгоритмом (9)

Тут джерела двох сигналів зображень та однієї шумової гауссовської перешкоди розташовані по відношенню до вісі нормалі адаптивної антенної решітки під кутами $\theta_1 = -10^\circ$; $\theta_2 = 5^\circ$; $\theta_3 = 20^\circ$; відношення зовнішня перешкода/шум дорівнює 28 дБ.

а)

а)

б)

б)

Рисунок 3 – а) Початкове зображення;
б) вплив взаємної кореляції зображень та шуму
при відношенні перешкода/шум 28 дБ

Очевидно, що на результат відновлення сигналів зображень, які приймаються одночасно, впливає матриця їх моментів $\mathbf{P}_s$. Вона відрізняється від діагональної, що приводить до проблеми виокремлення сукупності зображень. В цьому випадку класичний метод відновлення зображення за допомогою вагових коефіцієнтів, обчислених за формулою (8) виявляється неефективним, та актуальною стає проблема розробки методу відновлення зображень, функціонування якого інваріантне до степені кореляції корисних сигналів.

Рисунок 4 – Результат обробки зображення а) з
рис. 2 а; б) з рис. 3 а за алгоритмом (9)

Висновок

Розроблено метод відновлення сигналу зображення на фоні шумових перешкод довільної інтенсивності в інформаційній радіотехнічній системі з адаптивною антенною решіткою. Цей метод базується на інверсії вибіркової оцінки кореляційної матриці спостережень, яка використовується для знаходження оптимального вектора вагових коефіцієнтів. При цьому якість відновленого сигналу зображення залежить від характеристик вибіркової оцінки кореляційної матриці спостережень, які змінюються у випадку прийому декількох сигналів зображень одночасно.

Тому, перспективним методом відновлення сигналів зображень в подібній ситуації є використання інваріантних методів, які дозволяють перетворювати вхідний векторний процес, не змінюючи статистик його складових.

Список використаних джерел

References

1. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D- изображений. СПб.: БХВ – Петербург, 2011. 608 с.
2. Gonzalez R. C., and Woods R. E. Digital Image Processing. London: Pearson, 2018. 1035 p.
3. Барченко К.В., Білошкурський С.С., Гпрмаш В.В. Аналіз методів фільтрації зображень. Вісник Хмельницького національного університету. 2012. № 4. С. 79-86.
4. Лимонов А.С., Перельгин Б.В., Лимонов А.А. Вейвлет-анализ в цифровой обработке сигналов. Украинский гидрометеорологический журнал. 2011. № 9. С. 5-12.
5. 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: монография. Одесса: Бондаренко, 2016. 196 с.
6. Monzingo R.A., Haupt R., Miller T.W. Introduction to Adaptive Arrays. Raleigh, USA: SciTech Publishing, 2010. 530 p.
7. Вендик О.Г., Козлов Д.С. Адаптивные антенные решетки с возможностью подавления боковых лепестков для борьбы с помехами. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 9. С. 31-38.
8. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. Москва: Техносфера, 2013. 528 с.
9. Ткачук О.В. Операторна форма задачі відновлення зображення на фоні адитивних шумів. Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). 2016. № 2(6). С. 25-30.
10. Горбань И.И. Случайность и гиперслучайность. Киев: Наукова думка, 2016. 290 с.
11. Журавлев А.В., Безмага В.М., Маркин В.Г. Ковариационные методы определения направлений прихода сигналов. Теория и техника радиосвязи. 2016. № 4. С. 33-41.

1. Krasil'nikov N.N. Cifrovaya obrabotka 2D- i 3D- izobrazhenij. SPb.: BXV – Peterburg, 2011. 608 s.
2. Gonzalez R.C., and Woods R.E. Digital Image Processing. London: Pearson, 2018. 1035 p.
3. Barchenko K.V., Biloshkurskyi S.S., Hpr-mash V.V. Analiz metodiv filtratsii zobrazhen. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. 2012. # 4. S. 79-86.
4. Limonov A.S., Pereygin B.V., Limonov A.A. Vejvlet-analiz v cifrovoj obrabotke signalov. Ukrainskij gidrometeorologicheskij zhurnal. 2011. № 9. S. 5-12.
5. Bratchenko G.D., Skachkov V.V., Tkachuk E.V., Smaglyuk G.G., Grigor'ev D.V., Pivtorak O.V. Adaptivnye metody vosstanovleniya izobrazhenij v informacionno-izmeritel'nyx radiotekhnicheskix sistemax: monografiya. Odessa: Bondarenko, 2016. 196 s.
6. Monzingo R.A., and Miller T.W. Introduction to Adaptive Arrays. Raleigh, USA: SciTech Publishing, 2010. 530 p.
7. Vendik O.G., Kozlov D.S. Adaptivnye antennye reshetki s vozmozhnost'yu podavleniya bokovykh lepestkov dlya bor'by s pomexami. Izvestiya SPbGE'TU «LE'TI». 2012. № 9. S. 31-38.
8. Dzhigan V.I. Adaptivnaya fil'traciya signalov: teoriya i algoritmy. Moskva: Texnosfera, 2013. 528 s.
9. Tkachuk O.V. Operatorna forma zadachi vidnovlennia zobrazhennia na foni adytyvnykh shumiv. Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoi akademii (m. Odesa), # 2(6), 2016, s.25-30.
10. Gorban' I.I. Sluchajnost' i gipersluchajnost'. Kiev: Naukova dumka, 2016. 290 s.
11. Zhuravlev A.V., Bezmaga V.M., Markin V.G. Kovariacionnye metody opredeleniya napravlenij prixoda signalov. Teoriya i tekhnika radiosvyazi, № 4 (2016), s. 33-41.

Надійшла до редакції 20.11.2020