

РАДИОТЕХНИКА, РАДИОЛОКАЦИЯ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

УДК 621.391.82

**АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
С РАЗДЕЛЕНИЕМ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ И ВРЕМЕННОЙ
КОМПОНЕНТЫ НА ФОНЕ КОМПЛЕКСА ШИРОКОПОЛОСНОЙ
И УЗКОПОЛОСНОЙ ПОМЕХ**

Ю. Н. Паршин, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой РТУ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-0061-7804, e-mail: parshin.y.n@rsreu.ru

К. В. Буй, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0002-2372-6616, e-mail: buiquocvuong213@gmail.com

В данной работе исследуются адаптивные алгоритмы обработки сигналов антенной решетки в условиях комплекса широкополосной и узкополосной помех. Проводится сравнение различных адаптивных алгоритмов обработки сигналов при наличии комплекса помех и их влияния на помехоустойчивость. Для уменьшения вычислительных затрат предложены варианты адаптивных алгоритмов обработки сигналов с разделением обработки на пространственный и временной компоненты. Установлена асимптотическая сходимость адаптивных алгоритмов к оптимальным алгоритмам обработки сигнала с разделением на пространственный и временной компоненты.

Ключевые слова: адаптивный алгоритм, пространственный компонент, временный компонент, комплекс помех, широкополосная помеха, узкополосная помеха.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-3-12

Введение

Современные радиосистемы функционируют в сложной помеховой обстановке, когда сигнал наблюдается на фоне комплекса различных помех, например, тепловой шум, излучения передатчиков других радиосистем, помехи, возникающие из-за отражений от зданий или других объектов. Все эти помехи искажают полезный сигнал, что затрудняет решение поставленной задачи – обнаружение и измерение параметров сигнала, различение нескольких сигналов, распознавание типа источника излучения. Для повышения помехозащищенности разработана теория оптимальной обработки сигналов [1-4], составной частью которой являются компенсаторы помех. Для гауссовских пространственно-временных помех алгоритмы оптимальной обработки линейные и представляют собой весовые сумматоры пространственно-временных отсчетов наблюдаемого процесса [5]. Более эффективными с вычислительной точки зрения являются алгоритмы с разделением обработки на пространственный и временной компоненты [6-12].

В условиях статистической априорной неопределенности для эффективного подавления помех и выделения полезного сигнала пространственно-временной фильтр должен адаптироваться, то есть изменять свои весовые коэффициенты в соответствии с выбранным критерием качества. В алгоритмах пространственно-временной адаптации коэффициенты изменяются в зависимости от изменения пространственного положения помех [13], спектра помех, а также зависят от числа помех различного вида.

Целью работы является повышение эффективности обработки сигналов при действии комплекса пространственно-временных помех с неизвестными параметрами путем адаптивной подстройки векторов весовых коэффициентов пространственной и временной обработ-

ки. Особое внимание уделено адаптации алгоритмов обработки с разделением на пространственный и временной компоненты.

Постановка задачи

В работе [14] показано, что разделение обработки сигналов на пространственный и временной компоненты позволяет повысить вычислительную эффективность при незначительном уменьшении отношения сигнал-помеха. Разделение обработки также уменьшает массогабариты, энергопотребление, число весовых коэффициентов и, следовательно, упрощает их адаптивную подстройку. Разделение обработки также позволяет отдельно настраивать векторы пространственной и временной обработок, что способствует повышению скорости адаптивной подстройки, например, при предпроцессорной оптимизации пространственной структуры антенной решетки [15].

Разделение обработки на пространственный и временной компоненты позволяет реализовать четыре варианта адаптивных систем:

1) адаптивная пространственная и адаптивная временная обработки на основе непосредственного обращения корреляционных матриц (рисунок 1, а);

2) адаптивная пространственная и адаптивная временная обработки, основанные на рекуррентном методе (рисунок 1, б);

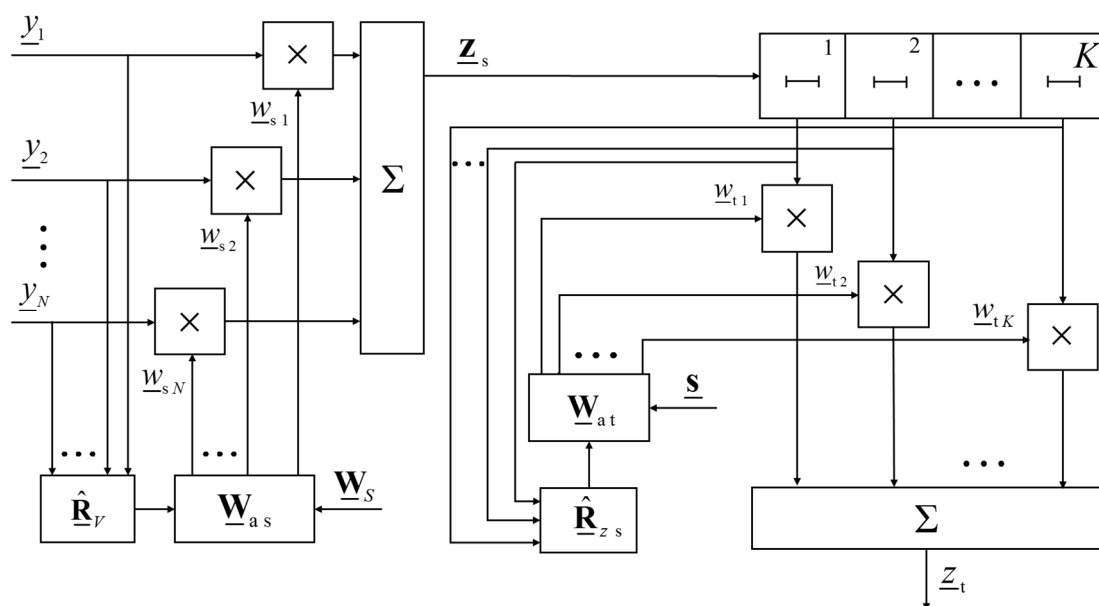
3) адаптивная пространственная обработка на основе непосредственного обращения корреляционных матриц и адаптивная временная обработка, выполненная с использованием рекуррентного метода;

4) адаптивная пространственная обработка на основе рекуррентного метода и адаптивная временная обработка с применением непосредственного обращения корреляционных матриц.

При разделении обработки на пространственный и временной компоненты оптимальный по критерию максимума отношения сигнал-помеха весовой вектор пространственной обработки и оптимальный весовой вектор временной обработки соответственно равны [4]:

$$\underline{W}_{OS} = \underline{W}_S^H \underline{R}_{VS}^{-1}, \quad \underline{W}_{Ot} = \underline{S}_S^* \underline{R}_{Vt}^{-1},$$

где $\underline{W}_S$ – направляющий вектор полезного сигнала; $\underline{R}_{VS}$ – матрица пространственной корреляции комплекса помех; $\underline{R}_{Vt}$ – матрица временной корреляции помех после пространственной обработки; $\underline{S}_S$ – отсчеты полезного сигнала по времени после пространственной обработки.



а (а)

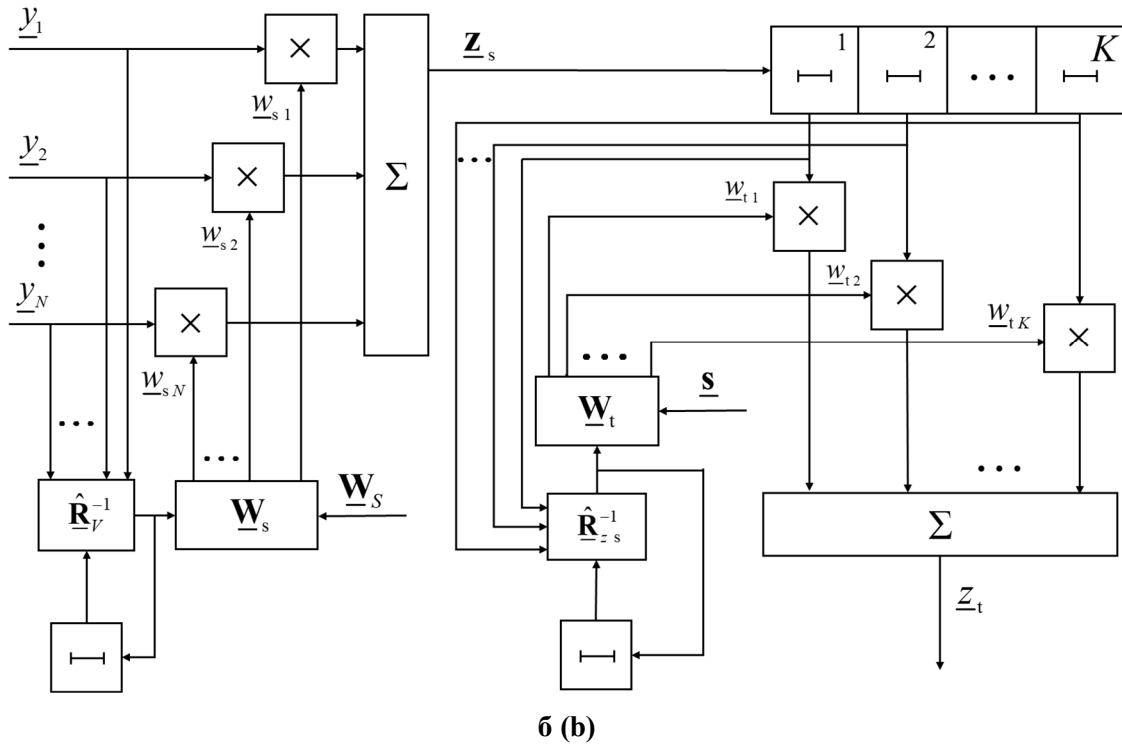


Рисунок 1 – Структурные схемы адаптивных алгоритмов подавления комплекса помех с разделением на пространственный и временный компоненты:

а – алгоритм на основе непосредственного обращения корреляционной матрицы,

б – алгоритм на основе рекуррентного обращения корреляционной матрицы

Figure 1 – Structural diagrams of adaptive algorithms for suppressing complex interference, divided into spatial and temporal components:

a – algorithm based on direct inversion of correlation matrix;

b – algorithm based on recurrent inversion of correlation matrix

При наличии статистической априорной неопределенности точные значения корреляционных матриц помех в соответствии с адаптивным байесовским подходом заменяются их состоятельными оценками [4]

$$\underline{W}_{AS} = \underline{W}_S^H \hat{\underline{R}}_{VS}^{-1}, \quad \underline{W}_{At} = \underline{S}_S^* \hat{\underline{R}}_{Vt}^{-1}.$$

Модели сигнала и помех

Пусть наблюдаемый процесс представляет собой $N \times K$ матрицу пространственно-временных отсчетов суммы сигнала и помех:

$$\underline{Y} = \underline{S} + \underline{V},$$

где K – число отсчетов во времени; N – число пространственных отсчетов, равное числу антенн; $\underline{S} = \underline{W}_S \underline{S}_0$ – $N \times K$ матрица отсчетов детерминированного сигнала; $\underline{S}_0$ – $1 \times K$ вектор отсчетов во времени детерминированного сигнала; $\underline{V} = \underline{V}_{nb} + \underline{V}_{wb} + \underline{V}_{noise}$ – комплекс помех,

$\underline{V}_{wb} = \left\{ \underline{V}_{wbk} = \sum_{m=1}^{M_{wb}} \underline{v}_{wbkm} \underline{W}_{wbm}, k=1, \dots, K \right\}$ – $N \times K$ матрица отсчетов комплекса M_{wb} пространственно коррелированных и некоррелированных во времени широкополосных помех (ШП); $\underline{W}_{wbm}$ – направляющий вектор ШП помех; $\underline{v}_{wbkm}, k=1, \dots, K$, – некоррелированные гауссовские случайные числа с дисперсией D_{wb} ; $\underline{V}_{nb} = \left\{ \underline{V}_{nbk} = \sum_{m=1}^{M_{nb}} \underline{v}_{nbkm} \underline{W}_{nbm}, k=1, \dots, K \right\}$ –

$N \times K$ матрица отсчетов пространственно распределенной и коррелированной во времени

узкополосной помехи (УП); $\underline{\mathbf{W}}_{nb\ m}$ направляющий вектор излучающих точек УП помехи; $\underline{v}_{nb\ k\ m} = \underline{v}_{nb\ k\ m}^I + j\underline{v}_{nb\ k\ m}^Q$ – отсчеты во времени УП с интервалом дискретизации Δt ; $\underline{v}_{nb\ k+1\ m}^I = a_{nb}\underline{v}_{nb\ k\ m}^I + b_{nb}\eta_{k\ m}$, $\underline{v}_{nb\ k+1\ m}^Q = a_{nb}\underline{v}_{nb\ k\ m}^Q + b_{nb}\eta_{k\ m}$ – отсчеты квадратурных составляющих УП; $a_{nb} = 1 - \alpha_{nb}\Delta t$, $b_{nb} = \sqrt{\frac{D_{nb}}{2M_{nb}}(1 - a_{nb}^2)}$; $\eta_{k\ m}$ – независимые гауссовские случайные числа; α_{nb} – коэффициент затухания временной корреляции УП; D_{nb} – дисперсия УП; $\underline{\mathbf{V}}_{noise}$ – $N \times K$ матрица отсчетов некоррелированного гауссовского шума с дисперсией D_n .

Сигнал на выходе блока оптимальной пространственной обработки представим в виде весовой суммы пространственных отсчетов входного сигнала:

$$\underline{\mathbf{z}}_S = \underline{\mathbf{W}}_{OS}\underline{\mathbf{Y}} = \underline{\mathbf{W}}_{OS}\underline{\mathbf{S}} + \underline{\mathbf{W}}_{OS}(\underline{\mathbf{V}}_{nb} + \underline{\mathbf{V}}_{wb} + \underline{\mathbf{V}}_{noise}) = \underline{\mathbf{S}}_S + \underline{\mathbf{V}}_S.$$

Сигнал на выходе блока оптимальной временной обработки представим в виде весовой суммы временных отсчетов результата пространственной обработки:

$$\underline{\mathbf{z}}_t = \underline{\mathbf{W}}_{Ot}\underline{\mathbf{z}}_S^T = \underline{\mathbf{W}}_{Ot}(\underline{\mathbf{S}}_S + \underline{\mathbf{V}}_S)^T.$$

В работе [12] получена матрица пространственно-временной корреляции ШП и УП на входе:

$$\underline{\mathbf{R}}_{wb} = \underline{\mathbf{R}}_{wb\ S} \otimes \underline{\mathbf{r}}_{wb\ t}, \quad \underline{\mathbf{R}}_{nb} = \underline{\mathbf{R}}_{nb\ S} \otimes \underline{\mathbf{r}}_{nb\ t}.$$

Матрица пространственной корреляции комплекса помех $\underline{\mathbf{V}}$ равна сумме корреляционных матриц ШП, УП и шума:

$$\underline{\mathbf{R}}_{V\ S} = \overline{\underline{\mathbf{V}}(k)\underline{\mathbf{V}}^H(k)} = \underline{\mathbf{R}}_{nb\ S} + \underline{\mathbf{R}}_{wb\ S} + \underline{\mathbf{R}}_{noise\ S}.$$

Матрица пространственной корреляции шума равна $\underline{\mathbf{R}}_{noise\ S} = D_{noise}\mathbf{I}_N$. Матрица пространственной корреляции нескольких ШП равна сумме корреляционных матриц каждой из ШП:

$$\underline{\mathbf{R}}_{wb\ S} = \sum_{m=1}^{M_{wb}} D_{wb\ m} \underline{\mathbf{W}}_{wb\ m} \underline{\mathbf{W}}_{wb\ m}^H.$$

Для описания пространственной корреляции непрерывно распределенных в пространстве УП используется угловой спектр мощности $p(\alpha, \lambda)$, задающий распределение интенсивности помехи по угловым координатам α, γ [12, 16]. При этом матрица пространственной корреляции УП равна

$$\underline{\mathbf{R}}_{nb\ S} = D_{nb\ S} \{r_{nb\ S}(n, k), n, k = 1, \dots, N\},$$

где коэффициенты пространственной корреляции пространственных отсчетов УП определяются соотношением

$$r_{nb\ S}(n, m) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} p(\alpha, \gamma) e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \sin \gamma [(x_m - x_n) \cos \alpha + (y_m - y_n) \sin \alpha]} d\gamma d\alpha \bigg/ \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} p(\alpha, \gamma), n, m = 1, \dots, N,$$

x_n, y_n – координаты фазовых центров антенн.

Так как в классифицированной выборке в АР присутствуют только помехи, матрица временной корреляции помех на выходе пространственной обработки имеет вид:

$$\underline{\mathbf{R}}_{V\ t} = \underline{\mathbf{R}}_t = \overline{(\underline{\mathbf{W}}_{OS}\underline{\mathbf{V}})^T (\underline{\mathbf{W}}_{OS}\underline{\mathbf{V}})^*} = \underline{\mathbf{Y}}^T \underline{\mathbf{W}}_{OS}^T \underline{\mathbf{W}}_{OS}^* \underline{\mathbf{Y}}^* = \begin{bmatrix} \underline{R}_{t\ 11} & \underline{R}_{t\ 12} & \cdots & \underline{R}_{t\ 1K} \\ \underline{R}_{t\ 21} & \underline{R}_{t\ 22} & \cdots & \underline{R}_{t\ 2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{R}_{t\ K1} & \underline{R}_{t\ K2} & \cdots & \underline{R}_{t\ KK} \end{bmatrix}.$$

Запишем элементы матрицы временной корреляции помех на выходе пространственной обработки:

$$\underline{R}_{t k_1 k_2} = \sum_{n_1=1}^N \underline{\mathbf{V}}_{n_1 k_1} \underline{w}_{n_1} \sum_{n_2=1}^N \underline{w}_{n_2}^* \underline{\mathbf{V}}_{n_2 k_2}^* = \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N \underline{w}_{n_1} \underline{w}_{n_2}^* \overline{\underline{\mathbf{V}}_{n_1 k_1} \underline{\mathbf{V}}_{n_2 k_2}^*},$$

где $\overline{\underline{\mathbf{V}}_{n_1 k_1} \underline{\mathbf{V}}_{n_2 k_2}^*}$ – элемент матрицы пространственно-временной корреляции помех на входе.

При заданном числе весовых коэффициентов временной обработки K_w используем следующие элементы матрицы временной корреляции помех после пространственной обработки:

$$\underline{R}_{t k_1 k_2} = \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N \underline{w}_{S n_1} \underline{w}_{S n_2}^* \left[\left(\underline{R}_{nb S k_1 k_2} (n_1, n_2) \underline{r}_{nb t} (k_1, k_2) \right) + \right. \\ \left. + \left(\underline{R}_{wb S k_1 k_2} (n_1, n_2) \underline{r}_{wb t} (k_1, k_2) \right) + \left(\underline{R}_{noise S k_1 k_2} (n_1, n_2) \underline{r}_{noise t} (k_1, k_2) \right) \right], \\ k_1, k_2 = 1, \dots, K_w.$$

Алгоритмы адаптации пространственного и временного компонентов алгоритма

Адаптивную подстройку весовых коэффициентов проведем с использованием классифицированной обучающей выборки, когда на входе действуют только помехи, а детерминированный сигнал отсутствует. Оценка корреляционной матрицы комплекса помех $\hat{\underline{\mathbf{R}}}_V$ является ключевым элементом в данной адаптивной обработке, так как она описывает статистическую зависимость между компонентами вектора входных помех. Рассмотрим два метода получения оценки корреляционной матрицы для вычисления весового вектора: метод непосредственного обращения корреляционной матрицы и метод рекуррентного обращения корреляционной матрицы.

Оценка корреляционной матрицы $\hat{\underline{\mathbf{R}}}_V$ методом максимального правдоподобия равна выборочному среднему по выборке размером K [4]:

$$\hat{\underline{\mathbf{R}}}_V = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \underline{\mathbf{V}}(k) \underline{\mathbf{V}}^H(k),$$

где $\underline{\mathbf{V}}(k)$ – вектор помех, для которого оценивается корреляционная матрица. Соответственно при адаптивном вычислении вектора весовой обработки используется непосредственное обращение оценки корреляционной матрицы $\hat{\underline{\mathbf{R}}}_V^{-1}$. Если оценивается матрица пространственной корреляции, то используется выборка столбцов матрицы комплекса помех $\underline{\mathbf{V}}(k) = \underline{\mathbf{V}}(:, k)$.

При оценивании матрицы временной корреляции используются отсчеты $\underline{v}_s(k)$ из строки помех, получаемых в результате пространственной обработки:

$$\hat{\underline{\mathbf{R}}}_V = \left\{ \hat{R}(k_1, k_2), k_1, k_2 = 1, \dots, K_w \right\}, \\ \hat{R}(k_1, k_2) = \frac{1}{K - k_1 + k_2} \sum_{k=k_1}^K \underline{v}_s(k) \underline{v}_s^*(k - k_1 + k_2), k_1 - k_2 \geq 0, \\ \hat{R}(k_1, k_2) = \frac{1}{K + k_1 - k_2} \sum_{k=1}^{K-k_1} \underline{v}_s(k - k_1 + k_2) \underline{v}_s^*(k), k_1 - k_2 < 0,$$

где K_w – число весовых коэффициентов временной обработки.

Для уменьшения временных затрат при применении метода непосредственного обращения корреляционной матрицы можно использовать рекуррентные методы обращения корреляционной матрицы. Рекуррентный алгоритм позволяет получить вектор весовых коэффициентов быстрее, чем методом непосредственного обращения, с последующим уточнением в течение времени. Рекуррентный алгоритм с регулируемой памятью для вычисления обратной матрицы пространственной корреляции имеет вид [4]:

$$\hat{\mathbf{R}}_{\nu}^{-1}(k+1) = \frac{1}{(1-\beta)} \hat{\mathbf{R}}_{\nu}^{-1}(k) - \frac{\beta}{(1-\beta)(1-\beta) + \beta [\mathbf{V}^H(k+1) \hat{\mathbf{R}}_{\nu}^{-1}(k) \mathbf{V}(k+1)]} \left[\hat{\mathbf{R}}_{\nu}^{-1}(k) \mathbf{V}(k+1) \right] \left[\mathbf{V}^H(k+1) \hat{\mathbf{R}}_{\nu}^{-1}(k) \right],$$

где $0 \leq \beta \leq 1$ – коэффициент памяти рекуррентного алгоритма обращения, который отражает влияние предыдущего отсчета наблюдаемого процесса на последующее значение оценки обратной матрицы, $(\bullet)^H$ – знак эрмитового сопряжения. При оценивании матрицы пространственной корреляции используется вектор пространственных отсчетов комплекса помех $\mathbf{V}(k) = \{v_1(k), v_2(k), \dots, v_N(k)\}^T$ от N антенных элементов в момент времени k . При оценивании матрицы временной корреляции используется вектор отсчетов из строки помех, получаемых в результате пространственной обработки:

$$\mathbf{V}_s(k) = \{v_s(k, k_1), k_1 = k, \dots, k + K_w - 1\}.$$

Итерационный алгоритм обращения матрицы временной корреляции имеет вид:

$$\hat{\mathbf{R}}_{\nu_t}^{-1}(k+1) = \frac{1}{(1-\beta)} \hat{\mathbf{R}}_{\nu_t}^{-1}(k) - \frac{\beta}{(1-\beta)(1-\beta) + \beta [\mathbf{z}_s^T(k+1) \hat{\mathbf{R}}_{\nu_t}^{-1}(k) \mathbf{z}_s(k+1)]} \left[\hat{\mathbf{R}}_{\nu_t}^{-1}(k) \mathbf{z}_s^*(k+1) \right] \left[\mathbf{z}_s^T(k+1) \hat{\mathbf{R}}_{\nu_t}^{-1}(k) \right].$$

Результаты моделирования

Эффективность оптимальных алгоритмов, полученных при разделении обработки на пространственный и временной компоненты при полной априорной определенности, исследована в работах [11, 12, 14]. Эффективность адаптивных алгоритмов оценивается по факту асимптотической сходимости адаптивных коэффициентов к их оптимальным значениям, времени сходимости [15] и среднеквадратическим значениям флуктуаций весовых коэффициентов в установившемся режиме адаптации. Анализ адаптивного алгоритма проведен для числа антенн $N = 4$, расстояния между соседними антеннами равно $d = \frac{\lambda}{2}$. Число отчетов по времени $K = 10000$, $K = 30000$, число весовых коэффициентов временной обработки $K_w = 20$, направление прихода ШП $\alpha_{wb} = 20^\circ$, отношение ШП-шум $q_{wb} = 10$ дБ. Узкополосная помеха создается $M_{nb} = 100$ источниками коррелированных во времени случайных процессов, располагающихся равномерно в угловом секторе от $\alpha_{nb1} = 30^\circ$ до $\alpha_{nb2} = 40^\circ$. Угловой спектр узкополосной помехи $p(\alpha, \gamma) = \text{const}$, отношение узкополосная помеха-шум $q_{nb} = 10$ дБ. Постоянный во времени полезный детерминированный сигнал $\mathbf{S}_{01} = \{1, 1, \dots, 1\}$ или знакопеременный во времени сигнал $\mathbf{S}_{02} = \{1, -1, 1, \dots\}$ располагаются в угловом направлении $\alpha_s = 0^\circ$.

На рисунке 2 представлены зависимости оптимальных и адаптивных весовых коэффициентов пространственной обработки от объема обучающей выборки. Адаптация производится методом непосредственного обращения матрицы. Результаты анализа показали, что адаптивные коэффициенты сходятся к оптимальным значениям при увеличении объема обучающей выборки K , а погрешность вычисления весового коэффициента уменьшается и стремится к нулю.

На рисунке 3 представлена зависимость адаптивного весового коэффициента пространственной обработки от времени, полученного рекуррентным методом. Для сравнения приведено оптимальное значение весового коэффициента. Графики зависимостей показывают, что адаптивный коэффициент сходится к оптимальному значению при увеличении дискретного времени k . При этом погрешность вычисления весового коэффициента зависит от коэффициента памяти β и уменьшается при уменьшении β . Вместе с тем при уменьшении β увеличивается время сходимости адаптивного весового коэффициента к оптимальному значению.

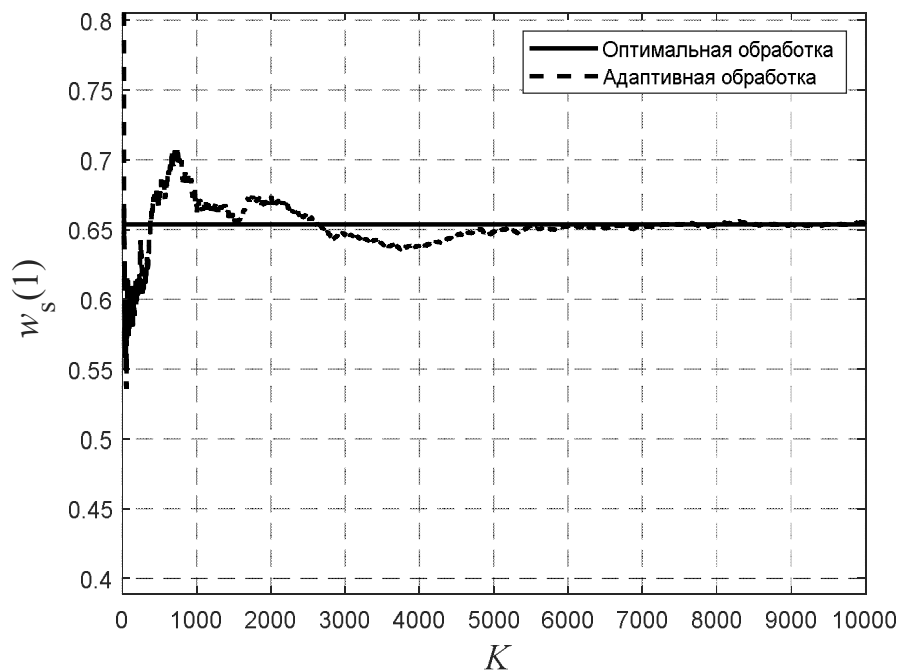


Рисунок 2 – Весовые коэффициенты оптимальной и адаптивной пространственных обработок методом непосредственного обращения матрицы
Figure 2 – Weight coefficients of optimal and adaptive spatial processing by direct matrix inversion

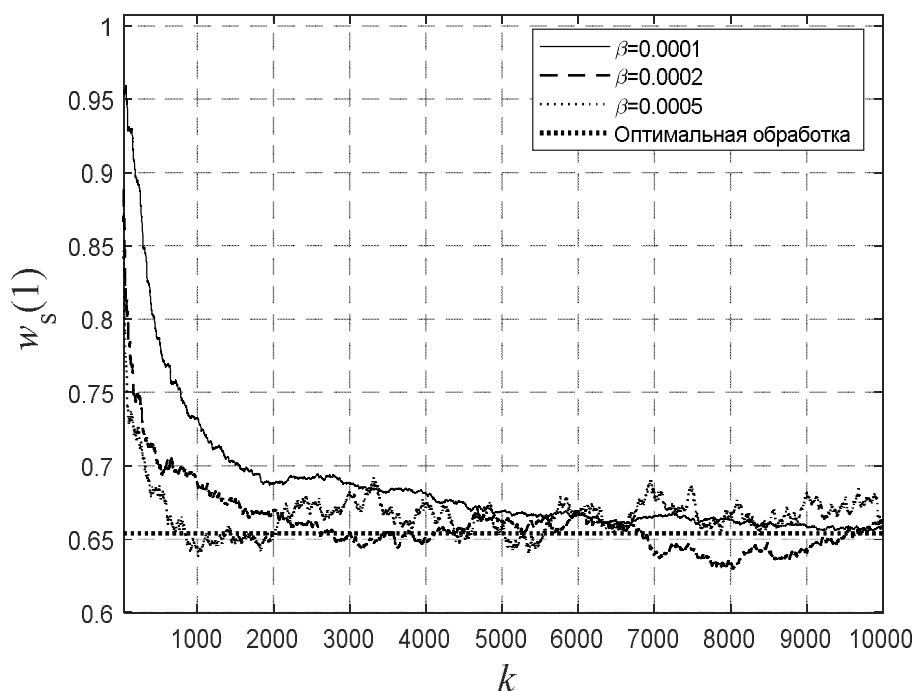


Рисунок 3 – Весовые коэффициенты оптимальной и адаптивной пространственных обработок с различными коэффициентами памяти
Figure 3 – Weight coefficients of optimal and adaptive spatial processing with different memory coefficients

На рисунке 4 представлено сравнение зависимостей весовых коэффициентов временной обработки, полученных методом непосредственного обращения матрицы, от объема обучающей выборки и весовых коэффициентов, полученных методом рекуррентного обращения матриц с разными коэффициентами памяти, от времени. Установлено, что алгоритм адаптации по методу непосредственного обращения обладает меньшим временем сходимости при сравнимой погрешности весового коэффициента.

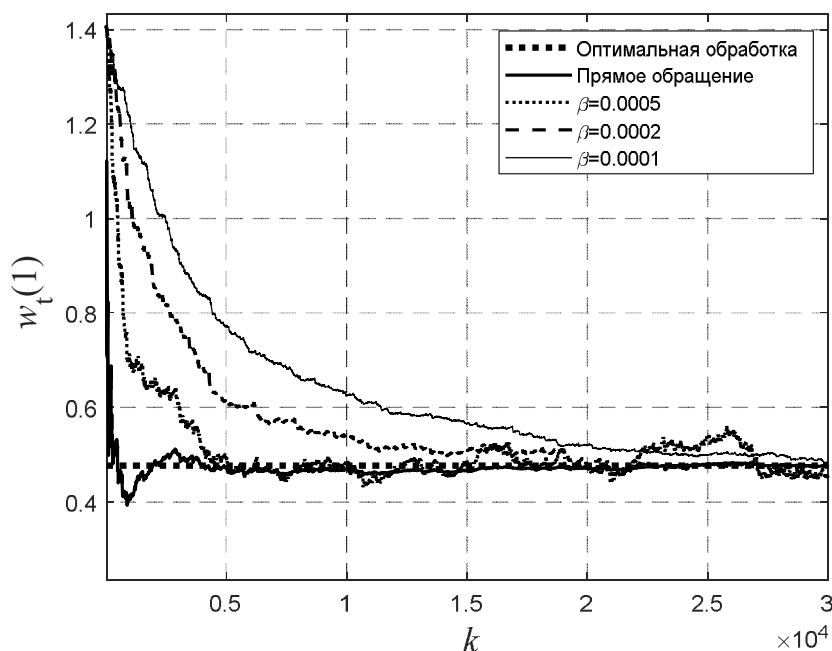


Рисунок 4 – Весовые коэффициенты адаптивной временной обработки разными методами
Figure 4 – Weight coefficients of adaptive time processing by different methods

Заключение

В результате проведенного исследования получены адаптивные алгоритмы обработки сигналов с разделением на пространственный и временной компоненты. Показано, что эффективность адаптации рекуррентным методом зависит от значения коэффициента памяти и количества временных отсчетов, что требует точной настройки параметров для достижения оптимального результата. Метод непосредственного обращения матриц, хотя и обеспечивает более точное решение, сталкивается с возможными сложностями, связанными с вычислением обратной матрицы, особенно при большой размерности матрицы.

Для обеспечения быстрой сходимости и повышения эффективности обработки может использоваться комбинированный подход. При этом на начальном этапе нескольких первых временных отсчетов весовой вектор определяется с использованием метода прямого обращения оценки корреляционной матрицы. На последующих этапах весовой вектор рассчитывается рекуррентным методом, что позволяет сократить вычислительные затраты и сохранить точность обработки. Такой подход позволит обеспечить сбалансированность между вычислительной сложностью и скоростью адаптации, что делает его предпочтительным для применения в системах реального времени.

Библиографический список

1. Сосулин Ю.Г. Методы оптимальной обработки сигналов на фоне комплекса помех // Радиотехника и электроника. 1982. Т.27. № 6. С. 1171-1181.
2. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1992. 304 с.
3. Сосулин Ю.Г., Костров В.В., Паршин Ю.Н. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. М.: Радиотехника, 2014. 632 с.
4. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решётки. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
5. Lekhovyt'skiy D.I., Riabukha V.P., Semeniaka A.V., Atamanskiy D.V., Katiushyn Ye. A. Protection of coherent pulse radars against combined interferences. 1. Modifications of STSP systems and their ultimate performance capabilities // Radioelectronics and Communications Systems. 2019. Vol. 62. No. 7. Pp. 311-341.
6. Буй К.В., Паршин Ю.Н. Квазиоптимальная обработка сигнала на фоне комплекса узкополосной и широкополосной пространственно-временных помех // Радиолокация, навигация, связь (RLNC-2024). 2024. Т. 4 С. 392-400.

7. Буй К.В., Паршин Ю.Н. Спектральные характеристики узкополосной помехи в антенной решётке с фазовой адаптацией // Радиолокация, навигация, связь (RLNC-2023). 2022. С. 326-332.
8. Parshin Yu., Bui Q.V. Spatial Suppression of Interference Complex Using Phase Adaptation Algorithms // 25th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). Moscow. Russian Federation. 2023. Pp. 1-4.
9. Паршин Ю.Н., Буй К.В. Пространственное подавление помех с помощью модифицированного алгоритма фазовой адаптации // Радиолокация, навигация, связь. 2023. Т.5. С. 21-25.
10. Паршин Ю.Н., Буй Куок Вьонг. Повышение помехоустойчивости радиотехнических систем с помощью модифицированного алгоритма фазовой адаптации // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 2. С. 45-49.
11. Паршин Ю.Н., Буй К.В. Алгоритм оптимальной линейной обработки дискретных сигналов на фоне комплекса широкополосных и узкополосных помех // Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». 2023. С. 67-73.
12. Parshin Yu., Bui. Q. V. Linear Optimal Signal Processing in the Presence of Narrowband and Wideband Spatio-Temporal Interference Complex. // 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). 2024. Pp. 1-6.
13. Паршин Ю.Н., Александров П.А. Анализ эффективности определения направления на источник радиоизлучения в малоэлементной антенной решетке при действии пространственно коррелированных помех // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014 № 50-1. С. 34-40.
14. Паршин Ю.Н., Буй К.В. Эффективность алгоритмов обработки сигналов с разделением на пространственный и временной компоненты на фоне комплекса помех // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2024. Вып. 3 (55). С. 43-52.
15. Гусев С.И., Паршин Ю.Н. Повышение скорости сходимости адаптации в системе обработки сигналов с оптимизацией пространственной структуры // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2011. № 37. С. 31-34.
16. Грачев М.В., Паршин Ю.Н. Исследование углового спектра мощности шумов многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов и оптимизации нагрузочных импедансов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 3-12.

UDC 621.391.82

ADAPTIVE ALGORITHMS FOR SIGNAL PROCESSING WITH SEPARATION INTO SPATIAL AND TEMPORAL COMPONENTS AGAINST THE BACKGROUND OF BROADBAND AND NARROWBAND INTERFERENCE COMPLEX

Yu. N. Parshin, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-0061-7804, e-mail: parshin.y.n@rsreu.ru
Q. V. Bui, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0009-0002-2372-6616, e-mail: buiquocvuong213@gmail.com

In this paper, adaptive algorithms for processing antenna array signals in a complex of broad-band and narrowband interference are investigated. A comparison of various adaptive signal processing algorithms in the presence of interference set and their effect on noise immunity is made. To reduce computational costs, the options of adaptive signal processing algorithms with separation of processing into spatial and temporal components are proposed. The asymptotic convergence of adaptive algorithms to optimal signal processing algorithms with separation into spatial and temporal components has been established.

Keywords: adaptive algorithm, spatial component, temporal component, interference complex, broadband interference, narrowband interference.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-3-12

References

1. **Sosulin Yu.G.** Metody optimal'noy obrabotki signalov na fone kompleksa pomekh. *Radiotekhnika i elektronika*. 1982, vol.27, no. 6, pp. 1171-1181. (in Russian).
2. **Sosulin Yu.G.** *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii i radionavigatsii* (Theoretical foundations of radar and radio navigation), Ucheb. posobie dlya vuzov, Moscow, Radio i svyaz'. 1992, 304 p. (in Russian).
3. **Sosulin Yu.G., Kostrov V.V., Parshin Yu.N.** *Otsenочно-korrelatsionnaya obrabotka signalov i kompensatsiya pomekh* (Estimated correlation signal processing and interference compensation). Moscow: Radiotekhnika. 2014, 632 p. (in Russian).
4. **Monzingo R.A., Miller T.U.** *Adaptivnye antennnye reshetki* (Adaptive antenna arrays). Moscow: Radio i svyaz'. 1986, 448 p. (in Russian).
5. **Lekhovytskiy D.I., Riabukha V.P., Semeniaka A.V., Atamanskiy D.V., Katiushyn Ye.A.** Protection of coherent pulse radars against combined interferences. 1. Modifications of STSP systems and their ultimate performance capabilities. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2019, vol. 62, no. 7, pp. 311-341.
6. **Bui Q.V., Parshin Yu.N.** Kvazioptimal'naya obrabotka signala na fone kompleksa uzkopolosnoy i shirokopolosnoy prostranstvenno-vremennykh pomekh. *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz' (RLNC-2024)*. 2024, vol. 4, pp. 392-400. (in Russian).
7. **Bui Q.V., Parshin Yu.N.** Spektral'nye kharakteristiki uzkopolosnoy pomekhi v antennoy reshetke s fazovoy adaptatsiyey. *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz' (RLNC-2022)*. 2022, vol. 5, pp. 326-332. (in Russian).
8. **Parshin Yu., Bui Q. V.** Spatial Suppression of Interference Complex Using Phase Adaptation Algorithms. *25th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*. 2023, pp. 1-4.
9. **Parshin Yu.N., Bui Q.V.** Prostranstvennoye podavleniye pomekh s pomoshch'yu modifitsirovannogo algoritma fazovoy adaptatsii. *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz' (RLNC-2023)*. 2023, vol. 5, pp. 21-25. (in Russian).
10. **Parshin Yu.N., Bui Quoc Vuong.** Povisheniye pomekhoustoychivosti radiotekhnicheskikh sistem s pomoshch'yu modifitsirovannogo algoritma fazovoy adaptatsii. *Tsifrovaya obrabotka signalov*. 2023, no. 2, pp. 45-49. (in Russian).
11. **Parshin Yu.N., Bui Q.V.** Algoritm optimal'noy lineynoy obrabotki diskretnykh signalov na fone kompleksa shirokopolosnykh i uzkopolosnykh pomekh. *Materialy VIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nyye problemy sovremennoy nauki i proizvodstva»*, Ryazan': RSREU. 2023, pp. 67-73. (in Russian).
12. **Parshin Yu., Bui. Q.V.** Linear Optimal Signal Processing in the Presence of Narrowband and Wideband Spatio-Temporal Interference Complex. *26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*. 2024, pp. 1-6.
13. **Parshin Yu.N., Alexandrov P.A.** Analiz effektivnosti opredeleniya napravleniya na istochnik radioizlucheniya v maloelementnoy antennoy reshetke pri deystvii prostranstvenno korrelirovannykh pomekh. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2014, no. 50-1, pp. 34-40. (in Russian).
14. **Parshin Yu.N., Bui Q.V.** Effektivnost' algoritmov obrabotki signalov s razdeleniyem na prostranstvennyy i vremennoy komponenty na fone kompleksa pomekh. *Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnyye sistemy*. 2024, vol. 3(55), pp. 43-52. (in Russian).
15. **Gusev S.I., Parshin Yu.N.** Povysheniye skorosti skhodimosti adaptatsii v sisteme obrabotki signalov s optimizatsiyey prostranstvennoy struktury. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2011, no. 37, pp. 31-34. (in Russian).
16. **Grachev M.V., Parshin Yu.N.** Issledovaniye uglovogo spektra moshchnosti shumov mnogokanal'noy priemnoy sistemy s vzaimnym vliyaniyem kanalov i optimizatsiyey nagruzochnykh impedansov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2022, no. 82, pp. 3-12 (in Russian).