

УДК 621.396.67

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ, ОПТИМАЛЬНОЙ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ОТКЛОНЕНИЯ, ПРИ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ СИГНАЛА И ПОМЕХ

А. С. Попов, В. Ф. Пименов*

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

Приведены результаты численного моделирования и сравнения характеристик оптимальной пространственной селекции сигнала и двух коррелированных помех в линейной эквидистантной антенной решётке, оптимальной по критерию минимума среднеквадратического отклонения. Выявлены новые свойства оптимального пространственного фильтра: наличие на его входе и выходе дополнительной корреляционной составляющей суммы помех; характер зависимости показателя его эффективности от угла сканирования первой помехи; существенные отличия форм кривых его эффективности при различных корреляционных зависимостях между сигналом и помехой. Проанализирована динамика изменения отношения сигнал/помехи на выходе оптимизированной антенной решётки в зависимости от значения коэффициента корреляции. Показаны виды искажений диаграммы направленности. Выявлены параметры сигнально-помеховой обстановки, приводящие к недопустимому снижению эффективности пространственного фильтра.

ВВЕДЕНИЕ

Адаптивные антенные решётки применяются в радиосистемах различного назначения [1]. Принципы работы таких решёток в первую очередь различаются принятыми критериями оптимальности и возможностями их применения [2, 3]. Эти критерии определяют свойства учитываемого отличия сигнала от помех, которые используются в решётке как необходимая априорная информация. Такие критерии, как максимум отношения сигнал/шум или максимум отношения правдоподобия [3] не учитывают наличия полезного сигнала в смеси с помехами. Это приводит к подавлению сигнала наряду с помехами, если он не имеет малой мощности или скважности. Для исключения подавления сигнала алгоритмы адаптации с защитой направления прихода сигнала требуют практически недостижимой точности юстировки диаграммы направленности антенной решётки. Моделирование такого пространственного фильтра представлено в работе [4].

Единственным критерием, учитывающим текущее изменение полезного сигнала и его структуру для селекции в адаптивной антенной решётке, является минимум среднеквадратического отклонения (МСКО) выходного сигнала от эталонного [2, 3, 5]. Свойства такой решётки для условий отсутствия взаимной корреляции сигналов и помех хорошо и подробно рассмотрены в ряде работ зарубежных и отечественных авторов.

Достаточно полному исследованию влияния коррелированности сигнала и помех на характеристики адаптивной антенной решётки с оптимальной пространственной селекцией сигнала посвящено не слишком большое число доступных и известных публикаций. В отдельных работах приводятся некоторые показатели [6], но в ограниченном объёме и для решёток с критериями максимума отношения сигнал/(помехи+шум) ($S/(P+Ш)$), максимума правдоподобия, минимума дисперсии шума и др. [3]. Целью данной статьи является более глубокое исследование свойств адаптивной антенной решётки с более полной детализацией поведения кривых

* arahar@mail.ru

соотношения $C/(Π+Ш)$, диаграммы направленности и степени подавления помех при изменении параметров сигнально-помеховой обстановки. Последняя включает в себя энергетические и пространственные характеристики сигнала и помех, геометрию, характеристики и ориентацию решётки, коэффициенты взаимной корреляции сигнала и помех. Алгоритмы рекуррентного вычисления оптимального вектора весовых коэффициентов в данной статье не затронуты и требуют отдельного рассмотрения, как, например, в работе [7].

В данной публикации представлены результаты численного моделирования и их интерпретация. Выявлены новые свойства оптимального пространственного фильтра: наличие его на входе и выходе дополнительной (корреляционной) составляющей суммы помех; характер зависимости показателя его эффективности от угла сканирования первой (некоррелированной) помехи; существенные отличия его эффективности от вида коррелированности и величины коэффициента корреляции. Проанализирована динамика изменения отношения $C/(Π+Ш)$ на выходе оптимизированной адаптивной антенной решётки в зависимости от значения коэффициента корреляции во всём диапазоне его изменения. Показаны виды диаграммы направленности решёток. Приведены параметры помех, приводящих к недопустимому снижению эффективности пространственного фильтра.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поскольку операция оптимального взвешенного суммирования сигнала и помех с выходов элементов адаптивной антенной решётки является линейной, то достаточно выбрать модели сигнала и помех в рамках корреляционной теории. В качестве такой модели, как известно, можно принять квазиузкополосный случайный процесс $s(t)$ на несущем колебании частоты ω_0 со случайными амплитудой $A(t)$ и фазой $\varphi(t)$ [8] в комплексной форме $\dot{s}(t) = A(t) \exp\{-i[\omega_0 t + \varphi(t)]\} = \dot{A}(t) \exp[-i\varphi_0(t)]$, где $\dot{A}(t) = A(t) \exp[-i\varphi(t)]$ — комплексная амплитуда.

Рассматривается линейная эквидистантная адаптивная антенная решётка, состоящая из L всенаправленных приёмных элементов. На её вход поступают квазиузкополосные сигнал и две помехи на совпадающих частотах несущих колебаний, воздействующих с различных направлений. Для компактности формул полезный сигнал будем индексировать буквой «с», шум — буквой «ш», помехи — только порядковыми номерами 1 и 2. Мощности сигнала, собственного шума антенного элемента и помех обозначены P_c , $P_{ш}$, P_1 и P_2 соответственно.

На выходах элементов решётки имеем отклики от сигнала, помех и собственных шумов элементов. Мощности собственного шума в каждом элементе примем одинаковыми и равными $P_{ш}$. Для удобства вычислений уровни сигнала, i -й помехи и шума на выходе одного элемента будем выражать в относительных единицах, а именно: $q_c = P_c/P_{ш}$, $q_i = P_i/P_{ш}$ ($i = 1, 2$), $q_{ш} = P_{ш}/P_{ш} = 1$.

Примем, что относительные амплитуды напряжений сигнала, помех и шума можно представить в виде $s_c \sqrt{q_c}$, $s_i \sqrt{q_i}$, $s_{ш} \sqrt{q_{ш}}$ соответственно, причём справедливо соотношение для введённых случайных составляющих амплитуд $\langle s_c^2 \rangle = \langle s_i^2 \rangle = \langle s_{ш}^2 \rangle = 1$, где угловые скобки обозначают статическое усреднение.

Векторы сигнала, помех и шума на выходах элементов антенной решётки, не снижая общности, запишем в виде векторов $\mathbf{z}_c = s_c \sqrt{q_c} \mathbf{h}_c$, $\mathbf{z}_i = s_i \sqrt{q_i} \mathbf{h}_i$ ($i = 1, 2$), $\mathbf{z}_{ш} = s_{ш} \sqrt{q_{ш}} \mathbf{h}_{ш}$. В этих выражениях фазоры сигнала $\mathbf{h}_c$ и помех $\mathbf{h}_i$ для линейной эквидистантной адаптивной антенной решётки имеют следующий вид:

$$\mathbf{h}_c = \begin{pmatrix} 1 \\ \exp(-j\varphi_c) \\ \vdots \\ \exp(-jl\varphi_c) \\ \vdots \\ \exp[-j(L-1)\varphi_c] \end{pmatrix}; \quad \mathbf{h}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ \exp(-j\varphi_1) \\ \vdots \\ \exp(-jl\varphi_1) \\ \vdots \\ \exp[-j(L-1)\varphi_1] \end{pmatrix}; \quad \mathbf{h}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ \exp(-j\varphi_2) \\ \vdots \\ \exp(-jl\varphi_2) \\ \vdots \\ \exp[-j(L-1)\varphi_2] \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Здесь L — число элементов решётки, φ — фазовый набег между соседними элементами, определяемый для сигнала и помех выражениями $\varphi_c = (2\pi d/\lambda) \sin \theta_c$ и $\varphi_i = (2\pi d/\lambda) \sin \theta_i$ соответственно, где λ — длина волны несущего колебания, d — расстояние между соседними элементами антенной решётки, θ_c и θ_i — углы прихода сигнала и i -й помехи относительно вертикали к линии расположения элементов.

Собственные шумы элементов антенной решётки взаимно не коррелированы, не коррелированы с сигналом и помехами и имеют одинаковую мощность. Тогда корреляционная матрица вектора шумов элементов решётки представляет собой квадратную матрицу $\mathbf{I}$ с единицами по главной диагонали, $\langle \mathbf{z}_{\text{ш}} \mathbf{z}_{\text{ш}}^+ \rangle = \mathbf{I}$, где индекс «+» обозначает эрмитово сопряжение.

Как известно, сигнально-помеховая обстановка на выходе элементов решётки полностью определяется корреляционной матрицей вектора откликов (напряжений) с выходов элементов.

Будем различать три случая: а) сигнал и помехи взаимно не коррелированы; б) вторая помеха коррелирована с сигналом, но не коррелирована с первой помехой; в) помехи взаимно коррелированы, но не коррелированы с сигналом. Общая корреляционная матрица $\mathbf{R}$ вектора откликов с выходов элементов решётки будет содержать корреляционную матрицу сигнала $\mathbf{R}_c$ и три корреляционных матрицы помех $\mathbf{R}_{\text{нкп}}$, $\mathbf{R}_{\text{кп}}$ и $\mathbf{R}_{\text{ксп}}$ в соответствии с вариантами а, б и в:

$$\mathbf{R} = \langle \mathbf{z} \mathbf{z}^+ \rangle = \langle (\mathbf{z}_c + \mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2 + \mathbf{z}_{\text{ш}}) (\mathbf{z}_c + \mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2 + \mathbf{z}_{\text{ш}})^+ \rangle = \mathbf{R}_c + \mathbf{R}_{\text{нкп}} + \mathbf{R}_{\text{кп}} + \mathbf{R}_{\text{ксп}}. \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{z} = \mathbf{z}_c + \mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2 + \mathbf{z}_{\text{ш}}$ — вектор смеси сигнала, помех и собственных шумов на выходах элементов решётки, $\mathbf{R}_c = q_c \mathbf{h}_c \mathbf{h}_c^+$ — корреляционная матрица сигнала, $\mathbf{R}_{\text{нкп}} = q_1 \mathbf{h}_1 \mathbf{h}_1^+ + q_2 \mathbf{h}_2 \mathbf{h}_2^+ + \mathbf{I}$ — корреляционная матрица взаимно некоррелированных помех и шума, $\mathbf{R}_{\text{кп}} = r_{12} \sqrt{q_1 q_2} \mathbf{h}_1 \mathbf{h}_2^+ + r_{12} \sqrt{q_1 q_2} \mathbf{h}_2 \mathbf{h}_1^+ = r_{12} \sqrt{q_1 q_2} (\mathbf{h}_1 \mathbf{h}_2^+ + \mathbf{h}_2 \mathbf{h}_1^+)$ — матрица взаимной корреляции первой и второй помех, $\mathbf{R}_{\text{ксп}} = r_{c2} \sqrt{q_c q_2} \mathbf{h}_c \mathbf{h}_2^+ + r_{c2} \sqrt{q_c q_2} \mathbf{h}_2 \mathbf{h}_c^+ = r_{c2} \sqrt{q_c q_2} (\mathbf{h}_c \mathbf{h}_2^+ + \mathbf{h}_2 \mathbf{h}_c^+)$ — матрица взаимной корреляции сигнала и второй помехи. В (2) учтён порядок перемножения фазоров [6] сигнала $\mathbf{h}_c$ и помех $\mathbf{h}_i$ в корреляционной матрице принимаемых векторов комплексного вида. Значения коэффициентов взаимной корреляции попарно равны, а именно: $r_{c1} = r_{1c}$, $r_{c2} = r_{2c}$, $r_{12} = r_{21}$.

Из выражения (2) следует, что матрица помех, состоящая из суммы матриц $\mathbf{R}_{\text{нкп}}$, $\mathbf{R}_{\text{кп}}$ и $\mathbf{R}_{\text{ксп}}$, изменяет своё значение в каждой из задач а), б) и в), т. к. в рассматриваемых случаях а) $\mathbf{R}_{\text{кп}} = \mathbf{R}_{\text{ксп}} = 0$; б) $\mathbf{R}_{\text{кп}} = 0$; $\mathbf{R}_{\text{ксп}} \neq 0$; в) $\mathbf{R}_{\text{ксп}} = 0$, $\mathbf{R}_{\text{кп}} \neq 0$.

На рис. 1 представлена структурная схема антенной решётки с адаптацией по критерию МСКО, где введены следующие обозначения: $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_l, \dots, w_L)^T$ — вектор весовых коэффициентов, индекс «Т» обозначает транспонирование, $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_l, \dots, z_L)^T$ — вектор напряжений на выходах элементов решётки, $\xi(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{z}$ — напряжение на выходе сумматора решётки, $d(t)$ — эталонный сигнал; $\varepsilon(t) = [d(t) - \xi(t)]$ — разность эталонного и выходного сигналов, $\mathbf{w}_{\text{опт}}$ — оптимальный вектор весовых коэффициентов.

В качестве эталона $d(t)$ обычно принимается полная копия полезного сигнала [5].

Оптимальная пространственная селекция помех в рассматриваемой адаптивной антенной решётки (рис. 1) осуществляется по критерию МСКО, согласно которому вычисляется оптимальный вектор весовых коэффициентов $\mathbf{w}_{\text{опт}}$ по формуле [2, 3]

$$\mathbf{w}_{\text{опт}} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{R}_d. \quad (3)$$

Составляющие корреляционного вектора $\mathbf{R}_d$ в (3) представляют собой значения взаимной корреляционной функции вектора напряжений $\mathbf{z}$ на выходах элементов антенной решётки и скалярного эталонного сигнала $d(t)$ [3, 5]:

$$\mathbf{R}_d = \langle \mathbf{z} d(t) \rangle. \quad (4)$$

Если сигнал не коррелирован с помехами, то формула (4) принимает вид

$$\mathbf{R}_d = q_c \mathbf{h}_c. \quad (5)$$

При взаимной коррелированности сигнала и второй помехи модель корреляционного вектора $\mathbf{R}_d$ (5) усложняется и содержит вектор значений их взаимной корреляционной функции:

$$\mathbf{R}_d = q_c \mathbf{h}_c + r_{c2} \sqrt{q_c q_2} \mathbf{h}_2. \quad (6)$$

В данной статье при определении уровней сигнала и помех на входе и выходе адаптивной антенной решётки принимается правило, согласно которому объединённой помехой считается все, что не относится к сигналу. Корреляционную составляющую суммарной мощности помех будем называть корреляционной помехой. Таким образом, к мощности воздействующих на решётку некоррелированных помех дополнительно добавляется часть мощности взаимно коррелированных и/или коррелированных с сигналом помех.

В соответствии с выбранной выше моделью сигнально-помеховой обстановки вычисление уровней сигнала и помех проводилось по следующим формулам: уровень сигнала на входе решётки $q_{c \text{ вх}} = q_c$, уровень сигнала на выходе [3] $q_{c \text{ вых}} = \mathbf{w}_{\text{опт}}^+ \mathbf{R}_c \mathbf{w}_{\text{опт}}$.

В общем виде модель взаимной коррелированности полезного сигнала и двух помех на входе решётки, следуя работам [6, 10], представим следующей матрицей:

$$\mathbf{R}_{z\Pi} = \begin{pmatrix} q_c & r_{c1} \sqrt{q_c q_1} & r_{c2} \sqrt{q_c q_2} \\ r_{1c} \sqrt{q_c q_1} & q_1 & r_{12} \sqrt{q_1 q_2} \\ r_{2c} \sqrt{q_c q_2} & r_{21} \sqrt{q_1 q_2} & q_2 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

В случае варианта б), когда сигнал и вторая помеха коррелированы, но не коррелированы с первой помехой, взаимная корреляционная матрица (7) сигнала и помехи принимает следующий вид:

$$\mathbf{R}_{z\Pi} = \begin{pmatrix} q_c & 0 & r \sqrt{q_c q_{\Pi 2}} \\ 0 & q_{\Pi 1} & 0 \\ r \sqrt{q_c q_{\Pi 2}} & 0 & q_{\Pi 2} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где r — коэффициент взаимной корреляции.

В случае варианта в), когда первая и вторая помехи коррелированы, но не коррелированы с сигналом, взаимная корреляционная матрица (7) сигнала и помех равна

$$\mathbf{R}_{z\Pi} = \begin{pmatrix} q_c & 0 & 0 \\ 0 & q_{\Pi 1} & r \sqrt{q_{\Pi 1} q_{\Pi 2}} \\ 0 & r \sqrt{q_{\Pi 1} q_{\Pi 2}} & q_{\Pi 2} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

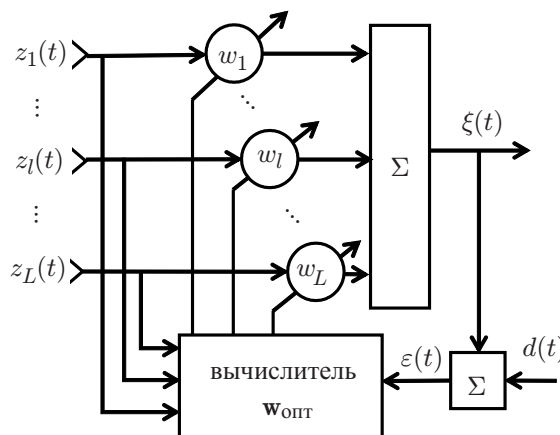


Рис. 1. Структурная схема антенной решётки с адаптацией по критерию МСКО

С учётом формул (8) и (9) суммарный уровень помех $q_{\text{пвх}}$ на входе антенной решётки принимает следующие значения:

1) в случае б) при взаимной корреляции сигнала и второй помехи

$$q_{\text{пвх}} = q_1 + q_2 + 2r_{c2}\sqrt{q_c q_2} + q_{\text{ш}} = q_1 + q_2 + 2r_{c2}\sqrt{q_c q_2} + 1, \quad (10)$$

2) в случае в) при взаимной корреляции первой и второй помех

$$q_{\text{пвх}} = q_1 + q_2 + 2r_{12}\sqrt{q_1 q_2} + q_{\text{ш}} = q_1 + q_2 + 2r_{12}\sqrt{q_1 q_2} + 1. \quad (11)$$

Суммарный уровень помех на выходе решётки $q_{\text{пвых}} = \mathbf{w}_{\text{опт}}^+(\mathbf{R}_{\text{нкп}} + \mathbf{R}_{\text{кп}} + \mathbf{R}_{\text{ксп}})\mathbf{w}_{\text{опт}}$.

Диаграмма направленности антенной решётки описывается формулой [3, 5] $f(\theta) = \mathbf{w}_{\text{опт}}^+ \mathbf{h}(\theta)$, где $\mathbf{h}(\theta)$ — фазор задания направления для построения диаграммы направленности.

Вариант а) является частным случаем вариантов б) и в) при коэффициенте корреляции $r = 0$, на рисунках он представлен отдельной кривой и показывает характеристики антенной решётки при отсутствии корреляции между сигналом и помехами.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При моделировании рассматривается ситуация, когда на антенную решётку одновременно воздействуют сигнал и две помехи. Сигнал приходит перпендикулярно линии расположения элементов решётки. Направление прихода второй помехи задано и фиксировано. Направление прихода первой помехи изменяется в области верхней полусферы, т. е. $\theta_1 = [-90^\circ, 90^\circ]$.

Программа исследований предполагает анализ следующих характеристик антенной решётки для вариантов а), б), в):

- 1) динамики изменения диаграммы направленности неоптимизированной и оптимизированной решётки от угла прихода помех и величины коэффициента взаимной корреляции r ;
- 2) зависимости отношения $C/(П+Ш)$ $K_{(с/п)_{\text{вых}}} = q_{с\text{вых}}/q_{п\text{вых}}$ на выходе решётки с оптимизированным вектором весовых коэффициентов от угла прихода первой помехи;
- 3) зависимости отношения $C/(П+Ш)$ $K_{(с/п)_{\text{вых}}}$ на выходе антенной решётки от величины коэффициента взаимной корреляции r .

Условия проведения и исходные данные численного моделирования следующие: число элементов эквидистантной антенной решётки $L = 5$, расстояние между соседними элементами $d = \lambda/2$, уровни сигнала, первой и второй помех на входе решётки $q_{с\text{вх}} = 100$, $q_{1\text{вх}} = q_{2\text{вх}} = 500$ соответственно. При численном моделировании изменялись углы прихода помех и коэффициент корреляции r между помехами или помехой и сигналом. Угол прихода сигнала θ_c принят равным нулю. Угол прихода первой помехи θ_1 является переменной величиной, изменяющейся в пределах $[-90^\circ, 90^\circ]$ относительно нормали к линии решётки. Угол прихода второй помехи θ_2 принимал фиксированные значения -8° , -16° и 35° , первое и второе направления попадают в основной лепесток диаграммы направленности, а последнее — соответствует максимуму первого бокового лепестка стандартной антенной решётки (неоптимизированной с простым суммированием). Коэффициент взаимной корреляции r сигнала и помех изменялся в диапазоне $[0, 1]$.

Сначала рассмотрим вид диаграммы направленности антенной решётки (рис. 2), который определяется значениями вектора весовых коэффициентов $\mathbf{w}_{\text{опт}}$ (3). Назовём квазинормированной диаграмму направленности решётки, нормированную относительно максимума диаграммы направленности стандартной антенной решётки. Использование такой характеристики позволяет наглядно увидеть преимущества оптимизированной антенной решётки перед стандартной и проанализировать изменение уровня максимума диаграммы направленности оптимизированной антенной решётки при увеличении коэффициента корреляции r между сигналом и помехой.

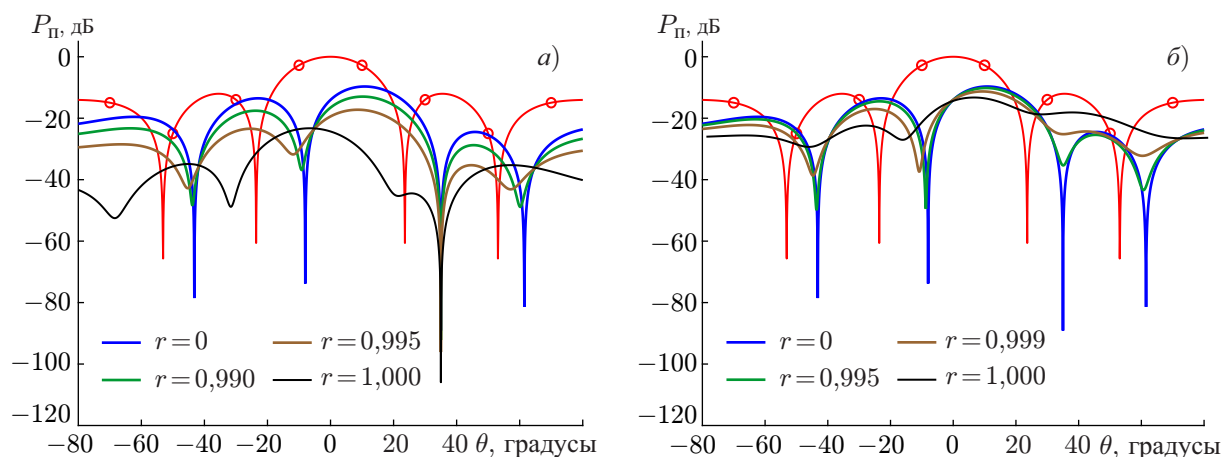


Рис. 2. Квазинормированное значение множителя P_n (диаграмма направленности) неоптимизированной (красные кривые) и оптимизированной антенной решётки в логарифмическом масштабе для заданных значений коэффициента корреляции r (указаны на рисунке) между сигналом и 2-й помехой (а) и между 1-й и 2-й помехами (б)

При анализе поведения диаграммы направленности адаптивной антенной решётки по графикам рис. 2 выделим последовательно два указанных выше варианта: вариант б) взаимной корреляции сигнала со второй помехой и вариант в) взаимной корреляции 1-й и 2-й помех. Графики построены при заданных значениях коэффициента взаимной корреляции r , которые не совпадают для рассматриваемых видов корреляции сигнала и помех. Это объясняется тем, что для наглядности графиков величины коэффициентов взаимной корреляции сигнала и помех выбраны в соответствии с пороговыми значениями, при которых происходит резкое изменение исследуемых характеристик решётки. Следует отметить, что на практике такие большие значения коэффициента корреляции r могут соответствовать применению ретранслированных или имитационных помех, наиболее опасных и актуальных в настоящее время [10].

В данном пункте исследований углы прихода первой и второй помех фиксированы. При этом угол прихода $\theta_1 = 35^\circ$ первой помехи совпадает с положением максимума первого бокового лепестка диаграммы направленности стандартной антенной решётки. Вторая помеха с $\theta_2 = -8^\circ$ попадает в главный лепесток вблизи его максимума. В направлениях прихода помех формируются провалы («нули») диаграммы направленности адаптивной антенной решётки.

На рис. 2а приведены квазинормированные диаграммы направленности в логарифмическом масштабе при наличии корреляции между сигналом и 2-й помехой. В этом случае вид диаграммы направленности и глубина «нулей» ($-72,8$ дБ) в направлении коррелированной с сигналом второй помехи $\theta_2 = -8^\circ$ практически не зависят от величины коэффициента корреляции в диапазоне $[0,0; 0,9]$, и лишь при значении r , близком к 1, глубина «нулей» резко уменьшается до значения $-23,3$ дБ. Из графиков рис. 2а видно, что изменение коэффициента корреляции r практически не сказывается на форме диаграммы направленности и глубине «нуля» в области бокового лепестка, где воздействует некоррелированная с сигналом помеха. Глубина «нуля» в направлении некоррелированной помехи $\theta_1 = 35^\circ$ не варьируется и имеет величину -105 дБ во всём диапазоне значений коэффициента корреляции r .

На графиках рис. 2б, соответствующих варианту в), уменьшение глубины «нулей» диаграммы направленности адаптивной антенной решётки, в отличие от графиков на рис. 2а, при увеличении коэффициента корреляции r имеет место в направлении обеих помех и выражено в большей мере.

При увеличении коэффициента корреляции r на рис. 2а и б отмечается уменьшение уровня максимума диаграммы направленности адаптивной антенной решётки относительно диаграммы

направленности стандартной решётки, что следует учитывать при энергетическом расчёте радиолинии, включающей оптимальный пространственный фильтр.

Графики рис. 3а иллюстрируют для варианта б) изменение отношения $C/(П+Ш)$ на выходе стандартной антенной решётки в зависимости от значений коэффициента взаимной корреляции сигнала и второй помехи при сканировании первой помехи в диапазоне заданных углов $\theta_1 = [-80^\circ, 80^\circ]$. Вторая помеха приходит с фиксированного направления $\theta_2 = -8^\circ$. Видно, что резкое уменьшение отношения $C/(П+Ш)$ наблюдается уже при малых величинах коэффициента корреляции и характеризует низкую помехоустойчивость неоптимизированного пространственного фильтра по отношению к коррелированным помехам. Во всех точках графиков отношение $C/(П+Ш)$ меньше 0,3. Наиболее глубокое падение наблюдается при прохождении первой помехой зоны главного лепестка диаграммы направленности.

На рис. 3б и 4а, б представлены в логарифмическом масштабе графики изменения отношения $C/(П+Ш)$ на выходе адаптивной антенной решётки с оптимальным вектором весовых коэффициентов для варианта б) при разных заданных значениях коэффициента взаимной корреляции r сигнала и второй помехи. Единственным параметром, который отличает эти рисунки, является угол прихода второй помехи: на рис. 3б и 4а вторая помеха при $\theta_2 = -8^\circ$ и -16° попадает в главный лепесток диаграммы направленности стандартной решётки, а на рис. 4б при $\theta_2 = -35^\circ$ она располагается в максимуме первого бокового лепестка. Значения коэффициента корреляции показаны на графиках.

Анализ результатов моделирования, представленных на графиках рис. 3 и 4, позволяет сделать следующие выводы.

1) Максимальную величину отношение $C/(П+Ш)$ на выходе оптимизированной антенной решётки имеет в отсутствие взаимной корреляции (графики при $r = 0$) и когда сканирующая помеха находится в области боковых лепестков. Минимальное значение отношения $C/(П+Ш)$ имеет место при совпадении углов прихода первой помехи и сигнала, вследствие отсутствия подавления помех в области главного лепестка диаграммы направленности.

2) При нахождении первой помехи в области боковых лепестков диаграммы направленности отношение $C/(П+Ш)$ на выходе оптимизированной антенной решётки, как и ожидалось, имеет практически постоянную величину. Локальный максимум отношения $C/(П+Ш)$ отвечает совпадению углов прихода обеих помех и сложению их мощностей с учётом наличия корреляционной составляющей.

3) Ширина провала в области главного лепестка диаграммы направленности, которая характеризует диапазон углов наибольшего воздействия помехи, на графиках больше при меньшем различии между углами прихода второй (коррелированной с сигналом) помехи и сигнала.

4) При выбранных условиях моделирования коэффициент корреляции $r = 0,5$ является критичным, т. к. $C/(П+Ш)$ на выходе оптимизированной антенной решётки становится близким единице, а при $r > 0,5$ наблюдается его резкое уменьшение на несколько порядков, что равносильно полной потере эффективности.

На следующем шаге исследований для случая в) проведём анализ зависимости отношения $C/(П+Ш)$ на выходе антенной решётки с оптимальным вектором весовых коэффициентов (рис. 5) от значений коэффициента взаимной корреляции r первой и второй помех для двух разных углов прихода 2-й помехи: $\theta_2 = -8^\circ$ и $\theta_2 = 35^\circ$.

Вид графиков на рисунке позволяет сделать следующие выводы.

1) Чем ближе угол прихода второй помехи к углу прихода сигнала, тем, как и ожидалось, меньше отношение $C/(П+Ш)$ при нахождении первой помехи в области боковых лепестков диаграммы направленности. Максимальное подавление помех и максимальное отношение $C/(П+Ш)$ имеет место при совпадении углов прихода обеих помех.

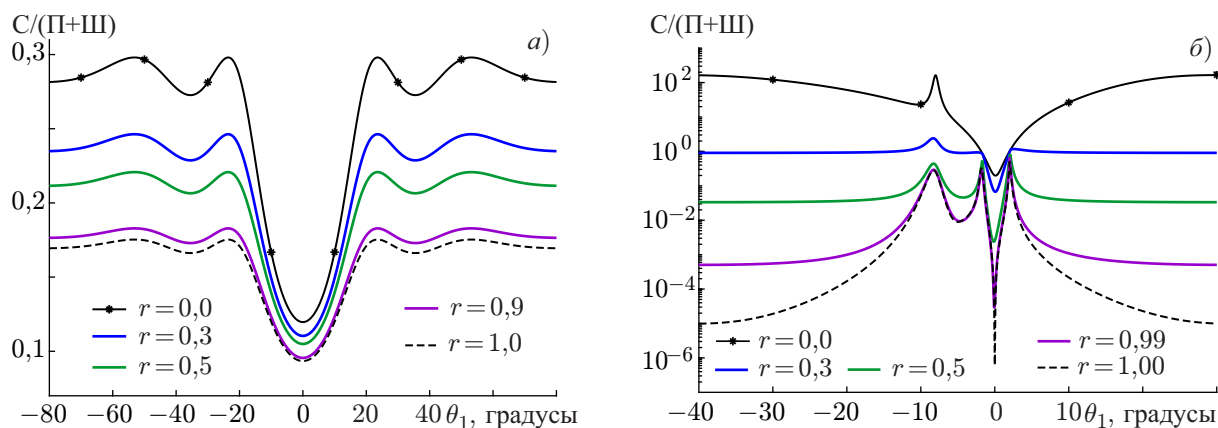


Рис. 3. Отношение $C/(\Pi+\text{Ш})$ при различных значениях коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой при $\theta_2 = -8^\circ$ на выходе стандартной (а) и оптимизированной (б) антенной решётки

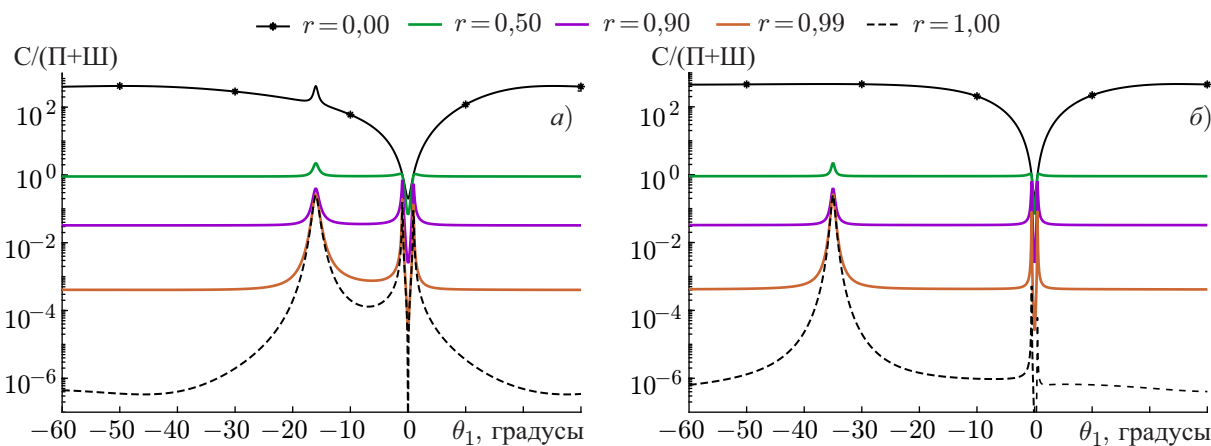


Рис. 4. Отношение $C/(\Pi+\text{Ш})$ на выходе оптимизированной антенной решётки при различных значениях коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой при $\theta_2 = -16^\circ$ (а) и при $\theta_2 = -35^\circ$ (б)

2) Ширина провала с уменьшением отношения $C/(\Pi+\text{Ш})$ в максимуме диаграммы направленности больше при меньшем различии между углами прихода второй помехи и сигнала.

3) При величинах коэффициента корреляции $r < 0,90$ уменьшение выходного отношения $C/(\Pi+\text{Ш})$ в области боковых лепестков, невелико, однако при значениях $r > 0,95$ наблюдается его резкое падение. Динамика изменения $C/(\Pi+\text{Ш})$ в этом диапазоне значений существенно отличается от той, которая наблюдается в условиях корреляции сигнала и второй помехи.

Рассмотрим зависимость динамики изменения отношения $C/(\Pi+\text{Ш})$ на входе и выходе оптимизированной антенной решётки от наличия взаимной корреляции сигнала и помех.

На рис. 6а приведены зависимости изменения отношения $C/(\Pi+\text{Ш})$ на входе антенной решётки от коэффициента r для двух видов корреляции сигнала и помех. Графики показывают, что при взаимной корреляции помех (случай в) входное отношение $C/(\Pi+\text{Ш})$ меньше, чем при коррелированности второй помехи с сигналом (случай б). При одинаковых величинах уровней сигнала и помех обе кривые совпадают.

На рис. 6б приведены графики зависимости отношения $C/(\Pi+\text{Ш})$ на выходе оптимального пространственного фильтра при фиксированных углах прихода обеих помех, $\theta_1 = 35^\circ$ и $\theta_2 = -8^\circ$.

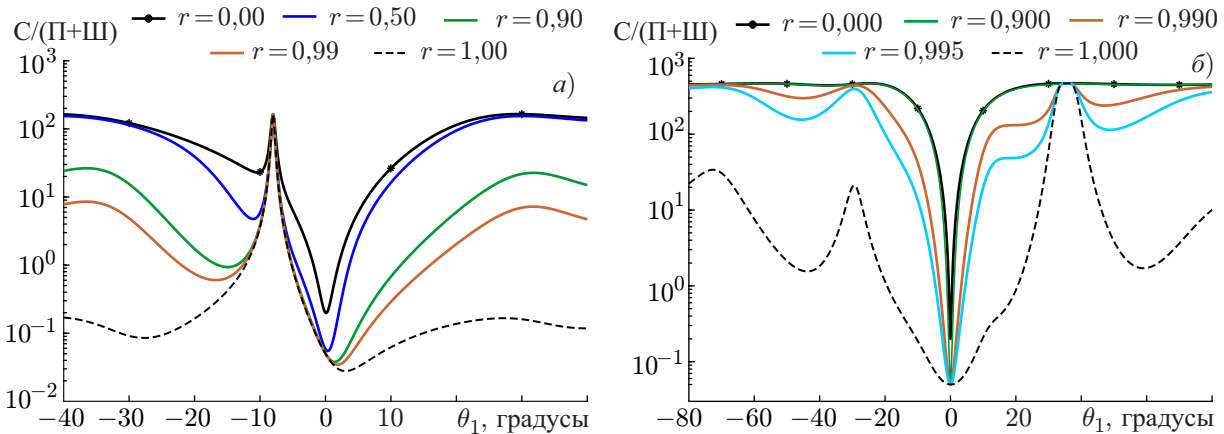


Рис. 5. Отношение $C/(\Pi+\text{Ш})$ при различных значениях коэффициента корреляции r между 1-й и 2-й помехами на выходе оптимизированной антенной решётки при воздействии 2-й помехи с угла $\theta_2 = -8^\circ$ (а) и $\theta_2 = -35^\circ$ (б)

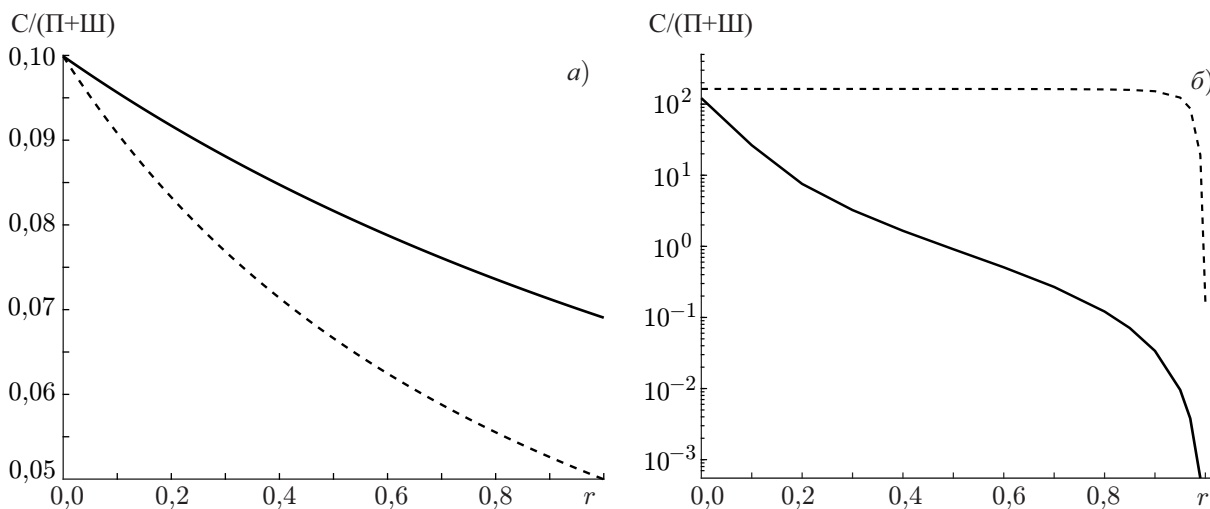


Рис. 6. Динамика изменения отношения $C/(\Pi+\text{Ш})$ при $\theta_1 = 35^\circ$ и $\theta_2 = -8^\circ$ в зависимости от значения коэффициента корреляции r на входе (а) и на выходе (б) оптимизированной антенной решётки. Сплошные кривые соответствуют корреляции сигнала со 2-й помехой, штриховые кривые — корреляции помех между собой

Динамика изменения кривых сильно отличается для разных видов корреляции сигнала и помех. Как следует из рисунка, взаимная корреляция первой и второй помех при $r < 0,9$ мало влияет на величину отношения $C/(\Pi+\text{Ш})$ на выходе антенной решётки в области боковых лепестков диаграммы направленности, а при $r > 0,95$ её влияние резко увеличивается. При значении r , близком к 1, это отношение становится существенно меньше единицы, т.е. подавления помех не наблюдается.

Сплошная кривая на рис. 6б показывает, что при взаимной коррелированности сигнала с помехой уменьшение отношения $C/(\Pi+\text{Ш})$ происходит уже при малых величинах коэффициента корреляции r . Значение коэффициента корреляции $r = 0,5$ является пороговым ($C/(\Pi+\text{Ш}) = 1$) и приводит к недопустимому снижению эффективности, т.к. при $r > 0,5$ отношение $C/(\Pi+\text{Ш})$ на выходе решётки становится меньше, чем на входе, т.е. она перестаёт усиливать полезный сигнал.

Графики изменения коэффициента подавления помехи на выходе антенной решётки

$K_{(с/п)_{\text{ВЫХ}}/\text{ВХ}}$ отдельно не приводятся. Его значение легко определить, поделив отношение $C/(П+Ш)$ на выходе решётки на отношение $C/(П+Ш)$ на входе. Моделирование показывает, что динамика изменения коэффициента подавления совпадает с видом графиков на рис. 6б. Для случая коррелированности сигнала и помехи значение коэффициента подавления $K_{(с/п)_{\text{ВЫХ}}/\text{ВХ}} = 1216$ при $r = 0$ и $K_{(с/п)_{\text{ВЫХ}}/\text{ВХ}} = 0$ при $r = 1$. Для случая взаимно коррелированных помех коэффициент подавления $K_{(с/п)_{\text{ВЫХ}}/\text{ВХ}} = 1637$ при $r = 0$ и $K_{(с/п)_{\text{ВЫХ}}/\text{ВХ}} = 3,3$ при $r = 1$. Таким образом, при малых коэффициентах корреляции взаимная коррелированность помехи с сигналом сильнее ухудшает эффективность фильтра, чем взаимная коррелированность помех. При воздействии взаимно коррелированных помех эффективность оптимального пространственного фильтра резко падает только при $r > 0,99$. Такая двойная помеха может быть названа объёмной.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Взаимная коррелированность между сигналом и одной помехой, а также между двумя помехами существенно влияет на характеристики оптимального пространственного фильтра, уменьшая степень подавления помех и изменяя вид диаграммы направленности. Однако характер этого влияния существенно различен.

2. При взаимной коррелированности между сигналом и одной помехой сильное влияние проявляется уже при малых значениях коэффициента корреляции r . При взаимной коррелированности только помех малые значения коэффициента корреляции практически не значимы и корреляция становится существенно значимой лишь при r , близком к 1.

3. Взаимная коррелированность между сигналом и помехой или между двумя помехами приводит к изменению вида корреляционной матрицы принимаемых сигналов и помех на выходах элементов антенной решётки. На входе и на выходе устройства пространственного фильтра появляется дополнительная помеховая составляющая, названная в статье корреляционной помехой. При этом суммарная мощность взаимно коррелированных и/или коррелированных с сигналом помех оказывается больше, чем простая сумма мощностей воздействующих на решётку некоррелированных помех.

4. Компьютерное моделирование позволило качественно и количественно оценить при каких условиях оптимальный пространственный фильтр теряет свои свойства селекции и в какой степени.

5. При взаимной коррелированности между сигналом и помехой, даже при расположении обеих помех в области боковых лепестков диаграммы направленности, увеличение коэффициента взаимной корреляции до значений, превышающих $0,2 \div 0,3$, приводит к уменьшению отношения $C/(П+Ш)$ на $2 \div 3$ порядка уже при числе элементов решётки $L = 5$, чего в случае взаимной коррелированности помех не наблюдается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукьянчиков А. И., Гарманов С. С., Моисеев А. П. // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 12 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/12/74815> (дата обращения: 11.01.2018).
2. Godara L. C. Smart antennas. Boca Raton: CRC Press, 2004. 472 p.
3. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решётки: Введение в теорию. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
4. Попов А. С. // Приборостроение. 2017. № 1. С. 39.

5. Попов А. С., Пименов В. Ф. // Тр. Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. 2019. Вып. 666. С. 77.
6. Пистолькорс А. А., Литвинов О. С. Введение в теорию адаптивных антенн. М.: Наука, 1991. 200 с.
7. Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 528 с.
8. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Вып. 2. М.: Мир, 1971. 317 с.
9. Гершман А. Б., Ермолаев В. Т. // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31, № 10. С. 1236.
10. Агиевич С. Н., Луценко С. А. // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 12. С. 411.

Поступила в редакцию 16 апреля 2019 г.; принята в печать 27 сентября 2019 г.

**SIMULATION OF THE PROPERTIES OF AN ANTENNA ARRAY
WHICH IS OPTIMAL BY THE CRITERION OF MINIMUM STANDARD
DEVIATION IN THE CASE OF MUTUAL CORRELATION
OF SIGNAL AND NOISE**

A. S. Popov and V. F. Pimenov

We present the results of numerical simulation and comparison of characteristics of optimal spatial selection of a signal and two correlated interferences in a linear equidistant antenna array which is optimal by the criterion of minimum standard deviation. New properties of an optimal spatial filter are revealed, namely, an additional correlation component of the interference sum at its input and output; the character of the dependence of its efficiency index on the scanning angle of the first interference; substantial differences of the forms of its efficiency curves for various correlation relationships between signal and interference. The dynamics of variation in the signal-to-noise ratio at the output of an optimized antenna array as a function of the correlation-coefficient value is analyzed. The types of the directivity-diagram distortions are shown. The parameters of the signal-interference environment leading to an inadmissible decrease in the spatial-filter efficiency are revealed.