

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 621.391  
DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-1-39-44

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ ПОМЕХ ПРИ РАЗНЕСЕННОМ ПРИЕМЕ СИГНАЛОВ

А. С. ПОПОВ

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: arahar@mail.ru*

Рассматривается применение антенной решетки с оптимизируемым вектором весовых коэффициентов для подавления внешних помех при разнесенном приеме сигналов в радиоканале связи с замираниями.

**Ключевые слова:** канал связи с замираниями, разнесенный прием, компенсация помех в антенной решетке, алгоритм Хоуэллса — Эпплбаума

Наличие даже одной незамирающей помехи в радиоканале с замираниями сигналов приводит к существенному снижению вероятности правильного приема сообщения вплоть до полного нарушения связи [1, 2]. Поэтому защита от помех в канале с замираниями имеет большое значение для обеспечения безобрывной передачи сообщения [3]. Стандартный способ разнесенного приема для ослабления влияния замираний может быть дополнен процедурой оптимальной пространственной обработки с использованием антенных решеток (АР), осуществляющих пространственную селекцию в каждой ветви разнесения.

Структурная схема устройства сложения сигналов с оптимальной пространственной селекцией приведена на рис. 1, где АР — антенная решетка, состоящая из  $L$  элементов, УПС — устройство пространственной селекции,  $\Sigma$  — суммирующее устройство. В сумматоре осуществляется линейное или оптимальное сложение замирающих сигналов с выходов УПС1 и УПС2 с остаточными помехами [1, 2]. Таким образом, реализуется пространственно разнесенный прием сигналов с замираниями при подавлении внешних помех.

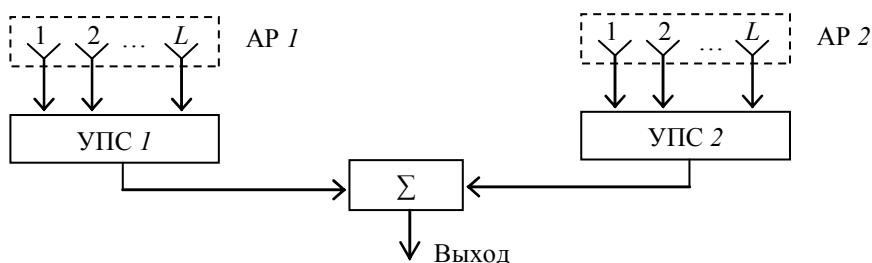


Рис. 1

В качестве устройства пространственной селекции целесообразно применить антенную решетку с оптимизацией вектора весовых коэффициентов по схеме Хоуэллса — Эпплбаума [4, 5]. Структурная схема УПС представлена на рис. 2, где БПФ — блок предварительной фильтрации, БВК — блок вычисления оптимальных весовых коэффициентов, БВС — блок

взвешенного суммирования,  $\Sigma_1$  — основной сумматор,  $\Sigma_2$  — вычитающий блок, „+“ — знак эрмитова сопряжения,  $y$  — напряжение на выходе сумматора  $\Sigma_1$ ,  $z$  — выходное напряжение УПС.

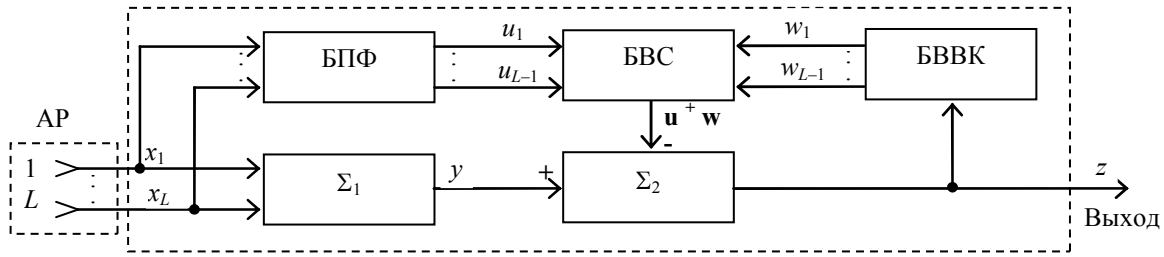


Рис. 2

На рис. 2 приняты следующие обозначения переменных величин:  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_L)^T$  — вектор-столбец напряжений на выходах элементов АР,  $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_{L-1})^T$  — вектор-столбец напряжений с выхода БПФ,  $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_{L-1})^T$  — вектор-столбец значений весовых коэффициентов,  $\mathbf{w}_{\text{opt}}$  — оптимальное значение вектора весовых коэффициентов (ВБК);

Операция, осуществляемая в блоке БПФ, описывается матричным оператором  $\mathbf{A}$ , имеющим следующий вид [3]:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & -1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix}_{(L-1) \times L}. \quad (1)$$

Тогда в соответствии со схемой УПС (см. рис. 2) имеет место соотношение

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{x}. \quad (2)$$

Общим критерием оптимальности БВБК, который строится на основании выбора различных процедур, является обеспечение минимума среднего уровня выходного сигнала  $z$  при сохранении защиты главного лепестка диаграммы направленности (ДН) в направлении полезного сигнала [4—11]. Признаком помехи (помех) является ее отклонение по углу прихода от направления на сигнал.

В настоящей статье на основе разработанных алгоритма вычислений и компьютерной программы исследуются пространственно-селективные характеристики УПС при наличии помех в применении к разнесенному приему сигналов в канале с замираниями.

Рассмотрим эквидистантную АР с линейным расположением приемных элементов. В отсутствие дополнительных фазовращателей направлением защиты главного лепестка ДН является перпендикуляр к линии расположения элементов АР. Для вывода формул дополнительно введем следующие обозначения:  $1, 2, \dots, l, \dots, L$  — номера антенных элементов АР;  $\theta_c, \theta_{\text{п}}$  — углы прихода сигнала и помехи соответственно;  $\xi$  — ось расположения элементов АР;  $\eta$  — перпендикуляр к линии расположения элементов АР;  $\Delta = \theta_{\text{п}} - \theta_c$  — разность углов прихода помехи и сигнала;  $d$  — расстояние между соседними элементами АР;  $\varphi_c$  и  $\varphi_{\text{п}}$  — фазовые набеги сигнала и помехи соответственно в  $(l+1)$ -м элементе АР относительно  $l$ -го элемента.

Запишем следующие соотношения:

$$\varphi_c = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_c, \quad \varphi_{\text{п}} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_{\text{п}}.$$

Примем  $P_c, P_{\text{п}}, P_{\text{ш}}$  — мощности сигнала, помехи и шума, приведенные к выходу одного элемента антенной решетки. Тогда относительные уровни сигнала ( $q_c$ ), помехи ( $q_{\text{п}}$ ) и шума ( $q_{\text{ш}}$ ) определяются выражениями

$$q_c = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}}, \quad q_{\text{п}} = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{ш}}}, \quad q_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{ш}}}{P_{\text{ш}}} = 1.$$

Помех может быть несколько. Для примера ограничимся двумя.

Введем следующие обозначения фазовых векторов сигнала и помех —  $\mathbf{h}_c, \mathbf{h}_{\text{п1}}, \mathbf{h}_{\text{п2}}$ :

$$\mathbf{h}_c = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\varphi_c} \\ \dots \\ e^{-jl\varphi_c} \\ \dots \\ e^{-j(L-1)\varphi_c} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{h}_{\text{п1}} = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\varphi_{\text{п1}}} \\ \dots \\ e^{-jl\varphi_{\text{п1}}} \\ \dots \\ e^{-j(L-1)\varphi_{\text{п1}}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{h}_{\text{п2}} = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\varphi_{\text{п2}}} \\ \dots \\ e^{-jl\varphi_{\text{п2}}} \\ \dots \\ e^{-j(L-1)\varphi_{\text{п2}}} \end{bmatrix}.$$

Фазором перпендикуляра к линии расположения элементов АР, при котором  $\theta_{\text{АР}} = 0$ , является вектор  $\mathbf{1} = (1, 1, \dots, 1)^T$ .

Обозначим через  $\mathbf{R}_x = \langle \mathbf{x} \mathbf{x}^+ \rangle$  автокорреляционную матрицу вектора  $\mathbf{x}$ .

Сигнал  $z$  на выходе УПС (см. рис. 2) определяется по формуле

$$z = y - \mathbf{u}^+ \cdot \mathbf{w}_u = \mathbf{x}^+ \cdot \mathbf{1} - \mathbf{u}^+ \cdot \mathbf{w}_u. \quad (3)$$

Вектор напряжений  $\mathbf{x}$  представляет собой аддитивную смесь векторов сигнала  $\mathbf{S}$ , помех  $\mathbf{H}_n$  и шума  $\mathbf{B}$  и характеризуется следующим выражением:

$$\mathbf{x} = \mathbf{S} + \sum_{n=1}^N \mathbf{H}_n + \mathbf{B},$$

где  $N$  — число помех, а символом  $\mathbf{B}$  обозначен вектор напряжений независимых белых шумов, приведенных к выходам элементов АР, т.е.

$$\mathbf{B} = (B_1, B_2, \dots, B_L)^T.$$

Вся информация о сигнально-помеховой обстановке на выходах элементов АР содержится в автокорреляционной матрице  $\mathbf{R}_x$ , определяемой с учетом принятых обозначений и допущений по формуле

$$\mathbf{R}_x = q_c \mathbf{h}_c \mathbf{h}_c^+ + \left( \sum_{n=1}^N q_{\text{п}n} \mathbf{h}_{\text{п}n} \mathbf{h}_{\text{п}n}^+ + \mathbf{I} \right),$$

где  $\mathbf{I}$  — матрица с единицами по главной диагонали.

Корреляционная матрица вектора  $\mathbf{u}$  с учетом выражений (1) и (2) определяется как

$$\mathbf{R}_u = \mathbf{A} \mathbf{R}_x \mathbf{A}^T.$$

Известно, что оптимальное значение вектора весовых коэффициентов  $\mathbf{w}_{\text{уopt}}$  с учетом защиты главного лепестка ДН находится по формуле [4]

$$\mathbf{w}_{\text{уopt}} = (\mathbf{A} \mathbf{R}_x \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A} \mathbf{R}_x \mathbf{1}.$$

Мощность суммарного сигнала  $z$  на выходе УПС по определению равна  $P_z = \langle \mathbf{z}^* \mathbf{z} \rangle$ . Тогда, учитывая выражение (3), получаем

$$P_z = \left\langle \left( \mathbf{x}^+ \mathbf{1} - \mathbf{u}^+ \mathbf{w}_u \right)^+ \left( \mathbf{x}^+ \mathbf{1} - \mathbf{u}^+ \mathbf{w}_u \right) \right\rangle = \mathbf{1}^+ \mathbf{R}_x \mathbf{1} - \mathbf{w}_u^+ \mathbf{A} \mathbf{R}_x \mathbf{1} - \mathbf{1}^+ \mathbf{R}_x \mathbf{A}^T \mathbf{w}_u + \mathbf{w}_u^+ \mathbf{A} \mathbf{R}_x \mathbf{A}^T \mathbf{w}_u, \quad (4)$$

$$\mathbf{w}_{u\text{opt}} = \mathbf{R}_u^{-1} \mathbf{A} \mathbf{R}_x \mathbf{1}.$$

Для вычислительного эксперимента уровень выходной мощности целесообразно представить нормированным к максимальному уровню полезного сигнала, равному  $P_{\text{сmax}} = Lq_c$ , при этом  $P_z / Lq_c = E_z$ .

В соответствии с выражением (4) в среде MatLab была составлена программа вычислений при разных значениях  $q_c, q_{\text{п1}}, q_{\text{п2}}, \theta_{\text{п}}$ , а также различном числе элементов АР. На рис. 3 представлены результаты вычислительного моделирования в виде графиков зависимости  $E_z(\theta_{\text{АР}})$  и диаграммы направленности АР (кривые 1 и 2 соответственно) при следующих условиях [13, 14]:

$$\theta_c = 0; \theta_{\text{п1}} = -20^\circ; \theta_{\text{п2}} = 15^\circ; q_c = 100; q_{\text{п1}} = 200; q_{\text{п2}} = 50; L = 10, d = 5 \text{ см}, \lambda = 10 \text{ см}.$$

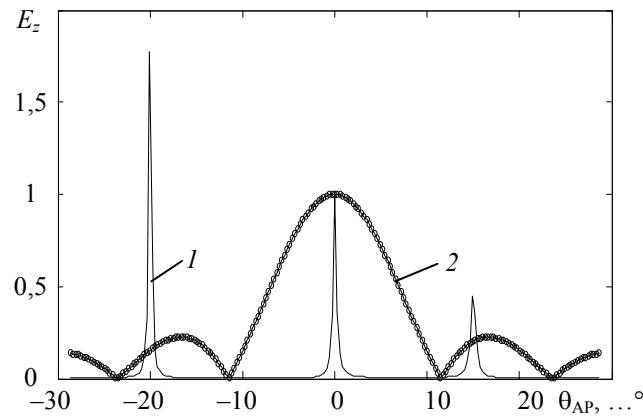


Рис. 3

Как видно из рис. 3, на вход АР воздействуют сигнал и две помехи с относительными уровнями  $q_{\text{с отн}} = 1; q_{\text{п1 отн}} = 2; q_{\text{п2 отн}} = 0,5$ . Направления прихода сигнала и помех соответственно —  $0, -20, 15^\circ$ . При сканировании АР по углу  $\theta_{\text{АР}}$  в направлениях прихода сигнала и помех функция  $E_z(\theta_{\text{АР}})$  как диаграмма уровней имеет узкие острые пики. Это показывает, что при выставлении главного лепестка ДН на сигнал требуется высокая точность юстировки АР, что для практики неприемлемо. Для расширения зоны защиты главного лепестка ДН оператор  $\mathbf{A}$  в блоке БПФ можно использовать повторно несколько раз, однако каждое его применение уменьшает степень свободы АР на единицу.

Предлагается новое решение, обеспечивающее применение оператора  $\mathbf{A}$  не более 2 раз, т.е.  $\mathbf{A} = \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_1$ . Для этого во вторую диагональ матрицы  $\mathbf{A}_1$  вводится фазор расширения зоны защиты  $e^{j\Delta\varphi}$ , а во вторую диагональ матрицы  $\mathbf{A}_2$  —  $e^{-j\Delta\varphi}$ , или наоборот. Тогда матрицы  $\mathbf{A}_1$  и  $\mathbf{A}_2$  приобретают следующий вид:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & -e^{j\Delta\varphi} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -e^{j\Delta\varphi} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -e^{j\Delta\varphi} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 1 & -e^{j\Delta\varphi} \end{bmatrix}_{(L-1) \times L},$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & -e^{-j\Delta\varphi} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -e^{-j\Delta\varphi} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -e^{-j\Delta\varphi} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 1 & -e^{-j\Delta\varphi} \end{bmatrix}_{(L-2) \times (L-2)}$$

Таким образом, обеспечивается требуемая ширина зоны защиты с более плоскими вершинами и более крутыми склонами.

На рис. 4 при тех же условиях получены следующие зависимости: диаграмма направленности АР при оптимальном векторе весовых коэффициентов  $\mathbf{w}_{\text{опт}}$  (кривая 1), диаграмма уровней суммарного сигнала на выходе УПС при расширении зоны защиты главного лепестка ДН (кривая 2), диаграмма уровней выходного сигнала УПС в отсутствие зоны защиты (кривая 3), диаграмма направленности АР при равномерной апертурной функции (кривая 4).

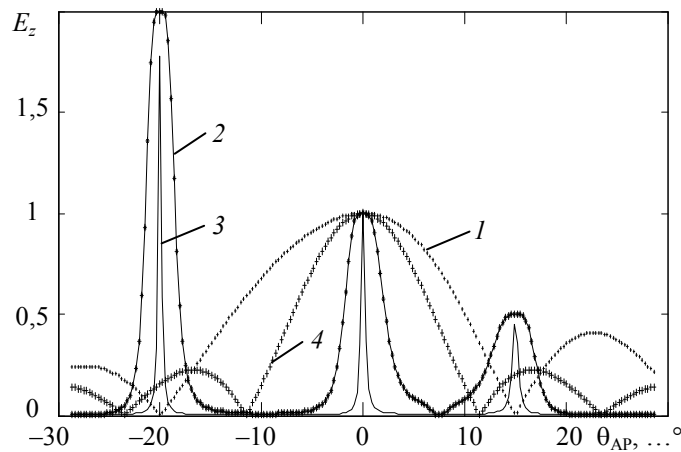


Рис. 4

Диаграмму уровней можно назвать динамической диаграммой направленности АР, показывающей энергетическую составляющую сигнально-помеховой обстановки на выходе элементов АР. Таким образом, предложено решение, обеспечивающее пространственный разнесенный прием сигналов с замираниями при подавлении пространственно сосредоточенных помех на основе применения АР с оптимизируемой ДН и защитой направления прихода полезного сигнала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Сов. радио, 1970. 728 с.
2. Буга Н. Н. Основы теории связи и передачи данных. Л.: ВИКА им. А. Ф. Можайского, 1970. Ч. 2. 707 с.
3. Звонарев В. В., Парамонов И. Ю., Попов А. С. Метод расчета надежности связи при сложении сигналов по редуцированной вероятностной мере в канале с замираниями сигналов // Сб. реф. депонированных рукописей. Сер. Б. М.: ЦВНИ МО РФ, 2013. Вып. 104. 40 с.
4. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. М.: Радио и связь, 1989. 448 с.
5. Applebaum S. P., Chapman D. J. Adaptive arrays with main beam constrains // IEEE Transact. on Antennas and Propagation. 1976. Vol. AP-24, N 5. P. 650—662.
6. Applebaum S. P. Adaptive arrays // IEEE Transact. on Antennas and Propagation. 1976. Vol. AP-24, N 5. P. 585—598.
7. Джунь В. И., Щесняк С. С. Адаптивные антенные системы с подавлением помех по главному лепестку диаграммы направленности // Зарубежная радиоэлектроника. 1988. № 4. С. 3—15.

8. *Vu T. B.* An effective adaptive phased array design // IEEE Transact. on Antennas and Propagation. 1981. Vol. AP-36, N 2. P. 35—40.
9. *Surendra Prasad.* Linear antenna arrays with broad nulls with applications to adaptive arrays // IEEE Transact. on Antennas and Propagation. 1979. Vol. AP-27, N 2. P. 185—190.
10. *Haupt R. L.* Adaptive nulling in monopulse antennas // IEEE Transact. on Antennas and Propagation. 1984. Vol. AP-32, N 5. P. 203—208.
11. *Vu T. B.* Simultaneous nulling in sum and difference patterns by amplitude control // IEEE Transact. on Antennas and Propagation. 1986. Vol. AP-34, N 2. P. 214—218.
12. *Звонарев В. В., Парамонов И. Ю., Попов А. С.* Метод расчета надежности связи в канале с замираниями сигнала по аппроксимирующей (редуцированной) вероятностной мере // Сб. реф. депонированных рукописей. Сер. Б. М.: ЦВНИ МО РФ, 2012. Вып. 99. 31 с.
13. *Звонарев В. В., Парамонов И. Ю., Попов А. С.* Зависимость надежности связи от интервала корреляции замираний в рэлеевском радиоканале // Сб. докл. 21-й Междунар. конф. „Лазеры, измерения, информации“. СПб: СПбГПУ, 2011. С. 279—288.

**Сведения об авторе**

**Александр Сергеевич Попов** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, Военный институт;  
E-mail: arahar@mail.ru

Рекомендована  
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию  
22.06.16 г.

**Ссылка для цитирования:** *Попов А. С.* Пространственная селекция помех при разнесенном приеме сигналов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 1. С. 39—44.

**SPATIAL SELECTION OF INTERFERENCE WITH ANTENNA DIVERSITY SIGNAL RECEIVER**

**A. S. Popov**

*A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia*  
E-mail: arahar@mail.ru

Application of antenna lattice with optimized vector of weight coefficients for external interference suppression with antenna diversity signal receiver in radio-channel with fading is considered.

**Keywords:** communication channel with fading, antenna diversity receiver, interference compensation in antenna lattice, Howells — Applebaum algorithm

**Data on author**

**Alexander S. Popov** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy;  
E-mail: arahar@mail.ru

**For citation:** *Popov A. S.* Spatial selection of interference with antenna diversity signal receiver // Izv. vuzov. Priborostroyeniye. 2017. Vol. 60, N 1. P. 39—44 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-1-39-44