

Восстановление диаграммы направленности цифровой антенной решетки с дефектными элементами

А. А. Монаков[✉], Е. А. Антохин

Институт радиотехники и телекоммуникационных технологий,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

[✉] a_monakov@mail.ru

Аннотация

Введение. Компенсация негативного влияния дефектных элементов цифровых антенных решеток на характеристики диаграммы направленности – одна из основных проблем при создании и эксплуатации подобных систем. В настоящее время предложено большое количество способов решения этой проблемы, основанных на поиске нового амплитудно-фазового распределения в исправных элементах, позволяющего сохранить прежними ширину диаграммы направленности и уровень боковых лепестков антенны. В предлагаемых способах нахождение нового амплитудно-фазового распределения осуществляется поиском в пространстве коэффициентов экстремума функции качества, которая учитывает изменение характеристик диаграммы направленности при появлении дефектных элементов. Для организации поиска используются известные методы оптимизации (метод сопряженных градиентов, метод проекций, генетические алгоритмы и проч.). Реализация данных способов основана на организации итерационных процедур. Это значительно увеличивает время нахождения необходимого решения и нагрузку на сигнальный процессор.

Цель работы. Разработка прямого алгоритма восстановления исходной диаграммы направленности цифровой фазированной антенной решетки при появлении в ее составе дефектных элементов.

Материалы и методы. Описываемый в статье алгоритм восстановления основан на оценке пространственной частоты принятой антенной волны по сигналам в исправных элементах методом наименьших квадратов.

Результаты. Предложен простой, безытерационный алгоритм, позволяющий быстро восстановить значения диаграммы направленности цифровой антенной решетки. Методом компьютерного моделирования показано, что при отношении сигнал/шум 20 дБ в элементах антенной решетки, содержащей 16 элементов, алгоритм восстанавливает коэффициент направленного действия, ширину диаграммы направленности и уровень максимального бокового лепестка с точностью не хуже соответственно 2, 5 и 1 % от значений перечисленных параметров в отсутствие дефектных элементов.

Заключение. Предлагаемый алгоритм восстановления диаграммы направленности цифровой антенной решетки может быть использован в программном обеспечении сигнального процессора, управляющего работой антенной системы, для компенсации влияния дефектных элементов.

Ключевые слова: цифровая фазированная антенная решетка, дефектные антенные элементы, восстановление диаграммы направленности, коэффициент направленного действия, ширина диаграммы направленности, уровень боковых лепестков

Для цитирования: Монаков А. А., Антохин Е. А. Восстановление диаграммы направленности цифровой антенной решетки с дефектными элементами // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 6. С. 45–55.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-6-45-55

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.06.2025; принята к публикации после рецензирования 19.10.2025; опубликована онлайн 29.12.2025



Antenna Pattern Restoration of Digital Antenna Array with Failed Elements

Andrey A. Monakov[✉], Evgeniy A. Antokhin

Institute of Radio Technique and Telecommunication Technologies,
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

[✉] a_monakov@mail.ru

Abstract

Introduction. Compensation for the negative impact of failed elements of digital antenna arrays on the characteristics of the antenna pattern is a key problem in the creation and operation of such systems. A large number of methods have been proposed to date to solve this problem. These are based on the search for a new amplitude–phase distribution in antenna elements, which allows the beamwidth and the side lobe level to remain unchanged. In the proposed methods, a new antenna weighting vector is searched in the weight space for the extremum of a quality function that accounts for the change of the antenna pattern due to failed elements. The search is performed by one of the known optimization methods, such as conjugate gradient, projection, genetic algorithms, etc. These methods implement some iterative search procedures, which significantly increases the time required to find the necessary solution and the load on the signal processor.

Aim. To develop a direct algorithm for restoring the antenna pattern of a digital antenna array in presence of failed elements.

Materials and methods. The developed recovery algorithm is based on the estimation of the spatial frequency of the received wave using signals in antenna elements by the least squares method.

Results. A simple, non-iterative algorithm for timely restoring the antenna pattern of a digital antenna array is proposed. The conducted computer simulation showed that for the signal-to-noise ratio of 20 dB in the antenna elements, the algorithm restores the directivity, antenna beamwidth, and the first side lobe level with an accuracy of no worse than 2, 5, and 1 %, respectively, of the values of these parameters in the absence of failed elements

Conclusion. The proposed algorithm for restoring the antenna pattern of a digital antenna array can be used in software of a signal processor controlling the operation of an antenna system to compensate for the influence of failed elements.

Keywords: digital antenna array, failed antenna elements, antenna pattern restoration, directivity, beam width, side lobe level

For citation: Monakov A. A., Antokhin E. A. Antenna Pattern Restoration of Digital Antenna Array with Failed Elements. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 6, pp. 45–55.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-6-45-55

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 10.06.2025; accepted 19.10.2025; published online 29.12.2025

Введение. Проблема компенсации негативного влияния отказов элементов цифровых фазированных антенных решеток (ЦФАР) на характеристики диаграмм направленности (ДН) актуальна при разработке и эксплуатации антенн [1–3]. Пионерской работой в этой области является [4]. В этой статье впервые был предложен алгоритм компенсации влияния дефектных элементов ЦФАР посредством синтеза нового амплитудно-фазового распределения (АФР), рассчитанного на использование только исправных элементов. Для этого в работе была предложена функция потерь, учитывающая разницу между ДН ЦФАР с дефектными эле-

ментами и без них. Параметрами оптимизации являлись коэффициенты АФР исправных элементов. Поиск коэффициентов предлагалось осуществить на основе классического метода оптимизации – метода сопряженных градиентов. В дальнейшем для решения задачи были предложены другие алгоритмы поиска: генетические алгоритмы (genetic algorithm) [5, 6], алгоритм векторно-пространственных проекций (method of vector-space projections) [7], алгоритм роя частиц (particle swarm optimization) и поиска пищи бактериями (bacteria foraging optimization) [8] и др. [9–15]. Сравнительный анализ предложенных методов дан в обзорной

статье [16]. В целом предложенные методы позволяют решить задачу компенсации потери части элементов и примерного восстановления параметров ДН – ее ширины и уровня боковых лепестков. Однако все они сложны при реализации, поскольку требуют организации итерационных процедур поиска оптимального АФР.

В [17–19] предложен другой подход, который не предполагает изменения АФР антенны, но основан на восстановлении сигналов в дефектных элементах за счет их аппроксимации по сигналам в исправных элементах ЦФАР. Такой подход представляется менее сложным, поскольку не использует процедур оптимизационного поиска.

Цель работы, описываемой в данной статье, – разработка прямого алгоритма восстановления исходной ДН ЦФАР при появлении в ее составе дефектных элементов.

В статье развивается идея, предложенная в [17–19]. В этих статьях для восстановления приходящих от группы источников сигналов в дефектных элементах авторы используют предположение о плоском характере фазового фронта волны точечного источника. Действительно, при падении плоской волны на раскрыв ЦФАР сигнал в m -м элементе

$$e_m(t) = \dot{\rho} e^{i\omega_0 t} \exp[-imk_w d \sin \alpha],$$

$$m = 0, \dots, M - 1,$$

где $\dot{\rho}$ – комплексная амплитуда сигнала; ω_0 – несущая частота; $k_w = 2\pi/\lambda$ – волновое число (λ – длина волны); d – расстояние между соседними элементами ЦФАР; α – угол падения волны по отношению к нормали раскрыва; M – количество элементов. Следовательно, зная сигнал в m -м элементе, можно вычислить сигнал в n -м элементе

$$e_n(t) = e_m(t) \exp[-i(n-m)k_w d \sin \alpha] =$$

$$= H^{(n-m)} e_m(t),$$

если известен множитель $H = \exp[-ik_w d \sin \alpha]$.

Задача, решаемая в [16–18], отличается от поставленной в описываемой работе, поскольку восстанавливаются именно сигналы, причем приходящие от группы источников. В связи с такой постановкой авторы цитируемых работ вынуждены были предположить, что угловые координаты источников в группе известны априорно.

Это предположение позволяет рассмотренным в статье способом выделить сигналы отдельных источников, используя часть раскрыва ЦФАР, которая не содержит дефектных элементов, а сигналы в дефектных элементах восстановить на основе приведенного ранее уравнения.

Решение поставленной в данной статье задачи основано, во-первых, на оценке методом наименьших квадратов пространственной частоты (ПЧ) волны, падающей на раскрыв антенны, по результатам обработки сигналов во всех исправных элементах ЦФАР и, во-вторых, на отсутствии предположения об априорном знании угловой координаты источника сигнала.

Статья организована следующим образом. Вначале рассматривается алгоритм восстановления ДН ЦФАР, отдельные элементы которой дефектны. Далее приведены результаты математического моделирования восстановления ДН. В заключение сделаны выводы по работе.

Алгоритм восстановления ДН. Пусть линейная ЦФАР содержит M элементов, пронумерованных подряд элементами множества $A = \{0, 1, \dots, M - 1\}$. Выделим исправные элементы, номера которых составляют множество $B = \{m_j \in A, j = 1, \dots, M - J\}$, где $J (J < M)$ – количество дефектных элементов, и введем M -мерный вектор

$$\mathbf{W} = \{w_m, m = 0, \dots, M - 1\} = \begin{cases} 1, & m \in B \\ 0, & m \notin B \end{cases}_{m=0}^{M-1}.$$

Таким образом, единичные элементы вектора \mathbf{W} соответствуют исправным элементам, а нулевые – дефектным. Номера дефектных элементов составят множество $C = A/B$.

Выделим в векторе \mathbf{W} группы единичных элементов, идущих подряд с шагом $s = 1, 2, \dots, M - 1$. Обозначим эти группы как $G_{sj}(a, b)$, где $j = 1, \dots, J_s$ – номер группы в подмножестве элементов G_s с одинаковым значением шага s ; J_s – количество таких групп; a, b – номера элементов в начале и конце группы. Пример выделения групп в векторе \mathbf{W} для случая $M = 16$ и $J = 7$ представлен в табл. 1. Таблица содержит множества A, B, C ,

Табл. 1. Пример распределения дефектных элементов по раскрытию ЦФАР и выделения групп исправных элементов

Tab. 1. Distribution of failed elements over the antenna array aperture and selection of groups of non-faulty elements

A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
W	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
B		1			4	5		7	8	9				13	14	15
C	0		2	3			6				10	11	12			
G_1					4	5		7	8	9				13	14	15
G_2						5	→	7								
G_3			1	→	→	4										
G_4										9	→	→	→	13		

вектор \mathbf{W} , группы, расстояние между которыми равно шагу s . Стрелкой показаны элементы, которые не входят в группы, но разделяют их начало и конец.

Составим матрицу T (табл. 2), каждая строка которой соответствует одной группе и содержит: шаг между элементами s , номер первого a и последнего b элементов группы, количество элементов в группе M_s . Функция MATLAB, реализующая группировку элементов вектора \mathbf{W} и составление матрицы T , приведена в Приложении. Входной переменной для функции является вектор \mathbf{W} .

Табл. 2. Результат составления матрицы T

Tab. 2. Construction of the T matrix

Группа	Шаг группы s	Начало группы a	Конец группы b	Кол-во эл-тов M_s
G_{11}	1	4	5	2
G_{12}	1	7	9	3
G_{13}	1	13	15	3
G_{21}	2	5	7	2
G_{31}	3	1	4	2
G_{41}	4	9	13	2

Разделение на группы необходимо для восстановления ПЧ плоской волны принятой ЦФАР. Рассмотрим группу исправных элементов $G_{sj}(a, b)$. При падении плоской волны на элементы выбранной группы комплексные амплитуды сигналов в них

$$\dot{E}_m = \dot{\rho} \exp[-ik_w(a + ms)d \sin \alpha],$$

$$m = 0, 1, \dots, M_s - 1,$$

где $\dot{\rho}$ – комплексная амплитуда волны; $k_w = 2\pi/\lambda$ – волновое число (λ – длина волны); d – расстояние между соседними элементами ЦФАР; α – угол падения волны по отношению к нормали раскрытия; $M_s = (b - a)/s + 1$ – количество элементов в группе. Считая, что фаза волны в элементе с номером $m = 0$ $\varphi_0 = 0$, фазы сигналов в элементах ЦФАР

$$\varphi_m = msk_w d \sin \alpha = ms\Omega,$$

$$m = 0, 1, \dots, M_s - 1,$$

где $\Omega = k_w d \sin \alpha$ – безразмерная ПЧ сигнала. Тогда ПЧ

$$\Omega = \frac{\varphi_m - \varphi_{m-1}}{s}$$

можно оценить методом наименьших квадратов, измерив фазы сигналов в элементах групп-

пы. Для этого составим функционал

$$Q(\Omega | \varphi_m, m=1, \dots, M_s-1) = \sum_{m=1}^{M_s-1} [ms\Omega - \varphi_m]^2 = s^2\Omega^2 \sum_{m=1}^{M_s-1} m^2 - 2s\Omega \sum_{m=1}^{M_s-1} m\varphi_m + \sum_{m=1}^{M_s-1} \varphi_m^2.$$

Минимум функционала соответствует искомой оценке ПЧ

$$\Omega_s = \frac{6}{sM_s(M_s-1)(2M_s-1)} \sum_{m=1}^{M_s-1} m\varphi_m.$$

В силу того, что оценки фаз сигналов в элементах ЦФАР всегда принадлежат интервалу $[-\pi, \pi]$, оценки ПЧ Ω_s при размере шага $s \geq 2$ должны быть скорректированы следующим образом:

$$\hat{\Omega}_s = \Omega_s + 2\pi n, \quad n = \left\{ m : \min_{m \in \{-1, 0, 1\}} [|\Omega_s - \Omega_1| + 2\pi m] \right\},$$

т. е. минимально по модулю 2π отличаться от оценки ПЧ Ω_1 при шаге $s=1$.

Финальная оценка ПЧ падающей волны равна среднему значению оценок, полученных для разных значений шага s :

$$\hat{\Omega} = \frac{1}{N_s} \sum_s \frac{1}{J_s} \sum_{j=1}^{J_s} \hat{\Omega}_s^{(j)},$$

где N_s – количество значений шага s ; J_s – количество групп исправных элементов с одинаковым шагом s ; $\hat{\Omega}_s^{(j)}$ – оценка ПЧ в j -й группе. Оценив ПЧ $\hat{\Omega}$, можно восстановить ДН ЦФАР

$$f(\hat{\Omega}) = \sum_{m=0}^{M-1} p_m \exp[-im\hat{\Omega}],$$

где $p_m (m=0, \dots, M-1)$ – коэффициенты АФР в раскрыте ЦФАР.

Результаты математического моделирования. С целью проверки предлагаемого алгоритма восстановления ДН было проведено ма-

тематическое моделирование при следующих условиях:

- количество элементов $M = 16$;
- АФР – равномерное, $p_m = 1/M$, $m=0, \dots, M-1$;
- количество дефектных элементов $J = 0, 1, \dots, M/2-1$;
- количество статистических испытаний равно количеству перестановок $K = \binom{M}{J} =$

$$= \frac{M!}{J!(M-J)!}.$$

В ходе эксперимента оценивались математические ожидания (МО) и среднеквадратические ошибки (СКО) следующих параметров ЦФАР:

- коэффициента направленного действия (КНД) $G = \pi |f(0)|^2 / \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |f(\Omega)|^2 d\Omega$;
- ширины ДН по уровню половинной мощности $\Delta\Omega_{0,5}$;
- уровня максимального бокового лепестка ДН δf_{\max} .

На рис. 1 приведены зависимости этих параметров от количества дефектных элементов ЦФАР. Как следует из рисунка, у ЦФАР с дефектными элементами (графики I, штриховая линия) ДН является случайной. При этом наблюдается монотонное уменьшение КНД и рост ширины ДН с увеличением количества дефектных элементов. Средний уровень максимального бокового лепестка колеблется относительно значения этого показателя при отсутствии дефектных элементов. СКО всех выбранных параметров ДН увеличивается с ростом количества дефектных элементов. Рассмотренный алгоритм позволил полностью восстановить ДН. У восстановленной ДН (графики II, сплошная линия) вне зависимости от количества дефектных элементов значения КНД, ширины ДН и уровня максимального бокового лепестка сохраняются неизменными, соответствующими полностью исправной ЦФАР.

Естественно, при наличии шумов в элементах ЦФАР качество работы рассмотренного алгоритма будет зависеть от отношения сигнал/шум в каналах приема. На рис. 2 (кривые I)

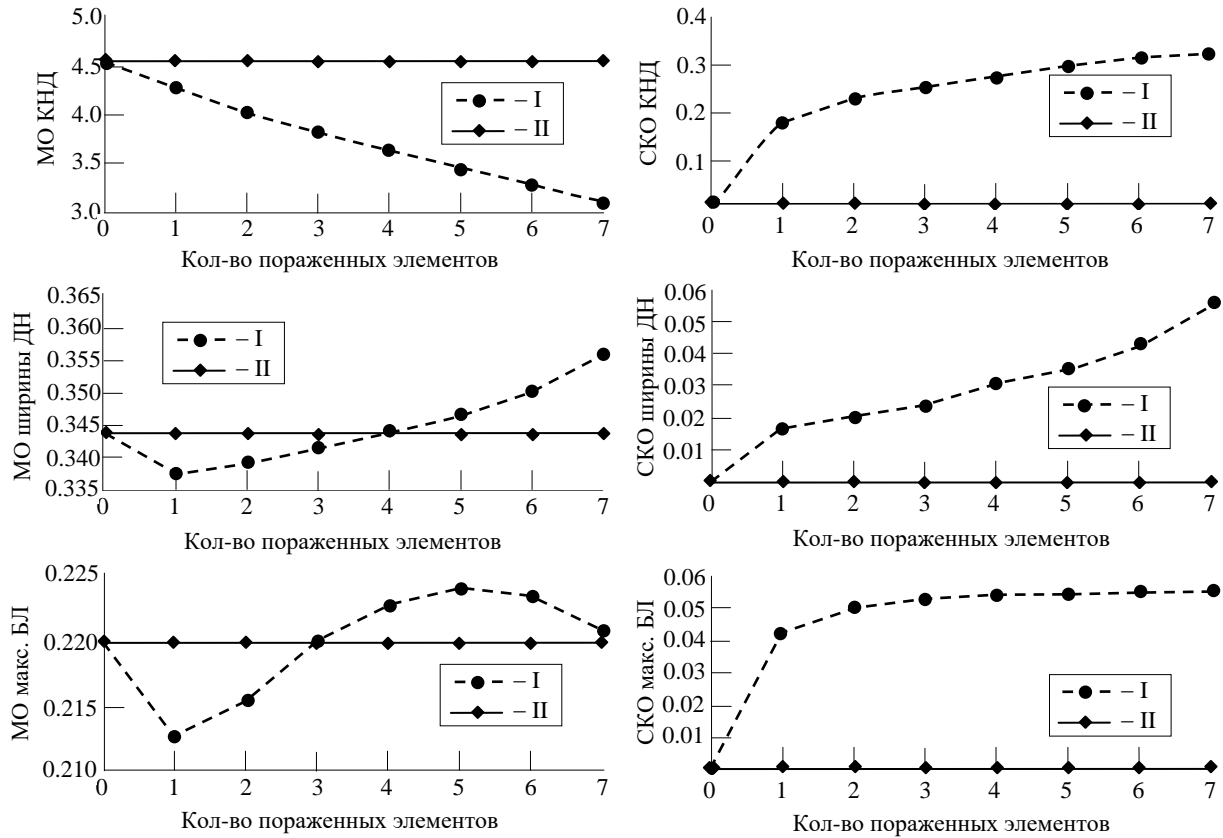


Рис. 1. Зависимости МО и СКО КНД, ширины ДН и уровня максимального бокового лепестка от количества дефектных элементов

Fig. 1. Plots of the mathematical expectations and standard deviations of antenna directivity, beamwidth and the largest side lobe level via the number of failed elements

приведены результаты моделирования, полученные при изменении отношения сигнал/шум (ОСШ) в элементах ЦФАР. Шумы в элементах полагались независимыми комплексными нормальными случайными процессами с одинаковым распределением вероятности $\mathcal{CN}(0, P_n)$, которое имеет нулевое МО и среднюю мощность (дисперсию) P_n . При моделировании количество дефектных элементов было постоянным и равным $J = 7$, а их положение на раскрыве – случайным и равномерным.

Как следует из рисунка, уже при умеренных ОСШ рассмотренный алгоритм позволяет восстановить ДН ЦФАР: смещение и СКО оценок параметров качества незначительно по сравнению с их значениями в отсутствие шумов. Так при ОСШ 12 дБ смещение и СКО оценок составляют: для КНД 0.12 и 4.3 %; для ширины ДН 2.16 и 12.6 %; для уровня максимального бокового лепестка 12.5 и 62 %. С увеличением ОСШ смещения и СКО оценок монотонно убывают. Например, при ОСШ 20 дБ смещение и СКО

оценок составляют: для КНД 0.05 и 1.75 %; для ширины ДН 2.09 и 5.2 %; для уровня максимального бокового лепестка 0.69 и 0.03 %.

Очевидно, что качество оценки ПЧ при некотором шаге зависит от размера самого шага s и количества элементов в группе M_s . Этот факт можно учесть при вычислении финальной оценки $\hat{\Omega}$ заменой приведенной ранее равновесной оценки, когда все группы вне зависимости от шага и количества элементов полагаются равноценными, на весовую оценку, в которой оценки $\hat{\Omega}_s^{(j)}$, $j = 1, \dots, J_s$ участвуют со своим весом, зависящим от размера шага и количества элементов в группе:

$$\hat{\Omega} = \sum_s w_s \sum_{j=1}^{J_s} w_{s,j} \hat{\Omega}_s^{(j)},$$

где w_s – вес, определяемый шагом s ; w_j – вес, зависящий от количества элементов $M_{s,j}$

в j -й группе $G_s^{(j)}(a, b)$. Для определения весов

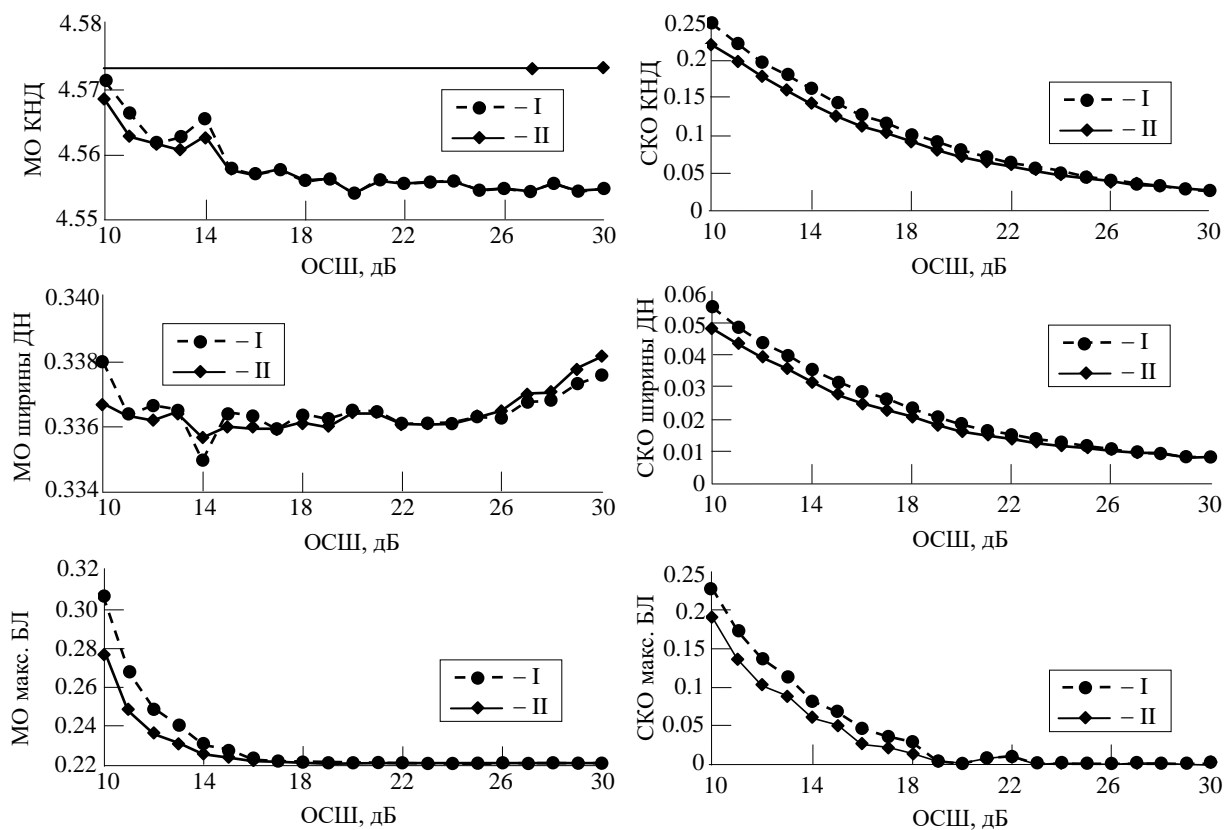


Рис. 2. Зависимости МО и СКО КНД, ширины ДН и уровня первого бокового лепестка от ОСШ

Fig. 2. Plots of the mathematical expectations and standard deviations of antenna directivity, beamwidth and the first side lobe level via the signal-to-noise ratio

необходимо найти дисперсию оценки ПЧ Ω_s . Точное решение этой задачи возможно, однако получающееся уравнение для дисперсии оказывается сложным для применения в практических задачах. Поэтому используем вместо точного значения дисперсии оценки ПЧ ее границу Крамера–Рао.

Считая, что шумы в элементах ЦФАР независимы и имеют одинаковое нормальное распределение вероятности $\mathcal{CN}(0, P_n)$, несложно показать, что граница Крамера–Рао для дисперсии оценки ПЧ $\hat{\Omega}_s$ равна:

$$\sigma_s^2 = \frac{6}{s^2 q^2 M_s (M_s^2 - 1)},$$

где $q^2 = |\hat{\rho}|^2 / P_n$ – отношение сигнал/шум. Тогда, полагая, что вес каждой оценки $\hat{\Omega}_s^{(j)}$, $j=1, \dots, J_s$ должен быть обратно пропорционален ее дисперсии, получим

$$w_s \sim s^2, w_{s,j} \sim M_{s,j} (M_{s,j}^2 - 1),$$

где $M_{s,j}$ – количество элементов в j -й группе, причем в сумме веса должны давать единицу:

$$\sum_s w_s = 1; \sum_j w_{s,j} = 1.$$

На рис. 2 (кривые II) приведены зависимости смещения и СКО весовых оценок от ОСШ, полученные при указанных ранее сценарных условиях. В целом весовые оценки имеют меньшее смещение и СКО при одном и том же ОСШ по сравнению с равновесными. Так при ОСШ 12 дБ смещение и СКО этих оценок составляют: для КНД 0.11 и 3.9 %; для ширины ДН 2.03 и 11.4 %; для уровня максимального бокового лепестка 6.6 и 46 %. Однако при ОСШ больше 20 дБ показатели весовых и равновесных оценок становятся примерно одинаковыми.

Заключение. Предложен простой, безытерационный алгоритм восстановления ДН цифровой антенной решеткой, отдельные приемные элементы которой дефектны. Алгоритм основан на представлении фазового фронта падающей на раскрыв антенны плоскостью. Сделан

ное предположение позволяет оценить ПЧ падающей волны по сигналам в исправных элементах и восстановить фазу сигналов в дефектных элементах решетки. Оценка ПЧ происходит выделением групп исправных элементов с одинаковым шагом распределения по апертуре. Для оценки ПЧ предлагается использовать метод наименьших квадратов. Рассмотрены две оценки ПЧ – равновесная и весовая. Равновесная оценка не учитывает влияния шага и количества элементов в группе на точность оценивания ПЧ при вычислении финальной оценки. Весовая оценка учитывает это влияние. Веса оценок ПЧ, получаемые в отдельных группах, предлагается выбирать обратно пропорциональными дисперсии оценки. Для ее вычисления получена нижняя граница Крамера–Рао для оценки ПЧ. Методом математического моделирования произведена оценка качества восстановления ДН. Для этого в ходе моделирования оценивались КНД антенны, ширина ДН и уровень максимального бокового лепестка. Моделирование подтвердило работоспособность алгоритма при использовании

обоих типов оценок. В целом весовая оценка имеет лучшие характеристики: ее смещение и СКО меньше. Так при равномерном АФР в раскрыве и отношении сигнал/шум 12 дБ в приемных элементах смещение и СКО оценок указанных параметров для равновесной оценки составляют: для КНД 0.12 и 4.3 %; для ширины ДН 2.16 и 12.6 %; для уровня максимального бокового лепестка 12.5 и 62 % от значений тех же параметров при отсутствии дефектных элементов. Для весовой оценки указанные параметры имеют следующие значения: для КНД 0.11 и 3.9 %; для ширины ДН 2.03 и 11.4 %; для уровня максимального бокового лепестка 6.6 и 46 %. С увеличением ОСШ смещения и СКО оценок монотонно убывают, и при отношении сигнал/шум больше 20 дБ различия в статистических характеристиках равновесной и весовой оценок практически исчезают. Таким образом, предлагаемый в статье алгоритм восстановления ДН можно использовать в программном обеспечении сигнального процессора, управляющего работой антенной системы, для компенсации влияния дефектных элементов.

Приложение. Функция группировки элементов

```
function T=Matrix_T(W)
M=numel(W);
A=ones(1,M);
B=find(A.*W==1);
NB=numel(B);

diffB=[0,diff(B)];
Steps=unique(diffB);
T=zeros(numel(Steps)*M,4);

n=1;
Mask=zeros(1,NB+1);
for nstep=2:numel(Steps)
    step=Steps(nstep);
    Mask(1:NB)=logical(diffB==step);

    a=0;
    b=0;
    d=0;
    for m=2:NB+1
        if Mask(m) && ~d
            a=m-1;
            b=m;
            d=1;
        end
    end
end
```

```
    continue
end
if Mask(m) && d
    b=b+1;
else
    if logical(a<b)
        T(n,:)=[step,B(a),B(b),(B(b)-B(a))/step+1];
        n=n+1;
    end
    a=0;
    b=0;
    d=0;
end
end
end
NT=n-1;
T=T(1:NT,:);
```

Список литературы

1. Mailloux R. J. Phased Array Antenna Handbook. Boston: Artech House, 2005. 496 p.
2. Agrawal A. K., Holzman E. L. Active phased array design for high reliability // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 1999. Vol. 35, № 4. P. 1204–1211. doi: 10.1109/7.805438
3. Бибарсов М. Р., Крячко А. Ф., Пшеничников А. В. Оценка состояния функционирования фазированной антенной решетки при нарушении работоспособности фазовращателей антенных элементов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 20–29. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-20-29
4. Peters T. J. A conjugate gradient based algorithm to minimize the sidelobe level of planar arrays with element failures // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1991. Vol. 39, № 10. P. 1497–1504. doi: 10.1109/8.97381
5. Yeo B. K., Lu Y. Array failure correction with a genetic algorithm // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1999. Vol. 47, № 5. P. 823–828. doi: 10.1109/8.774136
6. Radiation Pattern Correction of Faulty Planar Phased Array Using Genetic Algorithm / R. A. B. Saleem, A. A. Shah, H. Munsif, A. I. Najam, S. Khattak, I. Ullah // Advanced Electromagnetics. 2024. Vol. 13, № 2. P. 23–31. doi: 10.7716/aem.v13i2.2439
7. Yang Y., Stark H. Design of Self-Healing Arrays Using Vector-Space Projections // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2001. Vol. 49, № 4. P. 526–534. doi: 10.1109/8.923311
8. Acharya O. P., Patnaik A. Antenna Array Failure Correction [Antenna Applications Corner] // IEEE Antennas and Propagation Magazine. IEEE, 2017. Vol. 59, № 6. P. 106–115. doi: 10.1109/map.2017.2752683
9. Correction of Faulty Sensors in Phased Array Radars Using Symmetrical Sensor Failure Technique and Cultural Algorithm with Differential Evolution / Восстановление диаграммы направленности цифровой антенной решетки с дефектными элементами Antenna Pattern Restoration of Digital Antenna Array with Failed Elements
10. S. U. Khan, I. M. Qureshi, F. Zaman, B. Shoaib, A. Naveed, A. Basit // The Scientific World J. 2014. Vol. 2014. P. 1–10. doi: 10.1155/2014/852539
11. Null Placement and Sidelobe Suppression in Failed Array Using Symmetrical Element Failure Technique and Hybrid Heuristic Computation / S. U. Khan, I. M. Qureshi, F. Zaman, A. Naveed // Progress in Electromagnetics Research B. 2013. Vol. 52. P. 165–184. doi: 10.2528/pierb13032712
12. Guney K., Durmus A., Basbug S. Antenna Array Synthesis and Failure Correction Using Differential Search Algorithm // Int. J. of Antennas and Propagation. 2014. Vol. 2014. P. 1–8. doi: 10.1155/2014/276754
13. Grewal N., Rattan M., Patterh M. A Linear Antenna Array Failure Correction with Null Steering using Firefly Algorithm // Defence Science J. 2014. Vol. 64, № 2. P. 136–142. doi: 10.14429/dsj.64.4250
14. Correction of failure in linear antenna arrays with greedy sparseness constrained optimization technique / S. U. Khan, M. K. A. Rahim, M. Aminu-Baba, N. A. Murad // PLOS ONE. 2017. Vol. 12, № 12. Art. № e0189240. P. 1–18. doi: 10.1371/journal.pone.0189240
15. Patidar H., Maheshwari V., Kar R. Linear Antenna Array Failure Correction with Mutual Coupling Effects using Element Position of the Array Elements // J. of Eng. Science and Technology Review. 2022. Vol. 15, № 2. P. 15–21. doi: 10.25103/jestr.152.03
16. Гусевский В. И., Дупленкова М. Д., Цветкова О. Н. Дистанционное восстановление диаграммы направленности фазированных антенных решеток // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66, № 4. С. 373–379. doi: 10.31857/S0033849421030062
17. Planar Array Failed Element(s) Radiation Pattern Correction: A Comparison / N. Voopalan, A. K. Ramasamy, 53

F. Nagi, A. A. Alkahtani // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, № 19. Art. № 9234.
doi: 10.3390/app11199234

17. Mailloux R. J. A phased array error correction scheme // Proc. of IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp., Ann Arbor, USA, 28 June–02 July 1993. IEEE, 1993. P. 202–205.
doi: 10.1109/APS.1993.385368

18. Mailloux R. J. Array Failure Correction with a Digitally Beamformed Array // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1996. Vol. 44, № 12. P. 1543–1550.
doi: 10.1109/8.546240

19. Steyskal H., Mailloux R. J. Generalisation of an array-failure-correction method // IEE Proc. - Microwaves, Antennas and Propagation. 1998. Vol. 145, № 4. P. 332–336.
doi: 10.1049/ip-map:19982059

Информация об авторах

Монаков Андрей Алексеевич – доктор технических наук (2000), профессор (2005) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Почетный машиностроитель РФ (2005), почетный работник высшего профессионального образования РФ (2006). Автор более 230 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация протяженных целей; цифровая обработка сигналов; радиолокаторы с синтезированной апертурой, исследование природных сред радиотехническими методами; управление воздушным движением.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67 А, Санкт-Петербург, 190000, Россия
E-mail: a_monakov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4469-0501>

Антохин Евгений Александрович – кандидат технических наук (2008), доцент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 64 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация протяженных целей; радиолокационное распознавание объектов; первичная и вторичная радиолокация; цифровая обработка сигналов.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67 А, Санкт-Петербург, 190000, Россия
E-mail: aearabota@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0003-3084-0043>

References

1. Mailloux R. J. Phased Array Antenna Handbook. Boston, Artech House, 2005, 496 p.

2. Agrawal A. K., Holzman E. L. Active Phased Array Design for High Reliability. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 1999, vol. 35, no. 4, pp. 1204–1211.
doi: 10.1109/7.805438

3. Bibarsov M. R., Kryachko A. F., Pshenichnikov A. V. Operation Evaluation of Phased Antenna Arrays in Case of Phase Shifter Malfunction. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 20–29.
doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-20-29

4. Peters T. J. A Conjugate Gradient Based Algorithm to Minimize the Sidelobe Level of Planar Arrays with Element Failures. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1991, vol. 39, no. 10, pp. 1497–1504.
doi: 10.1109/8.97381

5. Yeo B. K., Lu Y. Array Failure Correction with a Genetic Algorithm. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1999, vol. 47, no. 5, pp. 823–828.
doi: 10.1109/8.774136

6. Saleem R. A. B., Shah A. A., Munsif H., Najam A. I., Khattak S., Ullah I. Radiation Pattern Correction of Faulty Planar Phased Array Using Genetic Algorithm. Advanced Electromagnetics. 2024, vol. 13, no. 2, pp. 23–31.
doi: 10.7716/aem.v13i2.2439

7. Yang Y., Stark H. Design of Self-Healing Arrays Using Vector-Space Projections. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2001, vol. 49, no. 4, pp. 526–534.

doi: 10.1109/8.923311

8. Acharya O. P., Patnaik A. Antenna Array Failure Correction [Antenna Applications Corner]. IEEE Antennas and Propagation Magazine. IEEE, 2017, vol. 59, no. 6, pp. 106–115.

doi: 10.1109/map.2017.2752683

9. Khan S. U., Qureshi I. M., Zaman F., Shoaib B., Naveed A., Basit A. Correction of Faulty Sensors in Phased Array Radars Using Symmetrical Sensor Failure Technique and Cultural Algorithm with Differential Evolution. The Scientific World J. 2014, vol. 2014, pp. 1–10.
doi: 10.1155/2014/852539

10. Khan S. U., Qureshi I. M., Zaman F., Naveed A. Null Placement and Sidelobe Suppression in Failed Array Using Symmetrical Element Failure Technique and Hybrid Heuristic Computation. Progress in Electromagnetics Research B. 2013, vol. 52, pp. 165–184.
doi: 10.2528/pierb13032712

11. Guney K., Durmus A., Basbug S. Antenna Array Synthesis and Failure Correction Using Differential Search Algorithm. Int. J. of Antennas and Propagation. 2014, vol. 2014, pp. 1–8.
doi: 10.1155/2014/276754

12. Grewal N., Rattan M., Patterh M. A Linear Antenna Array Failure Correction with Null Steering using Firefly Algorithm. Defence Science J. 2014, vol. 64, no. 2, pp. 136–142.
doi: 10.14429/dsj.64.4250

13. Khan S. U., Rahim M. K. A., Aminu-Baba M., Murad N. A. Correction of Failure in Linear Antenna Arrays with Greedy Sparseness Constrained Optimization Technique. PLOS ONE. 2017, vol. 12, no. 12, art. no. e0189240, pp. 1–18.

doi: 10.1371/journal.pone.0189240

14. Patidar H., Maheshwari V., Kar R. Linear Antenna Array Failure Correction with Mutual Coupling Effects using Element Position of the Array Elements. J. of Eng. Science and Technology Review. 2022, vol. 15, no. 2, pp. 15–21.

doi: 10.25103/jestr.152.03

15. Gusevskii V. I., Duplenkova M. D., Tsvetkova O. N. Remote Reconstruction of the Radiation Pattern of Phased Array Antennas. J. of Communications Technology and Electronics. 2021, vol. 66, no. 4, pp. 427–432.

doi: 10.31857/S0033849421030062

16. Boopalan N., Ramasamy A. K., Nagi F., Alkahtani A. A. Planar Array Failed Element(s) Radiation Pattern Correction: A Comparison. Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 19, art. no. 9234.

doi: 10.3390/app11199234

17. Mailloux R. J. A Phased Array Error Correction Scheme. Proc. of IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp., Ann Arbor, USA, 28 June–02 July 1993. IEEE, 1993, pp. 202–205.

doi: 10.1109/APS.1993.385368

18. Mailloux R. J. Array Failure Correction with a Digitally Beamformed Array. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1996, vol. 44, no. 12, pp. 1543–1550.

doi: 10.1109/8.546240

19. Steyskal H., Mailloux R. J. Generalisation of an Array-Failure-Correction Method. IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagation. 1998, vol. 145, no. 4, pp. 332–336.

doi: 10.1049/ip-map:19982059

Information about the authors

Andrey A. Monakov, Dr Sci. (Eng.) (2000), Professor (2005) of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Honored Mechanical Engineer of the Russian Federation (2005), Honored Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2006). The author of more than 230 scientific publications. Area of expertise: radar theory of extended targets; digital signal processing; synthetic aperture radar; remote sensing; air traffic control.

Address: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67 A, Bolshaya Morskaya St., St Petersburg 190000, Russia

E-mail: a_monakov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4469-0501>

Evgeniy A. Antokhin, Cand. Sci. (Eng.) (2008), Associate Professor of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of 64 scientific publications. Area of expertise: radar theory of extended targets; radar target recognition; primary and secondary radars; digital signal processing.

Address: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67 A, Bolshaya Morskaya St., St Petersburg 190000, Russia

E-mail: aearabota@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0003-3084-0043>
