

Синтез алгоритма оценки характеристик волноводно-щелевой антенной решетки при изменении фазировки антенных элементов

А. Ф. Крячко¹, Н. А. Гладкий¹, М. Р. Бибарсов^{1,2✉}, Б. А. Аюков¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

² Военная академия связи, Санкт-Петербург, Россия

✉ bibarsovmr@rambler.ru

Аннотация

Введение. При эксплуатации антенн для различных радиоэлектронных систем актуальным является учет влияния отказов фазовращателей (ФВ) на характеристики фазированных антенных решеток, в частности волноводно-щелевой фазированной антенной решетки (ВЩФАР). Анализ публикаций показывает, что ситуации выхода из строя указанных элементов рассмотрены не в полной мере и исследования в этом направлении носят весьма ограниченный характер. В статье предложен алгоритм статистического моделирования влияния отказов на характеристики ВЩФАР. Приведено соотношение, связывающее диаграмму направленности с объемом статистической выборки и количеством ФВ, вышедших из строя.

Цель работы. Исследование характеристик ВЩФАР при отказах ФВ, когда их фаза принимает значение с дискретом 22.5° вместо требуемого значения.

Материалы и методы. При исследовании влияния отказов на характеристики ВЩФАР использовались методы статистического моделирования. Расчеты проводились на ЭВМ с помощью пакета прикладной математики Mathcad 15.

Результаты. В ходе исследований предложен алгоритм статистического моделирования влияния отказов на характеристики ВЩФАР. Приведено соотношение, связывающее диаграмму направленности с объемом статистической выборки и количеством ФВ, вышедших из строя. Исследовались неисправности излучателей от 5 до 35 из 50 элементов. Получено изменение следующих характеристик: среднеквадратическое отклонение – от 0.047 до 0.13; относительные значения: ширина диаграммы направленности – от 9 до 32 %; уровень боковых лепестков – от 13 до 72 %; мощность излучения – от 0.9 до 0.31.

Заключение. Полученные результаты исследований могут быть обобщены и использованы в радиоэлектронных системах с антенными решетками на этапе их разработки. Следующим направлением работы авторы считают исследование влияния отказов ФВ, при котором мощность не проходит в излучатель. Другим важным направлением является компенсация искажений в результате отказов антенных элементов.

Ключевые слова: волноводно-щелевая фазированная антенная решетка, фазовращатель, диаграмма направленности, среднеквадратическое отклонение, ширина диаграммы направленности, уровень боковых лепестков, мощность излучения, статистическое моделирование

Для цитирования: Синтез алгоритма оценки характеристик волноводно-щелевой антенной решетки при изменении фазировки антенных элементов / А. Ф. Крячко, Н. А. Гладкий, М. Р. Бибарсов, Б. А. Аюков // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 3. С. 42–51. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-42-51

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 25.04.2024; принята к публикации после рецензирования 27.05.2024; опубликована онлайн 28.06.2024

Algorithm for Assessing the Characteristics of a Waveguide Slot Antenna Array when Changing Antenna Element Phasing

Alexander F. Kryachko¹, Nikolay A. Gladky¹, Marat R. Bibarsov^{1,2✉}, Boris A. Ayukov¹

¹Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

²Military Telecommunications Academy, St Petersburg, Russia

✉ andrewkolesnikov091@gmail.com

Abstract

Introduction. When operating antennas in various radio-electronic systems, the influence of phase shifter (PS) failures on the characteristics of phased array antennas, waveguide-slot phased array antennas (WSPAA) in particular, should be taken into account. A review of publications shows a lack of research studies into failures of these elements.

Aim. Research of WSPAA characteristics in the event of PS failures, when their phase takes a value equal to zero instead of the required value.

Materials and methods. Statistical modeling methods were used to study the impact of PS failures on WSPAA characteristics. Calculations were carried out using a PC and the Mathcad 15 applied mathematics package.

Results. An algorithm for statistical modeling of the impact of PS failures on WSPAA characteristics is proposed. A relationship that connects the radiation pattern with the statistical sample volume and the number of failed PSs is presented. Malfunctions of emitters from 5 to 35 out of 50 elements were investigated. Changes in the following characteristics were obtained: standard deviation – from 0.064 to 0.18; relative values: radiation pattern width – from 8 to 18 %; level of side lobes – from 13 to 59 %; radiation power – from 0.9 to 0.3.

Conclusion. The results obtained can be generalized and used in radio-electronic systems with antenna arrays at the stage of their development. Future work will address the influence of PS failures with phases being established randomly and with random values, as well as PS failures in which power does not pass into the emitter. Another important area concerns compensation of distortions resulting from failures of antenna elements.

Keywords: waveguide-slot phased array antenna, phase shifter, radiation pattern, standard deviation, radiation pattern width, side lobe level, radiation power, statistical modeling

For citation: Kryachko A. F., Gladky N. A., Bibarsov M. R., Ayukov B. A. Algorithm for Assessing the Characteristics of a Waveguide Slot Antenna Array when Changing Antenna Element Phasing. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 3, pp. 42–51. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-42-51

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 25.04.2024; accepted 27.05.2024; published online 28.06.2024

Введение. Исследованию щелевых антенн (ЩА) посвящено большое количество работ [1–6]. Возможность выполнения таких невыступающих излучателей заподлицо с металлической поверхностью в отличие от вибраторных делает их очень рациональными для применения на подвижных наземных, воздушных и морских объектах. ЩА представляет собой узкую щель шириной $(0.03...0.05)\lambda$, где λ – длина волны, прорезанную в металлической поверхности над экраном или в волноводе. При этом обеспечивается одностороннее излучение щели. В зависимости от формы ЩА формируется

поле линейной или вращающейся поляризации. В то же время следует отметить, что щелевой излучатель как самостоятельная антенна практически не применяется. Однако с развитием теории антенн для улучшения направленных свойств ЩА становятся востребованными в качестве элементов антенной решетки, в частности в волноводно-щелевой [7–12].

Волноводно-щелевые фазированные антенные решетки (ВЩФАР) позволяют значительно увеличить коэффициент направленного действия (КНД) и находят широкое применение в радиолокации, спутниковой, радиорелейной и мо-

бильной связи. ВЦФАР описываются в основном теми же параметрами и характеристиками, что и антенные системы других типов: диаграммой направленности (ДН), шириной ее главного лепестка (ШДН), уровнем боковых лепестков (УБЛ), КНД, коэффициентами отражения антенных элементов и другими величинами [13–19].

Однако возникновение неисправностей фазовращателей (ФВ) антенных элементов при эксплуатации ВЦФАР накладывает определенные особенности на формирование ДН с заданными параметрами и другие параметры и характеристики. Анализ публикаций показывает, что ситуации выхода из строя указанных элементов рассмотрены не в полной мере и носят весьма ограниченный характер. В [20] проведено исследование влияния отказов ФВ на характеристики ВЦФАР в случае, когда фазы неисправных ФВ принимают значение, равное нулю. Вместе с тем возможны и другие случаи неисправностей ФВ. Например, когда фазы отказавших ФВ принимают случайным образом некоторое дискретное значение вместо требуемого либо происходит отказ, при котором мощность не проходит в излучатель, т. е. происходит полное выключение ФВ из работы полотна ВЦФАР.

Целью настоящей статьи является разработка алгоритма моделирования влияния неисправностей ФВ, когда фаза в ФВ устанавливается случайным образом с дискретом 22.5° .

Постановка задачи. Предположим возникновение неисправностей ФВ таких, что в них произошло случайное изменение фаз с дискретом 22.5° при нормальном прохождении мощностей в излучатели. Требуется разработать алгоритм моделирования учета влияния неисправных ФВ на характеристики ВЦФАР. Для этого необходимо вычислить излучение, которое отказавшие ФВ обеспечивали при установке фазы до наступления неисправности и добавлении излучения, которое они стали формировать при установке их фаз в указанные дискретные значения. При построении алгоритма следует учесть номер каждого неисправного ФВ, т. е. его местоположение в полотне ВЦФАР.

Алгоритм моделирования. С учетом поставленной цели и постановки задачи разработан алгоритм моделирования изменения характери-

Табл. 1. Исходные данные для алгоритма

Tab. 1. Initial data for the algorithm

Параметр моделирования	Значение
Диапазон рабочих частот	$\Delta f_{\text{раб}} = 5 \dots 5.750$ ГГц
Средняя частота	$f_{\text{ср}} = 5.5$ ГГц
Волновой размер антенны	$L/\lambda \approx 180/2\pi = 30$, L – длина АР
Расстояние между излучателями	$d = 0.60\lambda$
Количество излучателей	$N = 30/0.60 = 50$
θ_0 – направление максимума ДН	20°
Объем статистической выборки	$N_b = 50$
Количество отказов ФВ (M)	До $M < 35$
Сектор углов для расчетов	$-40 < \theta < 40^\circ$
Дискрет фазы ФВ	$f_1 = 22.5^\circ$
Количество возможных вариантов установки фазы в ФВ	16
Мнимая единица	$i := \sqrt{-1}$

стик линейной ВЦФАР при неисправностях ФВ, когда их фазы принимают случайные значения с дискретом 22.5° вместо требуемых. Последовательность алгоритма следующая.

1. Выполняется ввод исходных данных в соответствии с табл. 1.

Следует отметить, что параметры ВЦФАР и диапазон частот выбраны с учетом применения их в радиолокации, спутниковой, радиорелейной и мобильной связи.

2. Выход из строя M ФВ (M – количество ФВ, вышедших из строя) определяется случайным образом методом перебора ФВ по циклу. В результате получаем случайные номера неисправных ФВ в линейной ВЦФАР. Для этого реализуется следующее: цикл по перебору всех элементов линейной антенной решетки, цикл по перебору количества неисправных ФВ, получение номеров отказавших ФВ антенных элементов ВЦФАР.

3. Вычисляется исходная реализованная нормированная ДН в соответствии с постановкой задачи. Исходная нормированная ДН без неисправностей ФВ рассчитывается по формуле

$$F(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N \exp[i2kdn(\sin \theta - \sin \theta_0)], \quad (1)$$

где N – количество излучателей в ВЦФАР; n – номер излучателя; i – мнимая единица;

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число (λ – длина волны); d – расстояние между щелевыми антенными элементами; θ – угол, отсчитываемый от направления перпендикуляра к линии расположения излучателей; θ_0 – фиксированный угол, соответствующий направлению главного максимума ДН. При применении формулы для суммы геометрической прогрессии выражение (1) преобразуется к следующему виду:

$$F(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{N}{2}(kd \sin \theta - \Psi)\right]}{N \sin\left[\frac{1}{2}(kd \sin \theta - \Psi)\right]}, \quad (2)$$

где $\Psi = kd \sin \theta_0$ – суммарный фазовый сдвиг в полотне ВЩФАР.

С учетом выражения для фазового сдвига формула (2) примет вид

$$F(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{N}{2}(kd \sin \theta - \sin \theta_0)\right]}{N \sin\left[\frac{1}{2}(kd \sin \theta - \sin \theta_0)\right]}. \quad (3)$$

4. Рассчитывается нормированная ДН при появлении отказов ФВ по следующей формуле:

$$F1(\theta) = \sum_{n=1}^{N_B} \left(F(\theta) + \left\{ \sum_{p=0}^M \left[\exp(i2\pi d m_{n,p} \sin \theta) \times \frac{\exp(i f_{n,p} f1) - \exp(i2\pi d m_{n,p} \sin \theta_0)}{N} \right] \right\} \right) \frac{1}{N_B}, \quad (4)$$

где N_B – объем статистической выборки; M – количество ФВ, вышедших из строя; $m_{n,p}$ – номер отказавшего элемента. Формула (4) учитывает фазу, устанавливаемую с дискретом $f1 = 22.5^\circ$ и место отказа ФВ $m_{n,p}$.

5. Для набора объема статистической выборки необходимо повторить пп. 2 и 3 N_B раз.

6. Определяем среднее значение и дисперсию (среднеквадратичное отклонение – СКО) нормированной ДН. СКО вычисляем по следующей формуле:

$$\sigma(\theta) = \sum_{n=1}^{N_B} \left(F(\theta) + \left\{ \sum_{p=0}^M \left[\exp(i2\pi d m_{n,p} \sin \theta) \times \frac{\exp(i f_{n,p} f1) - \exp(i2\pi d m_{n,p} \sin \theta_0)}{N} \right] \right\} \right)^2 \frac{1}{N_B} - F1(\theta)^2. \quad (5)$$

Среднее значение ДН характеризует степень искажения ее формы, а СКО характеризует степень изменчивости ДН от реализации к реализации (разброс).

7. По (4), (5) в соответствии с полученными вычислениями строятся графические изображения нормированных ДН и СКО для разного количества неисправных ФВ.

Таким образом, исходные данные и выражения (1)–(5) полностью определяют алгоритм моделирования влияния неисправностей ФВ, когда фаза в ФВ устанавливается случайным образом с дискретом 22.5° .

Результаты моделирования. Исследования влияния отказов ФВ на характеристики ВЩФАР проводились на ЭВМ с помощью пакета прикладной математики Mathcad 15. Местоположение отказавшего ФВ в полотне ВЩФАР, т. е. его номер с установлением фазы с дискретом 22.5° , определялось случайным образом.

При моделировании вида отказов строились три графика: вид исходной ДН и средней ДН при наступлении неисправностей, а также СКО ДН (рис. 1–8). В соответствии с исходными данными и постановкой задачи на основе разработанного алгоритма проведено моделирование неисправностей 35 ФВ из 50 с шагом 5 отказов.

При моделировании вычислялись статистические значения основных параметров ВЩФАР ШДН и УБЛ, а также относительная мощность излучения в направлении максимального излучения θ_0 ($P_{отн}$) и СКО.

В соответствии с алгоритмом моделирования получены следующие результаты. Графики ДН и СКО представлены для 5, 10, 20 и 30 отказавших ФВ.

На рис. 1 представлены графики исходной и средней ДН при отказе пяти ФВ. На этом и по-

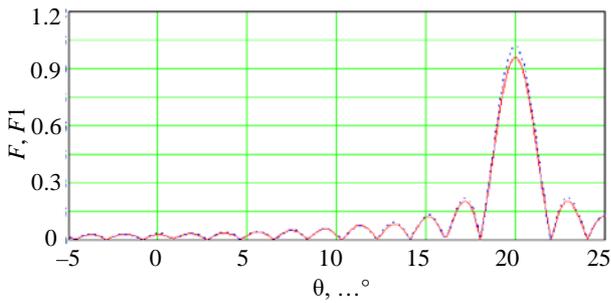


Рис. 1. Графики исходной и средней ДН при отказе 5 ФВ
 Fig. 1. Graphs of the initial DP (dotted line) and average RP (solid) with a failure of 5 PS

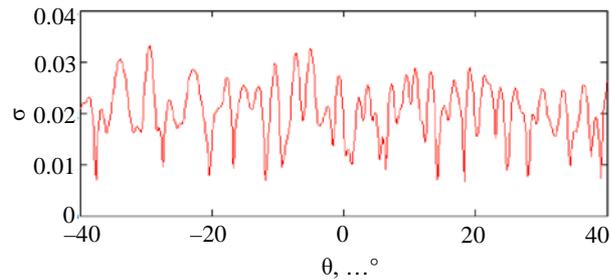


Рис. 2. График СКО ДН при отказе 5 ФВ
 Fig. 2. Graph of SD of RP for a failure of 5 PS

следующих рисунках штриховой линией обозначены исходные ДН, а сплошной линией – средние при отказе определенного количества ФВ.

На рис. 2 наблюдается изменение СКО ДН при отказе пяти ФВ.

Из рис. 1 видно, что при отказе пяти ФВ ДН практически не меняется, за исключением того, что наблюдается уменьшение уровня главного лепестка ДН. При этом относительный УБЛ составляет 13 %; относительная ШДН – 9 %; $P_{отн} = 0.9$; СКО не превышает 0.034 (рис. 2).

На рис. 3 и 4 представлены такие же графики, но при отказе 10 ФВ. Получены следующие результаты: относительный УБЛ составляет 27 %; относительная ШДН – 13 %; $P_{отн} = 0.81$; СКО не превышает 0.063.

Графики на рис. 5, 6 построены при неисправности 20 ФВ со сбросом их фазы в ноль. Анализ рис. 5 и 6 позволяет сделать следующие выводы для указанных рассматриваемых параметров: относительный УБЛ составляет 40 %; относительная ШДН – 18 %; $P_{отн} = 0.62$; СКО не превышает 0.085.

На рис. 7 и 8 представлены результаты моделирования отказов 30 ФВ в ВЩФАР. Графики на рис. 7 и 8 обосновывают следующие полученные показатели: относительный УБЛ со-

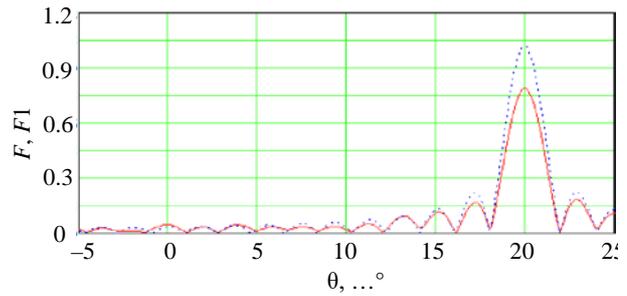


Рис. 3. Графики исходной и средней ДН при отказе 10 ФВ
 Fig. 3. Graphs of the initial DP (dotted line) and average RP (solid) with a failure of 10 PS

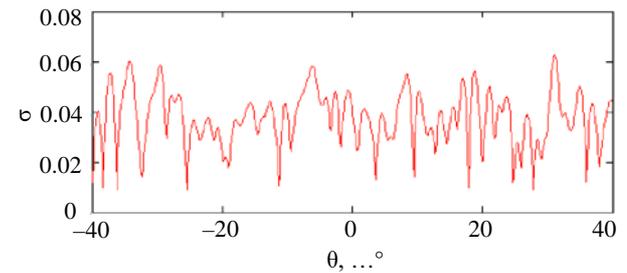


Рис. 4. График СКО ДН при отказе 10 ФВ
 Fig. 4. Graph of SD of RP for failure of 10 PS

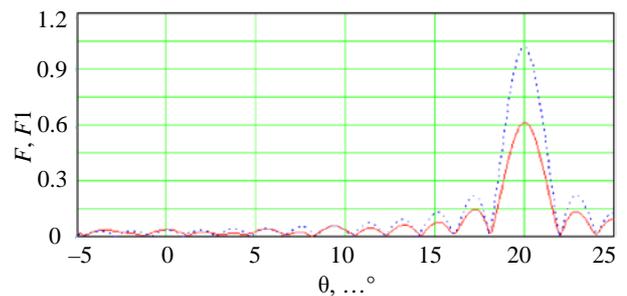


Рис. 5. Графики исходной и средней ДН при отказе 20 ФВ
 Fig. 5. Graphs of the initial DP (dotted line) and average RP (solid) with a failure of 20 PS

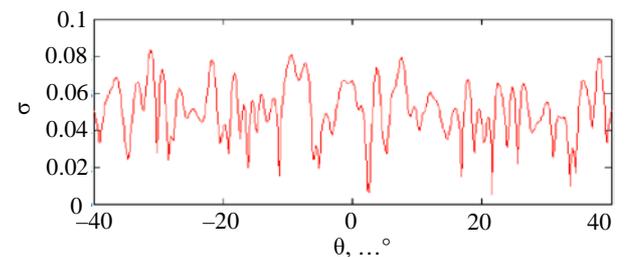


Рис. 6. График СКО ДН при отказе 20 ФВ
 Fig. 6. Graph of SD of RP for a failure of 20 PS

ставляет 59 %; относительная ШДН – 24 %, $P_{отн} = 0.42$; СКО не превышает 0.13.

Вместе с тем все результаты моделирования отказов ФВ сведены в табл. 2, где представлены результаты исследования 50-элементной ВЩФАР при отказах ФВ до 35 излучателей. Динамика изменения параметров рассмотрен-

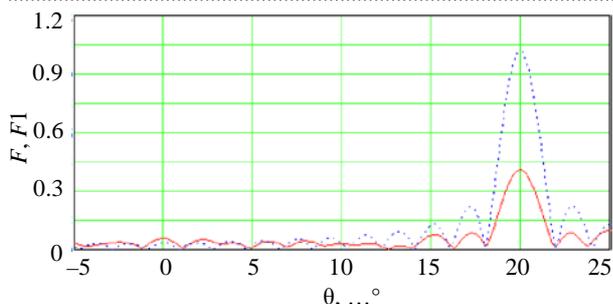


Рис. 7. Графики исходной и средней ДН при отказе 30 ФВ

Fig. 7. Graphs of the initial DP (dotted line) and average RP (solid) with a failure of 30 PS

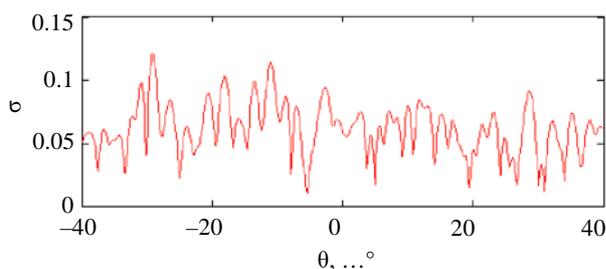


Рис. 8. График СКО ДН при отказе 30 ФВ

Fig. 8. Graph of SD of RP for a failure of 30 PS

ной линейной АР в этих условиях позволяет привести следующий обобщенный анализ результатов моделирования:

- вид исходной и средней ДН при наступлении отказов такой же, как и при обнулении фазы отказавших элементов (первый вариант отказов) [21];
- при изменении количества неисправных ФВ наблюдается искривление формы главного лепестка ДН;
- в большей степени, по сравнению с первым вариантом отказа, происходит падение мощности, излучаемой в направлении главного максимума, которое достигает значения 0.82 от исходного значения при отказе 11 ФВ, 0.53 – при отказе 22 ФВ и 0.31 – при отказе 35 ФВ;
- в отличие от первого варианта отказов второй максимум ДН не появляется;
- провалы в ДН не появляются;
- СКО ДН, аналогичный графику при первом варианте отказов ФВ;

– при изменении количества неисправных ФВ происходит рост СКО от 0.028 при отказе одного ФВ до 0.15 при отказе 35 ФВ.

Заключение. В статье проведен анализ применения ЩА и ВЩФАР. Согласно постановке цели исследования и постановке задачи разработан алгоритм моделирования влияния неисправностей ФВ, когда фаза в ФВ устанавливается случайным образом с дискретом 22.5° вместо требуемых для линейного фазового распределения.

Учет влияния такого рода неисправностей получается вычитанием излучения, которое неисправные ФВ обеспечивали при установке фазы до наступления отказа и добавлении излучения, которое они стали формировать при установке их фаз с дискретом 22.5° . Одновременно учитывалось местоположение каждого неисправного ФВ в ВЩФАР. Вместе с тем приведено аналитическое соотношение, связывающее ДН с объемом статистической выборки и количеством ФВ, вышедших из строя.

В результате применения разработанного алгоритма рассчитаны и построены графики исходной и средней ДН при разном количестве неисправных антенных элементов ВЩФАР, а также графики СКО, оценивающие степень изменения значений ДН от реализации к реализации.

Полученные результаты исследований могут быть обобщены и использованы в радиолокационных системах; системах спутниковой, радиорелейной и мобильной связи; беспроводной локальной сети; радиоастрономии на этапе разработки радиоэлектронных устройств в этих направлениях.

Таким образом, разработанный алгоритм и его моделирование требуют учета особенностей приема и передачи сигналов, связанных с исследованием закономерностей, определяющих взаимосвязи параметров и характеристик ВЩФАР.

Дальнейшие направления исследований авторы связывают с рассмотрением вопросов компенсации искажений параметров и характе-

Табл. 2. Результаты моделирования отказов ФВ

Tab. 2. Results of modeling phase shifter failures

Количество неисправ. ФВ	5	10	15	20	25	30	35
Относительный УБЛ, %	13	27	36	40	54	59	72
Относительная ШДН, %	9	13	16	18	21	24	32
Мощность излучения в θ_0	0.9	0.81	0.7	0.62	0.5	0.42	0.31
СКО	0.034	0.063	0.08	0.085	0.1	0.13	0.15

ристик АР с использованием методов, рассмотренных в [21–24]. Кроме того, представляется необходимым исследование влияния неисправ-

ностей ФВ антенных решеток в случае, когда мощность не проходит в излучатель, что выходит за рамки настоящей статьи.

Авторский вклад

Крячко Александр Федотович – общая идея синтеза алгоритма.

Гладкий Николай Александрович – обработка результатов моделирования алгоритма.

Бибарсов Марат Рашидович – теоретическое обоснование разработки алгоритма.

Аюков Борис Алексеевич – постановка задачи моделирования алгоритма.

Author's contribution

Alexander F. Kryachko, general idea of algorithm synthesis.

Nikolay A. Gladky, processing of algorithm simulation results.

Marat R. Bibarsov, theoretical basis for the development of the algorithm.

Boris A. Ayukov, statement of the algorithm modeling problem.

Список литературы

1. Мануилов М. Б., Лерер В. А., Синявский Г. П. Методы расчета и новые применения волноводно-щелевых антенных решеток // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 5. С. 3–28.

2. Данильчук В. И. Модельная задача расчета щелевой антенны под покрытием // Радиотехника. 2000. № 9. С. 12–15.

3. Раддиг Ю. Ю., Хаванова М. А., Мойсеенко Н. П. Математическое моделирование задачи синтеза слабонаправленных щелевых антенн для летательных аппаратов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2001. Т. 4, № 3. С. 27–29.

4. Математические методы прикладной электродинамики / С. Б. Раевский, Ю. Г. Белов, А. А. Денисенко, А. И. Ермолаев, В. В. Ермошин, Т. Н. Заборонкова. М.: Радиотехника, 2007. 88 с.

5. Войтович Н. И., Клыгач Д. С., Хашимов А. Б. Поле излучения двусторонней щелевой антенны // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроника. 2012. Вып. 16, № 6 (282). С. 135–141.

6. Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Разработка линейной эквивалентной волноводно-щелевой антенной решетки и анализ ее направленных свойств // Антенны. 2018. № 2. С. 15–20.

7. Milligan T. A. Modern Antenna design. N. J.: John Wiley & Sons, 2005. 630 p.

8. Balanis C. A. Modern antenna handbook. N. J.: John Wiley & Sons, 2008. 1704 p.

9. Levin B. Antenna Engineering Theory and Problems. Boca Raton: CRC Press, 2017. 406 p.

10. Пелевин А. О., Заргано Г. В., Вяткина С. В. Сравнительный анализ ФАР на прямоугольных и гребневых волноводах // Телекоммуникации. 2019. № 3. С. 22–28.

11. Single ridge waveguide slot incremental conductance analysis and array antenna design / Rui Xu,

Jiangying Li, Dingyi Luo, Guangwei Yang // Proc. of 2014 3rd Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation, Harbin, China, 26–29 July 2014. IEEE, 2014. P. 143–146. doi: 10.1109/APCAP.2014.6992435

12. Teng Li, Wenbin Dou. Design of an Edge Slotted Waveguide Antenna Array Based on T-Shaped Cross-Section Waveguide // Intern. J. of Antennas and Propagation. 2017. P. 1–8. doi: 10.1155/2017/7385357

13. Elliott R. S. Antenna Theory & Design. Wiley-IEEE Press, 2003. 612 p.

14. Математическая модель антенно-волноводного тракта с разделением сигналов по частоте-поляризации / Д. Д. Габриэлян, А. Е. Коровкин, С. И. Бойчук, С. В. Дворников, М. Р. Бибарсов, Г. Ш. Бибарсова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 4. С. 41–51. doi: 10.32603/1993-8985-2021-25-4-41-51

15. Пономарев Л. И., Степаненко В. И. Сканирующие многочастотные совмещенные антенные решетки. М.: Радиотехника, 2009. 328 с.

16. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием. М.: Сайнс-пресс, 2001. 232 с.

17. Пелевин А. О., Земляков В. В., Заргано Г. В. Исследование характеристик щелевой антенной решетки на основе П-волноводов // Антенны. 2018. № 3. С. 3–7.

18. Bozzi M., Georgiadis A., Wu K. Review of Substrate Integrated Waveguide (SIW) Circuits and Antennas // IET Microwaves, Antennas and Propagation. 2011. Vol. 5, № 8. P. 909–920. doi: 10.1049/iet-map.2010.0463

19. Пастернак Ю. Г. Разработка антенной решетки для мобильного терминала спутниковой связи. URL: <https://cchgeu.ru/upload/iblock/211/itogovuyotchet-po-proektu-razrabotka-antennoy-reshetki-dlya-mobilnogo-terminala-sputnikovoy-svyazi.pdf> (дата обращения 06.05.2024).

20. Бибарсов М. Р. Исследование влияния отказов фазовращателей на характеристики волноводно-щелевой фазированной антенной решетки // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 1. С. 57–66. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-57-66

21. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. М.: Сов. радио, 1970. 384 с.

22. Синтез амплитудно-фазового распределения в квазикольцевой антенной решетке / М. Р. Бибарсов, Е. В. Грибанов, Д. Д. Габриэльян, Ден. С. Федоров, Дан. С. Федоров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. Вып. 2. С. 28–33.

23. Влияние локально плоских искажений излучающего раскрыва на диаграмму направленности фазированной антенной решетки / М. Р. Бибарсов, Г. Ш. Бибарсова, Д. Д. Габриэльян, С. В. Дворников, Д. С. Федоров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 1. С. 17–25. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-17-25

24. Влияние ошибок формирования амплитудно-фазового распределения в раскрыве фазированной антенной решетки на точность пеленгации / М. Р. Бибарсов, Г. Ш. Бибарсова, Д. Д. Габриэльян, В. Н. Шацкий // Информация и космос. 2023. № 2. С. 18–23.

Информация об авторах

Крячко Александр Федотович – доктор технических наук (2005), профессор (2008), заведующий кафедрой радиосвязи радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 189 научных работ. Сфера научных интересов – прикладная электродинамика; анализ и разработка управляющих информационных комплексов авиакосмических радиосистем телеметрии, связи и управления.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия

E-mail: kaf21@guar.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6886-5604>

Гладкий Николай Александрович – кандидат технических наук (2018), доцент кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 59 научных работ. Сфера научных интересов – системы передачи и приема информации; адаптивные антенные системы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия

E-mail: glana@aanet.ru

Бибарсов Марат Рашидович – кандидат технических наук (1999), доцент (2007), старший преподаватель кафедры радиосвязи Военной академии связи, доцент кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 191 научных работ. Сфера научных интересов – системы передачи и приема информации; адаптивные антенные системы.

Адрес: Военная академия связи, пр. Тихорецкий, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия

E-mail: Bibarsovvr@rambler.ru

Аюков Борис Алексеевич – кандидат технических наук (2016), доцент кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 51 научной работы. Сфера научных интересов – метеорадиолокация.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия

E-mail: Ajukov-b-58@yandex.ru

References

1. Manuilov M. B., Lerer V. A., Sinyavsky G. P. Methods of Simulation and New Design Concepts of Slotted-Waveguide Array Antennas. Advances of modern radio electronics. 2007, no. 5, pp. 3–28. (In Russ.)

2. Danilchuk V. I. Model Problem of Calculating a Slot-Left Antenna under a Coating. Radio engineering. 2000, no. 9, pp. 12–15. (In Russ.)

3. Radzig Yu. Yu., Khavanova M. A., Moiseenko N. P. Mathematical Modeling of the Problem of Synthesis of Weakly Directional Slot Antennas for Aircraft. Physics of Wave Processes and Radio-Technical Systems. 2001, vol. 4, no. 3, pp. 27–29. (In Russ.)

4. Raevsky S. B., Belov Yu. G., Denisenko A. A.,

Ermolaev A. I., Ermoshin V. V., Zaboronkova T. N. [Matematicheskie metody prikladnoi elektrodinamiki] Mathematical Methods of Applied Electrodynamics. Moscow, Radio engineering, 2007, 88 p. (In Russ.)

5. Voitovich N. I., Klygach D. S., Khashimov A. B. Radiation Field of a Bilateral Slot Antenna. Bulletin of SUSU. Series "Computer technologies, control and radio electronics". 2012, vol. 16, no. 6 (282), pp. 135–141. (In Russ.)

6. Koshkidko V. G., Migalin M. M. Development of a Linear Equivalent Waveguide-Slot Antenna Array and Analysis of its Directional Properties. Antennas. 2018, no. 2, pp. 15–20. (In Russ.)

7. Milligan T. A. *Modern Antenna Design*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2005, 630 p.
8. Balanis C. A. *Modern Antenna Handbook*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2008, 1704 p.
9. Levin B. *Antenna Engineering Theory and Problems*. Boca Raton, CRC Press, 2017, 406 p.
10. Pelevin A. O., Zargano G. V., Vyatkina S. V. Comparative Analysis of Radiation Patterns of Phased Arrays of Slotted Rectangular and Single-Ridge Waveguide Antennas. *Telecommunications*. 2019, no. 3, pp. 22–28. (In Russ.)
11. Rui Xu, Jiangying Li, Dingyi Luo, Guangwei Yang. Single Ridge Waveguide Slot Incremental Conductance Analysis and Array Antenna Design. Proc. of 2014 3rd Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation, Harbin, China, 26–29 July 2014. IEEE, 2014, pp. 143–146. doi: 10.1109/APCAP.2014.6992435
12. Teng Li, Wenbin Dou. Design of an Edge Slotted Waveguide Antenna Array Based on T-Shaped Cross-Section Waveguide. *Intern. J. of Antennas and Propagation*. 2017, pp. 1–8. doi: 10.1155/2017/7385357
13. Elliott R. S. *Antenna Theory & Design*. Wiley-IEEE Press, 2003, 612 p.
14. Gabriel'ean D. D., Korovkin A. E., Boychuk S. I., Dvornikov S. V., Bibarsov M. R., Bibarsova G. Sh. Mathematical Model of an Antenna-Waveguide Path with Separation of Signals by Frequency–Polarization. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2022, vol. 25, no. 4, pp. 41–51. doi: 10.32603/1993-8985-2021-25-4-41-51 (In Russ.)
15. Ponomarev L. I., Stepanenko V. I. *Skanniruyushchie mnogochastotnye sovmeshchennye antennoye reshetki* [Scanning Multi-Frequency Combined Antenna Arrays]. Moscow, Radio engineering, 2009, 328 p. (In Russ.)
16. Vendik O. G., Parnes M. D. [*Antenny s elektricheskimi skanirvaniem*] *Antennas with Electrical Scanning*. Moscow, Science Press, 2001, 232 p. (In Russ.)
17. Pelevin A. O., Zemlyakov V. V., Zargano G. V. Study of the Characteristics of a Slot Antenna Array Based on P-Waveguides. *Antennas*. 2018, no. 3, pp. 3–7. (In Russ.)
18. Bozzi M., Georgiadis A., Wu K. Review of Substrate Integrated Waveguide (SIW) Circuits and Antennas. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*. 2011, vol. 5, no. 8, pp. 909–920. doi: 10.1049/iet-map.2010.0463
19. Pasternak Yu. G. Development of an Antenna Array for a Mobile Satellite Communication Terminal. Available at: <https://cchgeu.ru/upload/iblock/211/itogovvyotchet-po-proektu-razrabotka-antennay-reshetki-dlya-mobilnogo-terminala-sputnikovoy-svyazi.pdf> (accessed 06.05.2024).
20. Bibarsov M. R. Research of the Influence of Phase Shifters Failures on Characteristics Waveguide-Slot Phased Array Antenna. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2024, vol. 27, no. 1, pp. 57–66. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-57-66 (In Russ.)
21. Shifrin Y. S. [*Voprosy statisticheskoi teorii anten*] Questions of statistical theory of antennas. Moscow, *Sov. radio*, 1970, 384 p. (In Russ.)
22. Bibarsov M. R., Griбанov E. V., Gabrielyan D. D., Fedorov Den. S., Fedorov Dan. S. Synthesis of Amplitude-Phase Distribution in Quasiconcave an Antenna Array. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2017, iss. 2, pp. 28–33. (In Russ.)
23. Bibarsov M. R., Bibarsova G. Sh., Gabriel'ean D. D., Dvornikov S. V., Fedorov D. S. Effect of Locally Flat Distortions in the Radiating Aperture on the Radiation Pattern of a Phased Antenna Array. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2023, vol. 26, no. 1, pp. 17–25. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-17-25 (In Russ.)
24. Bibarsov M. R., Bibarsova G. Sh., Gabrielyan D. D., Shatsky V. N. Influence of Errors in the Formation of the Amplitude-Phase Distribution in the Aperture of a Phased Array Antenna on the Accuracy of Direction Finding. *Information and Space*. 2023, no. 2, pp. 18–23.

Information about the authors

Alexander F. Kryachko, Dr Sci. (Eng.) (2005), Professor (2008), Head of the Department of Radio-engineering and Optoelectronic Complexes of the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of 189 scientific publications. Area of expertise: applied electrodynamics; analysis and development of control information complexes for aerospace radio telemetry, communication and control systems.

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

E-mail: kaf21@guap.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6886-5604>

Nikolay A. Gladky, Cand. Sci. (Eng.) (2018), Associate Professor of the Department of Radio-engineering and Optoelectronic Complexes of the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of 59 scientific publications. Area of expertise: information transmission and reception systems; adaptive antenna systems.

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

E-mail: glana@aanet.ru

Marat R. Bibarsov, Cand. Sci. (Eng.) (1999), Associate Professor (2007), Senior Lecturer of the Radio Communications Department of the Military Telecommunications Academy, Associate Professor of the Department of Radio-engineering and Optoelectronic Complexes of the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

tation. The author of 191 scientific publications. Area of expertise: information transmission and reception systems; adaptive antenna systems.

Address: Military Telecommunications Academy, 3, Tikhoretsky Ave., St Petersburg 194064, Russia

E-mail: bibarsovnr@rambler.ru

Boris A. Ayukov, Cand. Sci. (Eng.) (2016), Associate Professor of the Department of Radio-engineering and Optoelectronic Complexes of the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of 51 scientific publications. Area of expertise: weather radar.

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

E-mail: Ajukov-b-58@yandex.ru
