

Исследование влияния отказов фазовращателей на характеристики волноводно-щелевой фазированной антенной решетки

М. Р. Бибарсов^{1,2✉}

¹ Военная академия связи, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

✉ bibarsovmr@rambler.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время одной из проблем при эксплуатации антенн для различных радиоэлектронных систем 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.

Цель работы. Исследование характеристик ВЩФАР при отказах ФВ, когда их фаза принимает значение, равное нулю, 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 исследования 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, найдены диапазоны изменения следующих характеристик: среднеквадратическое отклонение – от 0.064 до 0.18; относительные значения: ширина диаграммы направленности – от 8 до 18 %; уровень боковых лепестков – от 13 до 59 %; мощность излучения – от 0.9 до 0.3.

Заключение. Результаты исследований могут быть обобщены и использованы в радиоэлектронных системах с антенными решетками на этапе их разработки. Следующим направлением работы автор считает исследование влияния отказов ФВ с установлением фаз случайным образом и случайными значениями, а также варианта выхода из строя 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: 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

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.12.2023; принята к публикации после рецензирования 10.01.2024; опубликована онлайн 29.02.2024



Research into the Impact of Phase Shifter Failures on the Characteristics of Slotted Waveguide Array Antenna

Marat R. Bibarsov^{1,2✉}

¹Military Telecommunications Academy, St Petersburg, Russia

²Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

✉ bibarsovmr@rambler.ru

Abstract

Introduction. Currently, the impact of phase shifter (PS) failures on the characteristics of phased antenna arrays, slotted waveguide array antenna (SWAA) in particular, represents a significant problem. A review of publications shows that insufficient attention has been paid to PS failures.

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

Materials and methods. The methods of statistical modeling methods were used to study the impact of failures on SWA characteristics. Calculations were carried using the Mathcad 15 software package.

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

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

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

For citation: Bibarsov M. R. Research into the Impact of Phase Shifter Failures on the Characteristics of Slotted Waveguide 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

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

Submitted 04.12.2023; accepted 10.01.2024; published online 29.02.2024

Введение. Щелевые антенны (ЩА) применяются во многих радиоэлектронных системах: радиолокационной; спутниковой, радиорелейной и мобильной связи; беспроводной локальной сети; радиоастрономии. Такие излучатели, в отличие от вибраторных, являются невыступающими антеннами. Кроме того, возможность выполнения ЩА в плоскости металлической поверхности делает их чрезвычайно удобными для применения на подвижных объектах [1–5]. Для получения одностороннего излучения щель размещают над экраном или прорезают в волноводе. В этом случае ЩА имеет одностороннюю диаграмму направленности (ДН) с максимумом, ориентированным перпендику-

лярно плоскости щели, и нулевыми значениями поля вдоль оси щели. Входное сопротивление и коэффициент направленного действия полуволновой щели возрастают в 2 раза. При этом ЩА излучает электромагнитное поле линейной поляризации, а ориентация вектора напряженности электрического поля зависит от расположения щели на волноводе. Для формирования круговой поляризации поля излучатель выполняется из крестообразной щели [5, 6]. Однако такой излучатель как отдельная антенна (приемная или передающая) практически не применяется.

Широкое применение в радиоэлектронных комплексах различного назначения находят волноводно-щелевые фазированные антенные

решетки (ВЩФАР) [7–19]. Такие решетки, выполненные из волноводов, в которых прорезаны щели определенной формы, позволяют значительно увеличить коэффициент направленного действия. В прямоугольном волноводе, возбуждаемом основной волной H_{10} , щели прорезают на широкой или узкой стенке. В качестве примера в табл. 1 приведены параметры приемной и передающей ВЩФАР, применяемых в малогабаритных мобильных станциях спутниковой связи.

В зависимости от режима работы линии питания (волновода) можно получить синфазную многощелевую решетку. Для этого волновод должен работать в режиме стоячей волны (короткозамкнутая линия питания). В случае согласованной нагрузки волновод работает в режиме бегущей волны, а многощелевая решетка создает наклонное излучение (по типу антенны бегущей волны). На рис. 1, 2 представлены модели ВЩФАР синфазной и в режиме бегущей волны.

На рис. 1 введены обозначения: d – расстояние между щелями в ВЩФАР; Λ – длина волны в волноводе, определяемая как

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0/2a)^2}},$$

Табл. 1. Параметры приемной и передающей ВЩФАР
Tab. 1. Parameters of the receiving and transmitting SWAA

Параметры ВЩФАР	Прием	Передача
Диапазон частот, МГц	3635	5860
Число элементов	15	32
Поляризация	Круговая	Круговая
Коэффициент усиления, дБ	19	22
Ширина ДН $2\Delta\varphi(2\Delta\theta), \dots^\circ$	20(10)	15(7)
УБЛ, дБ	–10	–10
Добротность (G/T) , дБ/К	0	0

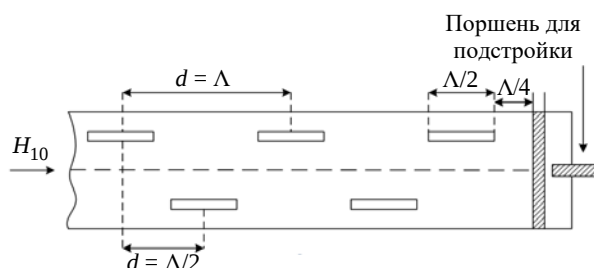


Рис. 1. Синфазная ВЩФАР

Fig. 1. Common-mode SWAA

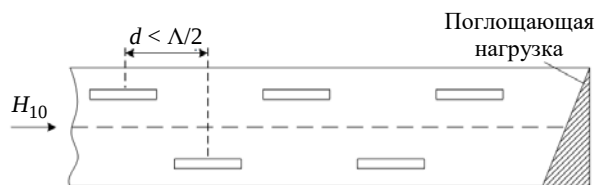


Рис. 2. ВЩФАР в режиме бегущей волны

Fig. 2. SWAA in the traveling wave mode

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве; a – длина широкой стенки прямоугольного волновода. Длина волны в волноводе несколько превышает длину волны в свободном пространстве, при этом справедливы следующие соотношения: $\beta = 2\pi/\Lambda = \xi k$; $\xi = c/v_{\text{ф}} = \lambda_0/\Lambda$, где β – коэффициент фазы; ξ – коэффициент укорочения волны; k – волновое число; c – скорость света; $v_{\text{ф}}$ – фазовая скорость волны.

На рис. 3, а, б представлена конструкция ВЩФАР для приемной системы наземного мобильного терминала (вид спереди и сзади) из 16×36 антенных элементов с габаритами $681 \times 242 \times 15$ мм [20]. Антенная система функционирует в диапазоне частот 10.6...12.8 ГГц. На рис. 3, б справа установлена плата малошумящих усилителей – фазовращателей (МШУ-Ф). Эта же плата со снятой экранирующей крышкой представлена на рис. 4.

В процессе функционирования ВЩФАР возможны случаи выхода из строя МШУ-Ф ли-

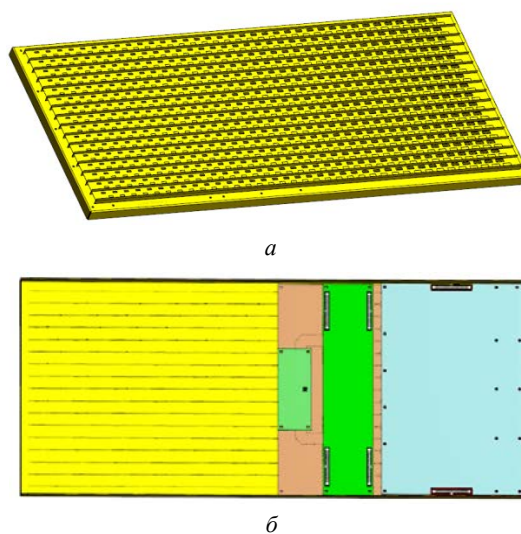


Рис. 3. ВЩФАР для приемной системы наземного мобильного терминала: а – вид спереди; б – вид сзади

Fig. 3. SWAA for the receiving system of a land mobile terminal: а – front view; б – rear view



Рис. 4. Плата питания МШУ-Ф со снятой экранирующей крышкой

Fig. 4. MShU-F board with the shielding cover removed

бо отдельно МШУ или фазовращателей (ФВ) в зависимости от конструктивных особенностей построения таких антенных систем и рабочего диапазона частот. Это, в свою очередь, негативно влияет на характеристики системы в целом. Анализ публикаций показывает, что ситуации выхода из строя указанных элементов рассмотрены не в полной мере и носят весьма ограниченный характер.

Целью настоящей статьи является исследование характеристик ВЦФАР при отказах ФВ, когда их фаза принимает значение, равное нулю, вместо требуемого значения.

Постановка задачи. Рассмотрим линейную эквидистантную ВЦФАР с линейным фазовым и равномерным амплитудным распределениями. ДН такой антенной решетки (АР) в плоскости, перпендикулярной оси волновода, как системы из N направленных излучателей определяется выражением [1–10]:

$$f(\theta) = f_1(\theta) f_n(\theta), \quad (1)$$

где $f_1(\theta)$ – ДН одиночной щели с односторонним излучением; $f_n(\theta)$ – множитель системы (решетки); θ – угол, отсчитываемый от направления перпендикуляра к линии расположения излучателей. Для многоэлементной антенны множитель $f_1(\theta)$ практически не влияет на общую ДН, которая в основном определяется вторым множителем в (1).

Функцию $f_n(\theta)$ запишем в виде соотношения

$$f_n(\theta) = \sum_{n=1}^N \exp[i(n-1)kd \sin \theta], \quad (2)$$

где i – мнимая единица; k – волновое число; d – расстояние между элементами (шаг линейной АР).

В результате применения формулы для суммы геометрической прогрессии ДН множителя линейной АР (2) из N одинаково ориентированных идентичных излучателей, расположенных на равных расстояниях d друг от друга (1), примет вид

$$f_n(\theta) = \frac{\sin \left[\frac{N}{2} (kd \sin \theta - \Psi) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (kd \sin \theta - \Psi) \right]}, \quad (3)$$

где Ψ – сдвиг по фазе между точками в соседних излучателях. Тогда нормированную ДН ВЦФАР определим следующим соотношением:

$$F(\theta) = \frac{\sin \left[\frac{N}{2} (kd \sin \theta - \Psi) \right]}{N \sin \left[\frac{1}{2} (kd \sin \theta - \Psi) \right]}. \quad (4)$$

Главный максимум ДН ориентирован в направлении θ_0 , для которого суммарный фазовый сдвиг

$$\Psi = kd \sin \theta_0. \quad (5)$$

С учетом (4), (5) выражение (3) для ДН принимает вид

$$F(\theta) = \frac{\sin \left[\frac{N}{2} (kd \sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{N \sin \left[\frac{1}{2} (kd \sin \theta - \sin \theta_0) \right]}, \quad (6)$$

где θ_0 – фиксированный угол, соответствующий направлению главного максимума ДН.

Предположим, произошел такой отказ ФВ, что фазы в них изменились с требуемых значений на $\varphi_n = 0$. В этом случае необходимо учесть влияние неисправных ФВ. Этот учет выражается в том, что производится вычитание излучения, которое отказавшие ФВ обеспечивали при установке фазы до наступления неисправности, и добавление излучения, которое они стали формировать при установке их фаз в нулевое значение. Вместе с тем необходимо учитывать местоположение каждого неисправного ФВ в ВЦФАР.

Алгоритм моделирования. Учитывая постановку задачи влияния отказов ФВ на характеристики волноводно-щелевой антенной ре-

Табл. 2. Исходные данные для моделирования

Tab. 2. Initial data for modeling

Параметры моделирования	Значение
Диапазон рабочих частот ($\Delta f_{\text{раб}}$), ГГц	5...5.750
Средняя частота ($f_{\text{ср}}$), ГГц	5.5
Волновой размер антенны L/λ (L – длина АР)	$\approx 180/(2\pi) = 30$
Расстояние между излучателями (d)	0.60λ (считаем, что $\lambda = \lambda$)
Количество излучателей (N)	$30/0.60 = 50$
$\theta_0, \dots^\circ$	20
Объем статистической выборки (N_B)	50
Количество отказов ФВ (M)	До $M < 35$
Сектор углов для расчетов	$-40^\circ < \theta < 40^\circ$
Мнимая единица	$i = \sqrt{-1}$

шетки, в статье описывается алгоритм статистического моделирования. Порядок его выполнения следующий:

1. Вводятся исходные данные в соответствии с табл. 2.

Выбор диапазона частот обусловлен применением его в радиосвязи и радиолокации.

2. Случайным образом разыгрывается выход из строя M ФВ. Для этого организуются циклы по перебору ФВ для получения случайных номеров неисправных ФВ в линейной АР:

– цикл по перебору всех элементов линейной антенной решетки;

– цикл по перебору количества неисправных ФВ;

– получение номеров отказавших ФВ антенных элементов.

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

$$F(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N \exp[i2kdn(\sin \theta - \sin \theta_0)]. \quad (7)$$

Выражение (7) с помощью формулы для суммы геометрической прогрессии преобразуется в (6).

При появлении отказов ФВ ДН рассчитывается по следующей формуле, которая учитывает место отказа ФВ и фазу, устанавливаемую равной 0:

$$F1(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N_B} [F(\theta) - \left\langle \sum_{p=0}^M \left\{ \exp \left[\frac{1}{N} i2kdm_{n,p} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right] \right\} \right\rangle] \frac{1}{N_B}, \quad (8)$$

где M – количество ФВ, вышедших из строя; $m_{n,p}$ – номера отказавших элементов; N_B – объем статистической выборки.

4. Пункты 2, 3 повторяются N_B раз.

5. Вычисляется среднее значение и дисперсия (среднеквадратичное отклонение – СКО) ДН:

$$\sigma(\theta) = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_B} F(\theta) - \left\langle \left\{ \sum_{p=0}^M \exp \left[\frac{1}{N} i2kdm_{n,p} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right] \right\}^2 \frac{1}{N_B} - F1(\theta)^2 \right\rangle^{1/2}}. \quad (9)$$

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

6. По вычисленным результатам в соответствии с (8), (9) строятся графики полученных функций.

Результаты моделирования. Исследования влияния отказов ФВ на характеристики ВЩФАР проводились на ЭВМ с помощью пакета прикладной математики Mathcad 15. Неисправность ФВ констатировалась по сбросу их фаз в ноль, вместо требуемых значений при линейном фазовом распределении.

Выбор места отказа или номера неисправного ФВ производился случайным образом. В ходе исследований вычислялись статистические значения основных параметров волноводно-щелевой фазированной АР, ширина ДН и уровень бокового лепестка, а также относительная мощность излучения в направлении максимального излучения θ_0 ($P_{\text{отн}}$) и СКО.

При проведении исследований моделировалось до 35 отказов ФВ из 50 с шагом 5 неисправностей. Соответствующие результаты показаны на рис. 5–12. Графики ДН и СКО представлены для 5, 10, 20 и 30 отказавших ФВ.

На рис. 5 представлены графики исходной ДН (пунктир) и средней ДН (сплошная) при отказе 5 ФВ. На этом и последующих графиках пунктирной линией обозначены исходные ДН, а сплошной – средние при отказе определенного количества ФВ.

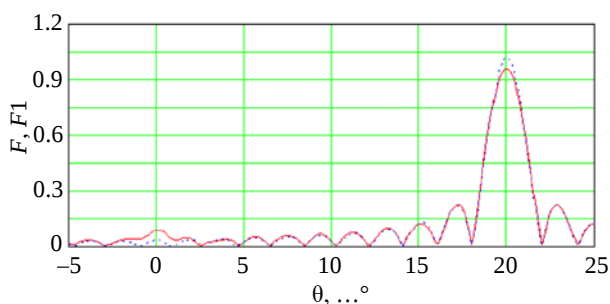


Рис. 5. Графики исходной ДН (пунктир) и средней ДН (сплошная) при отказе 5 ФВ

Fig. 5. Graphs of the initial AP (dotted line) and average AP (solid) with a failure of 5 PS

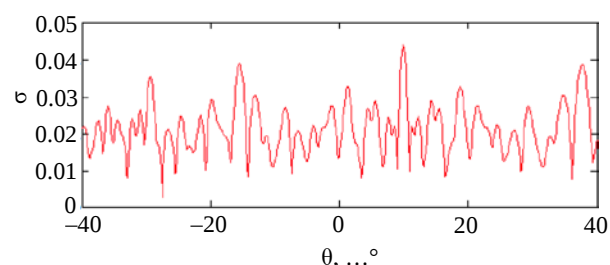


Рис. 6. График СКО ДН при отказе 5 ФВ

Fig. 6. SD of AP in case of failure of 5 PS

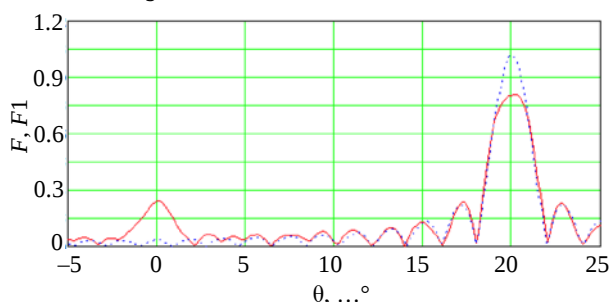


Рис. 7. Графики исходной ДН (пунктир) и средней ДН (сплошная) при отказе 10 ФВ

Fig. 7. Graphs of the initial AP (dotted line) and average RP (solid) with a failure of 10 PS

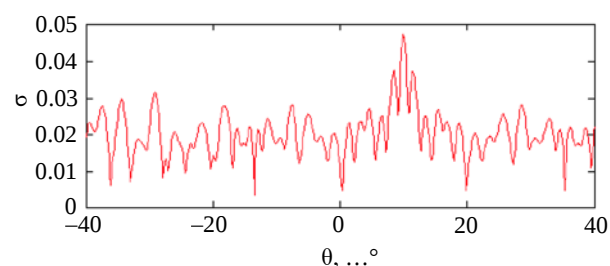


Рис. 8. График СКО ДН при отказе 10 ФВ

Fig. 8. SD of AP in case of failure of 10 PS

Рис. 6 иллюстрирует график СКО ДН при отказе пяти ФВ.

Из рис. 5 видно, что при отказе пяти ФВ ДН практически не меняется, наблюдается лишь уменьшение уровня главного лепестка ДН. При этом относительный уровень боковых лепест-

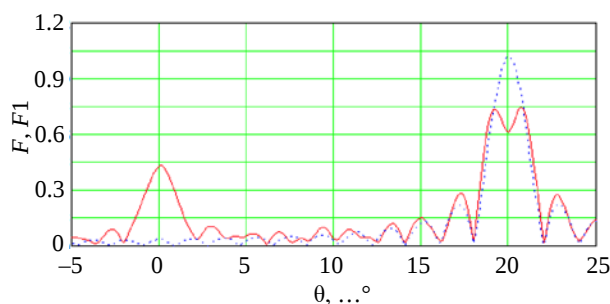


Рис. 9. Графики исходной ДН (пунктир) и средней ДН (сплошная) при отказе 20 ФВ

Fig. 9. Graphs of the initial AP (dotted line) and average RP (solid) with a failure of 20 PS

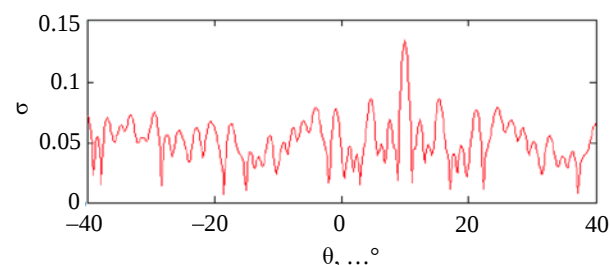


Рис. 10. График СКО ДН при отказе 20 ФВ

Fig. 10. SD of AP in case of failure of 20 PS

ков (УБЛ) составляет 13 %; относительная ширина ДН (ШДН) – 8 %; относительная мощность излучения в направлении максимального излучения θ_0 – 0.9; СКО не превышает 0.046.

На рис. 7 и 8 представлены такие же графики, но при отказе 10 ФВ.

При отказе 10 ФВ получены следующие результаты: относительный УБЛ составляет 16 %; относительная ШДН – 10 %; $P_{\text{отн}} = 0.82$; СКО не превышает 0.09.

Графики на рис. 9, 10 соответствуют случаю неисправности 20 ФВ со сбросом их фаз в ноль.

При этом получены следующие результаты: относительный УБЛ составляет 32 %; относительная ШДН – 13 %; $P_{\text{отн}} = 0.65$; СКО не превышает 0.12.

На рис. 11 и 12 представлены результаты моделирования отказов 30 ФВ в ВЦФАР.

Графики на рис. 11 и 12 обосновывают следующие полученные показатели: относительный УБЛ составляет 50 %; относительная ШДН – 16 %, $P_{\text{отн}} = 0.42$; СКО не превышает 0.17.

Вместе с тем все результаты моделирования отказов ФВ сведены в табл. 3, где представлены результаты исследований 50-элементной ВЦФАР при отказах до 35 ФВ излучателей. Здесь пока-

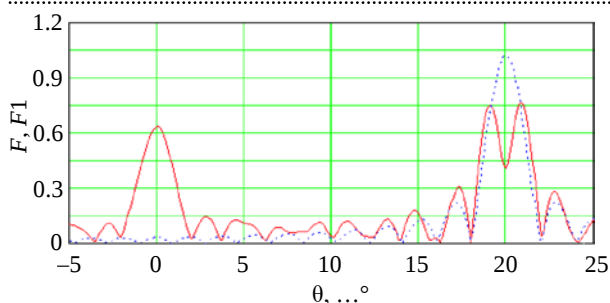


Рис. 11. Графики исходной ДН (пунктир) и средней ДН (сплошная) при отказе 30 ФВ

Fig. 11. Graphs of the initial AP (dotted line) and average RP (solid) with a failure of 30 PS

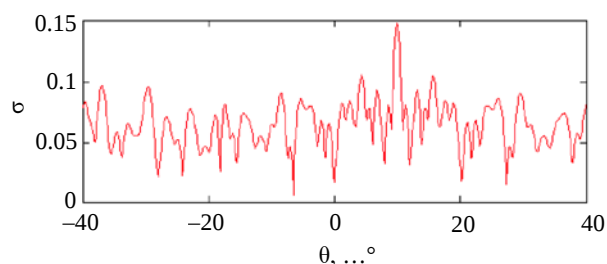


Рис. 12. График СКО ДН при отказе 30 ФВ

Fig. 12. SD of AP in case of failure of 30 PS

зана динамика изменения параметров рассмотренной линейной АР в этих условиях.

Приведем обобщенный анализ результатов моделирования:

- при изменении количества неисправных ФВ наблюдается искривление формы главного лепестка ДН;

- при увеличении количества неисправных ФВ от 1 до 15 происходит почти линейное падение мощности, излучаемой в направлении главного максимума, которое становится равным 0.82 от исходного значения при отказе 10 ФВ и 0.3 при отказе 35 ФВ;

- наблюдается появление второго максимума ДН в направлении, которое соответствует установке фазы в 0° , и достигающего уровня 0.5 относительно главного максимума при выходе из строя 17 ФВ и уровня 0.94 при отказе 35 ФВ;

- при отказе 12 ФВ появляется провал в ДН. При выходе из строя 30 ФВ провал дости-

гает значения 0.5 от главного максимума;

- при изменении количества неисправных ФВ происходит рост СКО от 0.04 при отказе 1 ФВ до 0.18 при отказе 35 ФВ.

Заключение. В ходе исследования проведен анализ построения и применения ЩА и ВЩФАР. Согласно постановке задачи исследования в линейной АР моделировалась такая ситуация, когда при отказах ФВ их фазы приобретают значение ноль 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 добавлением излучения, которое они стали формировать при установке их фаз в нулевое значение. 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 свою очередь, это позволило разработать алгоритм моделирования влияния отказов ФВ на характеристики ВЩФАР. В результате применения этого алгоритма рассчитаны и построены графики исходной ДН и средней ДН при разном количестве отказов элементов, а также графики СКО, оценивающие степень изменения значений ДН от реализации к реализации.

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.

Дальнейшие направления исследований автор связывает с рассмотрением вопросов компенсации искажений параметров и характеристик АР с использованием методов, рассмотренных в [21–24]. Кроме того, представляет интерес исследование

Табл. 3. Результаты моделирования отказов фазовращателей

Tab. 3. Results of modeling PS failures

Параметр	Количество неисправных ФВ						
	5	10	15	20	25	30	35
Относительный УБЛ, %	13	16	18	32	38	50	59
Относительная ШДН, %	8	10	11	13	15	16	18
Мощность излучения в θ_0	0.9	0.82	0.7	0.65	0.5	0.42	0.3
СКО	0.064	0.09	0.1	0.12	0.15	0.17	0.18

влияния отказов ФВ с установлением фаз случайным образом, а также вариант выхода из строя

ФВ, при котором мощность не проходит в излучатель, что выходит за рамки настоящей работы.

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. Виленский А. Р. Метод анализа пространственно-временных характеристик излучения печатных щелевых антенн бегущей волны // Наука и образование: науч. издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 5. С. 139–154. doi: 10.7463/0514.0710740
3. Данильчук В. И. Модельная задача расчета щелевой антенны под покрытием // Радиотехника. 2000. № 9. С. 12–15.
4. Раддиг Ю. Ю., Хаванова М. А., Мойсеев 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.
5. Математические методы прикладной электродинамики / С. Б. Раевский, Ю. Г. Белов, А. А. Денисенко и др. М.: Радиотехника, 2007. 88 с.
6. 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.
7. Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Разработка линейной эквивалентной волноводно-щелевой антенной решетки и анализ ее направленных свойств // Антенны. 2018. № 2. С. 15–20.
8. Milligan T. A. Modern Antenna design. N. J.: John Wiley & Sons, 2005. 630 p.
9. Balanis C. A. Modern antenna handbook. N. J.: John Wiley & Sons, 2008. 1704 p.
10. Levin B. Antenna Engineering Theory and Problems. Boca Raton: CRC Press, 2017. 406 p.
11. Пелевин А. О., Заргано Г. В., Вяткина С. В. Сравнительный анализ ФАР на прямоугольных и гребневых волноводах // Телекоммуникации. 2019. № 3. С. 22–28.
12. 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
13. 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
14. Elliott R. S. Antenna Theory & Design. Wiley-IEEE Press, 2003. 612 p.
15. Математическая модель антенно-волноводного тракта с разделением сигналов по частоте-поляризации / Д. Д. Габриэльян, 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
16. Пономарев Л. И., Степаненко В. И. Сканирующие многочастотные совмещенные антенные решетки. М.: Радиотехника, 2009. 328 с.
17. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием. М.: Сайнс-пресс, 2001. 232 с.
18. Пелевин А. О., Земляков В. В., Заргано Г. В. Исследование характеристик щелевой антенной решетки на основе П-волноводов // Антенны. 2018. № 3. С. 3–7.
19. 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
20. Пастернак Ю. Г. Разработка антенной решетки для мобильного терминала спутниковой связи. URL: <https://cchgeu.ru/upload/iblock/211/itogovyy-otchet-po-proektu-razrabotka-antennoy-reshetki-dlya-mobilnogo-terminala-sputnikovoy-svyazi.pdf> (дата обращения 01.11.2023)
21. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. М.: Сов. радио, 1970. 384 с.
22. Синтез амплитудно-фазового распределения в квазикоильцевой 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 авторе

Бибарсов Марат Рашидович – кандидат технических наук (1999), доцент (2007), старший преподаватель кафедры радиосвязи Военной академии связи (Санкт-Петербург), доцент кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 188 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: Bibarsovmr@rambler.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. Vilensky A. R. A Novel Approach for Space-Temporal Analysis of Tapered Slot Antenna. *Science and Education of the Bauman MSTU*. 2014, no. 5, pp. 139–154. (In Russ.)
3. Danilchuk V. I. Model Problem of Calculating a Slot-Left Antenna under a Coating. *Radio engineering*. 2000, no. 9, pp. 12–15. (In Russ.)
4. 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.)
5. 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.)
6. 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.)
7. 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.)
8. Milligan T. A. *Modern Antenna Design*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2005, 630 p.
9. Balanis C. A. *Modern Antenna Handbook*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2008, 1704 p.
10. Levin B. *Antenna Engineering Theory and Problems*. Boca Raton, CRC Press, 2017, 406 p.
11. 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.)
12. 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
13. 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
14. Elliott R. S. *Antenna Theory & Design*. Wiley-IEEE Press, 2003, 612 p.
15. 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.)
16. 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.)
17. Vendik O. G., Parnes M. D. [Antennы s elektricheskim skanirvaniem] *Antennas with Electrical Scanning*. Moscow, Science Press, 2001, 232 p. (In Russ.)
18. 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.)
19. 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
20. Pasternak Yu. G. Development of an Antenna Array for a Mobile Satellite Communication Terminal. Available at: <https://cchgeu.ru/upload/iblock/211/itogovyy-otchet-po-proektu-razrabotka-antennay-reshetki-dlya-mobilnogo-terminala-sputnikovoy-svyazi.pdf> (accessed 01.11.2023)
21. Shifrin Y. S. [Voprosy statisticheskoi teorii antenn] *Questions of statistical theory of antennas*. Moscow, Sov. radio, 1970, 384 p. (In Russ.)
22. Bibarsov M. R., Gribov E. V., Gabrielyan D. D., Fedorov Den. S., Fedorov Dan. S. Synthesis of Amplitude-Phase Distribution in Quasiconcave an Antenna Array. *J. 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. J. 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., Gabriel'yan 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 author

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. The author of 188 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: bibarsovmr@rambler.ru
