

Оценка состояния функционирования фазированной антенной решетки при нарушении работоспособности фазовращателей антенных элементов

М. Р. Бибарсов^{1,2✉}, А. Ф. Крячко¹, А. В. Пшеничников²

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

² Военная академия связи, Санкт-Петербург, Россия

✉ bibarsovmr@rambler.ru

Аннотация

Введение. Функционирование многоэлементных антенных систем, в частности волноводно-щелевых фазированных антенных решеток (ВЩФАР) со стабильными характеристиками, позволяет обеспечить требуемые показатели эффективности помехозащищенности и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств различного назначения. Однако случайный характер изменения фаз антенных элементов (АЭ) в результате неисправностей фазовращателей (ФВ) приводит к резкому ухудшению этих показателей. Поэтому оценка состояния функционирования ВЩФАР при выходе из строя ФВ с любым исходом является актуальной задачей и требует дальнейшего развития. В статье обобщены алгоритмы моделирования влияния отказов на характеристики ВЩФАР и приведены оценки состояния таких антенных систем при указанных неисправностях.

Цель работы. Разработка алгоритма влияния полного выключения ФВ на характеристики ВЩФАР, а также оценка состояния ВЩФАР при нарушении работоспособности ФВ АЭ с различным исходом.

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. Обобщены результаты моделирования 3 видов неисправностей, при которых устанавливались следующие параметры ФВ: фаза принимала значение, равное 0, вместо требуемого; фаза принимала случайное значение с дискретом 22.5° вместо требуемого; полное выключение ФВ. При исследовании до 35 неисправных ФВ АЭ из 50 элементов получено изменение следующих характеристик: среднеквадратичное отклонение – от 0.056 до 0.18; относительные значения: ширина диаграммы направленности – от 8 до 32 %; уровень боковых лепестков – от 13 до 78 %; мощность излучения – от 0.9 до 0.31. Сформирован диапазон состояний ВЩФАР при наступлении отказов ФВ: "нормальная работа" – до 7 неисправных ФВ; "ухудшение параметров" – от 7 до 12 неисправных ФВ; "отказ" – более 12 неисправных ФВ.

Заключение. Полученные результаты исследований могут быть обобщены и использованы в радиоэлектронных системах с антенными решетками на этапе их разработки. Дальнейшие направления исследований могут быть направлены на разработку методики эксплуатационного контроля состояния антенных систем, а также исследование компенсации искажений характеристик при их неисправностях.

Ключевые слова: волноводно-щелевая фазированная антенная решетка, фазовращатель, диаграмма направленности, среднеквадратичное отклонение, ширина диаграммы направленности, уровень боковых лепестков, мощность излучения, статистическое моделирование, оценка состояния функционирования ВЩФАР

Для цитирования: 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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.10.2024; принята к публикации после рецензирования 04.11.2024; опубликована онлайн 27.12.2024

Operation Evaluation of Phased Antenna Arrays in Case of Phase Shifter Malfunction

Marat R. Bibarsov^{1,2✉}, Alexander F. Kryachko¹, Alexander V. Pshenichnikov²

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

²Military Telecommunications Academy, St Petersburg, Russia

✉ bibarsovmr@rambler.ru

Abstract

Introduction. Stable operation of multi-element antenna systems, in particular waveguide-slotted phased antenna arrays (WSPAA), ensures the required noise immunity and electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment for various purposes. However, such performance indicators are subject to deterioration due to the random nature of changes in the phases of antenna elements (AE) under the action of malfunction of phase shifters (PS). Therefore, operation evaluation of WSPAAs in the event of PS failure with any outcome is an urgent research task. The paper reviews algorithms for modeling the impact of PS failures on WSPAAs and evaluates the operation of such antenna systems under these impacts.

Aim. Development of an algorithm for assessing the impact of a complete PS shutdown on WSPAA characteristics, as well as operation evaluation of WSPAAs in the event of PS malfunction with different outcomes.

Materials and methods. Statistical modeling methods were used to study the impact of PS failures on WSPAA characteristics. Calculations were carried out using in the Mathcad 15 software environment.

Results. The conducted simulation revealed three types of faults, for which the following PS parameters were set: the phase took a value equal to 0, instead of the required one; the phase took a random value with a discrete value of 22.5°, instead of the required one; complete switching off of the PS. When studying up to 35 faulty PS of an AE from 50 elements, the following characteristics were changed: standard deviation – from 0.056 to 0.18; relative values: radiation pattern width – from 8 to 32 %; level of side lobes – from 13 to 78 %; radiation power – from 0.9 to 0.31. A range of WSPAA states was formed upon the occurrence of PS failures: "Normal operation" – up to 7 faulty PS; "Deterioration of parameters" – from 7 to 12 faulty PS; "Failure" – more than 12 faulty PS.

Conclusion. The results obtained can be used when designing radio-electronic systems with antenna arrays. Future research should be aimed at developing a methodology for operational monitoring of the state of antenna systems, as well as studying the compensation of characteristic distortions in case of various malfunctions.

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

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

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

Submitted 02.10.2024; accepted 04.11.2024; published online 27.12.2024

Введение. Радиоэлектронные системы (РЭС) с многоэлементными антеннами, в частности волноводно-щелевыми фазированными антенными решетками (ВЩФАР), широко применяются в радиолокации, радиосвязи, радиоастрономии и т. д. [1–18]. Для эффективной работы таких систем необходимо преду-

смотреть выполнение ряда задач, из которых отдельно стоит отметить обеспечение электромагнитной совместимости и помехозащищенности РЭС. Эти задачи связаны с широким использованием различной радиоэлектронной аппаратуры, а следовательно, с ростом числа одновременно излучающих и приемных антенн, что

приводит к возникновению преднамеренных и непреднамеренных помех. Для обеспечения электромагнитной совместимости и помехозащищенности РЭС применяются помехоустойчивые сигнально-кодовые конструкции [19–23] либо антенны, имеющие возможно больший коэффициент усиления (КУ) и низкий уровень боковых лепестков (УБЛ) диаграммы направленности (ДН) [1–5].

Другой важнейшей задачей является снижение ошибок амплитудно-фазового распределения, возникающих на полотне ВЦФАР и значительно влияющих на потери потенциала в РЭС [24–27]. Такие ошибки могут возникать в том числе в результате нарушения работоспособности фазовращателей (ФВ) антенных элементов (АЭ) ВЦФАР. Это, в свою очередь, ухудшает электрические характеристики ВЦФАР: искажается ДН, увеличивается ширина ее главного лепестка (ширина диаграммы направленности – ШДН), увеличивается УБЛ, уменьшается коэффициент направленного действия (КНД), КУ, мощность излучения и др. В результате изменения требуемых характеристик, предъявляемых к ВЦФАР, ухудшаются показатели эффективности помехозащищенности и электромагнитной совместимости РЭС в целом. Анализ научной литературы показывает, что исследования в этом направлении требуют дальнейшего развития.

В [28, 29] разработаны алгоритмы влияния изменения фазирования АЭ на электрические параметры ВЦФАР в случаях, когда фаза неисправных ФВ становится равной нулю либо фаза в ФВ устанавливается случайным образом с дискретом

22.5° (далее – варианты 1 и 2). Полученные результаты сведены в табл. 1 и 2 соответственно [28–30].

В данной статье рассмотрим 3-й вариант выхода из строя ФВ, когда мощность не проходит в антенные элементы, а также обобщим результаты моделирования алгоритмов трех вариантов и проведем оценку состояния ВЦФАР в этих случаях.

Целью представленной статьи является разработка алгоритма влияния полного выключения ФВ на характеристики ВЦФАР, а также оценка состояния ВЦФАР при нарушении работоспособности ФВ АЭ с различным исходом.

Постановка задачи разработки алгоритма. Пусть произошла неисправность некоторого числа ФВ АЭ и при этом мощность не проходит в излучатель, т. е. излучатель просто перестает работать. В таком случае, чтобы учесть влияние неисправного ФВ, надо вычесть излучение, которое он давал при исправной работе, из исходного, без добавления другого излучения, при учете местоположения (номера излучателя) неисправного ФВ в полотне антенной решетки. Исходными параметрами моделирования алгоритма, как и в первых двух вариантах неисправностей, являются следующие:

- диапазон рабочих частот $\Delta f_{\text{раб}} = 5 \dots 5.750$ ГГц
- и, соответственно, диапазон длин волн $\Delta \lambda_{\text{раб}} = 5.21 \dots 6$ см;
- средняя частота $f_{\text{ср}} = 5.375$ ГГц и, соответственно, средняя длина волны $\lambda = 5.58$ см;
- волновой размер антенны $l/\lambda \approx 180/2\pi \approx 30$ (l – длина ВЦФАР);

Табл. 1. Результаты моделирования отказов ФВ для первого варианта

Tab. 1. Simulation results of phase shifter failures for the first option

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

Табл. 2. Результаты моделирования отказов ФВ для второго варианта

Tab. 2. Simulation results of phase shifter failures for the second option

Параметр	Количество неисправных 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

- расстояние между излучателями $d = 0.60\lambda$;
- количество излучателей $N = 30/0.60 = 50$;
- направление максимального излучения $\theta_0 = 20^\circ$;
- объем статистической выборки $N_B = 50$;
- количество отказов ФВ $M < 35$;
- сектор углов для расчетов $-40^\circ < \theta < 40^\circ$;
- волновое число $k = 2\pi/\lambda$;
- мнимая единица $i = \sqrt{-1}$.

Исходные данные выбраны из соображений применения их в РЭС радиосвязи и радиолокации.

Алгоритм моделирования. Для достижения поставленной цели с учетом постановки задачи в статье представлена процедура моделирования влияния полного отключения ФВ АЭ на электрические характеристики ВЩФАР. Пошаговая последовательность выполнения алгоритма заключается в следующем.

На первом шаге вводятся перечисленные исходные параметры.

На втором шаге организуются циклы определения случайным образом методом перебора: всех элементов линейной ВЩФАР; количества дефектных ФВ. Таким образом, формируются номера неисправных ФВ АЭ, т. е. их место в ВЩФАР.

На третьем шаге в соответствии с формулой

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

вычисляются значения исходной нормированной характеристики направленности (функции направленности) при отсутствии неисправностей.

На четвертом шаге определяем значения нормированной характеристики направленности, когда мощность не проходит в АЭ, функция которой имеет вид

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

Выражение (2) позволяет учитывать номер ФВ $m_{n,p}$ в линейке антенных элементов ВЩФАР.

На пятом шаге для расширения статистической выборки вычисления шагов 2 и 3 повторяются N_B раз.

На шестом шаге вычисляется среднее значение нормированной характеристики направленности и среднееквадратичное отклонение (СКО) этой функции при неисправностях ФВ АЭ в соответствии с выражением

$$\sigma(\theta) = \left\langle \sum_{n=1}^{N_B} \left\{ F(\theta) - \sum_{p=0}^M \exp \left[\frac{1}{N} i2kdm_{n,p} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right] \right\}^2 \frac{1}{N_B} - F1(\theta)^2 \right\rangle^{1/2}. \quad (3)$$

Алгоритмический процесс заканчивается седьмым шагом, в ходе которого для разного количества дефектных ФВ по (2) для определения функции направленности и (3) для вычисления СКО генерируются графические изображения нормированных ДН и их СКО.

Таким образом, соотношения (1)–(3) полностью формируют разработанный алгоритм, позволяющий определить основные электрические характеристики ВЩФАР, когда мощность не проходит в АЭ.

Результаты моделирования алгоритма. В соответствии с представленным алгоритмом построены графики исходных нормированных ДН, средних ДН при отключении ФВ, когда мощность не проходит в АЭ, и СКО этих ДН (рис. 1–8). Статистическое моделирование выполнено для случаев до 35 дефектных ФВ поэтапно через 5 ФВ из 50.

На рис. 1–4 изображены графики функции направленности при исправной работе ВЩФАР и после наступления неисправностей 5, 10, 20 и 30 ФВ, когда мощность не проходит в АЭ. На этих графиках сплошной линией представлены ДН при наступлении дефекта ФВ, пунктирной линией – при полностью исправной работе ВЩФАР.

На рис. 5–8 изображены СКО исходной функции направленности от ее средней при неисправности указанного количества ФВ, соответствующие графикам на рис. 1–4.

Графики на рис. 1–8 позволяют сделать следующие выводы. Как и в первом и втором вариантах, исходная нормированная функция направленности и ее средние значения при дефектах ФВ, когда мощность излучения не проходит в АЭ, остаются такими же; происходит

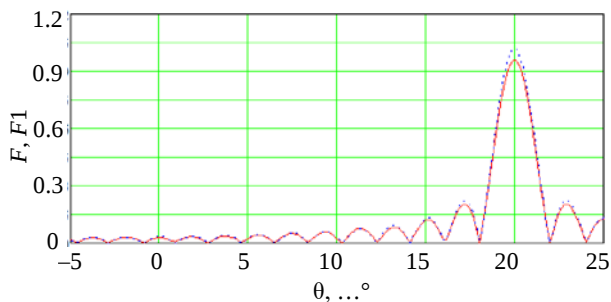


Рис. 1. Графики исходной (пунктир) и средней (сплошная) ДН при отказе 5 ФВ

Fig. 1. Graphs of initial (dotted line) and average (solid) RP with a failure of 5 PS

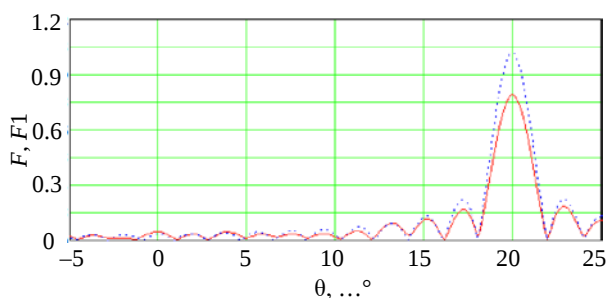


Рис. 2. Графики исходной (пунктир) и средней (сплошная) ДН при отказе 10 ФВ

Fig. 2. Graphs of initial (dotted line) and average (solid) RP with a failure of 10 PS

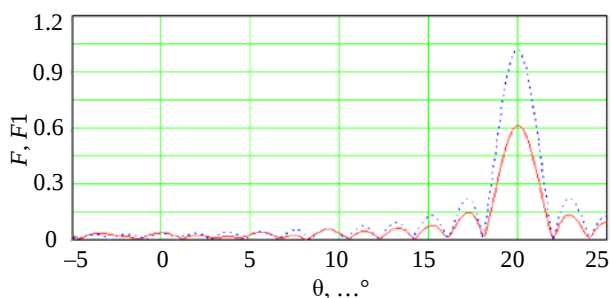


Рис. 3. Графики исходной (пунктир) и средней (сплошная) ДН при отказе 20 ФВ

Fig. 3. Graphs of initial (dotted line) and average (solid) RP with a failure of 20 PS

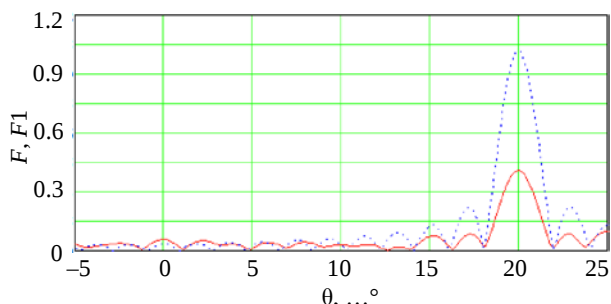


Рис. 4. Графики исходной (пунктир) и средней (сплошная) ДН при отказе 30 ФВ

Fig. 4. Graphs of initial (dotted line) and average (solid) RP with a failure of 30 PS

искривление формы главного максимума ДН так же, как и в первых двух вариантах; с увели-

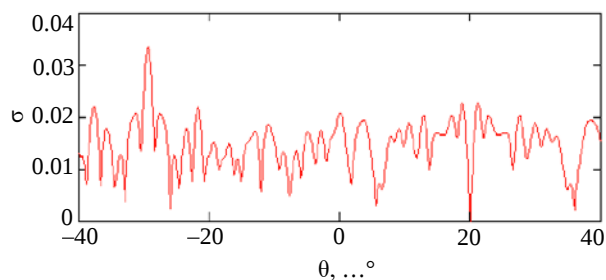


Рис. 5. График СКО ДН при отказе 5 ФВ

Fig. 5. Graph of SD of RP for failure of 5 PS

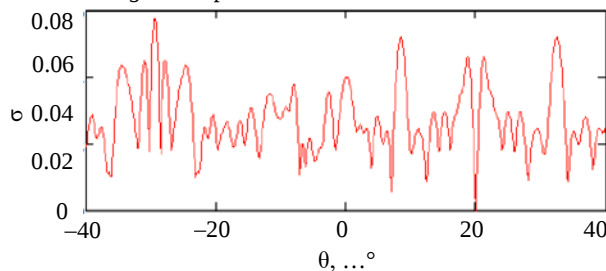


Рис. 6. График СКО ДН при отказе 10 ФВ

Fig. 6. Graph of SD of RP for failure of 10 PS

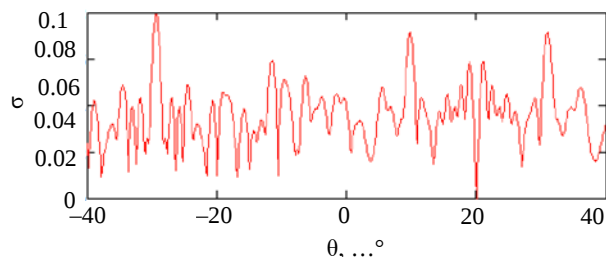


Рис. 7. График СКО ДН при отказе 20 ФВ

Fig. 7. Graph of SD of RP for failure of 20 PS

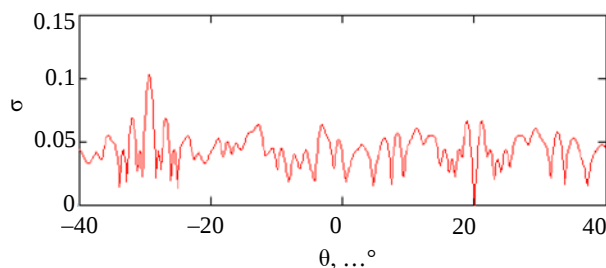


Рис. 8. График СКО ДН при отказе 30 ФВ

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

чением количества дефектных ФВ уменьшается относительная излучаемая мощность от 90 до 30 %; второй максимум нормированной функции направленности не появляется; при наступлении неисправностей провалы функции направленности отсутствуют; относительный УБЛ растет с 14 до 78 %; относительная ШДН увеличивается с 8 до 30 %; СКО увеличивается с 0.056 до 0.12.

Все результаты моделирования отказов ФВ сведены в табл. 3, где представлены результаты исследования 50-элементной ВЦФАР при неисправностях до 35 ФВ АЭ.

Табл. 3. Результаты моделирования отказов ФВ для третьего варианта

Tab. 3. Simulation results of phase shifter failures for the third option

Параметр	Количество неисправных ФВ						
	5	10	15	20	25	30	35
Относительный УБЛ, %	14	29	40	44	60	67	78
Относительная ШДН, %	8	12	14	15	19	23	30
Мощность излучения в θ_0 , %	0.9	0.82	0.71	0.6	0.5	0.43	0.3
СКО	0.056	0.061	0.079	0.09	0.1	0.11	0.12

Оценка состояния ВЦФАР. Обобщение и анализ алгоритмов моделирования неисправностей ФВ АЭ ВЦФАР показывает следующие результаты для всех трех вариантов: основной лепесток функции направленности расширяется, и уменьшается его максимальное значение; УБЛ увеличивается с образованием общего фона негативного бокового излучения; в соответствии с изменениями ДН происходят изменения во времени всех электрических характеристик ВЦФАР. Следует также отметить, что влияние дефектных ФВ во всех трех вариантах определяется местоположением АЭ на раскрытие ВЦФАР.

На рис. 9–12 представлены сравнительные графики зависимостей УБЛ ДН, ШДН ($2\Delta\theta$), мощности излучения ($P_{\text{изл}}$) в направлении главного максимума, СКО ДН, соответственно, от количества неисправных фазовращателей для 1, 2 и 3-го вариантов неисправностей.

Для оценки состояний ВЦФАР при эксплуатации, когда ее состояние оценивается по количеству дефектных ФВ АЭ, необходимо сформировать функциональные взаимозависимости электрических характеристик и количества неисправных ФВ АЭ. При этом АЭ считается неисправным с любым из трех вариантов дефекта ФВ АЭ.

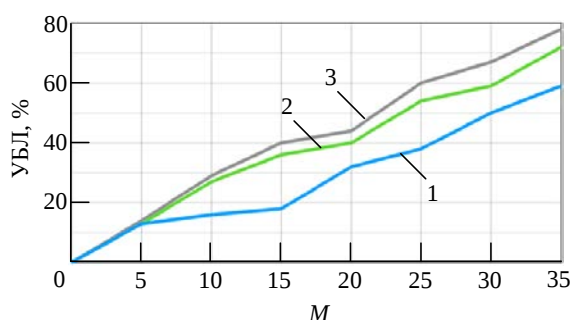


Рис. 9. Графики зависимостей УБЛ ДН от количества неисправных ФВ для 1, 2 и 3-го вариантов неисправностей
Fig. 9. Dependence of the SLL RP on the number of faulty PS for 1, 2, and 3 fault variants

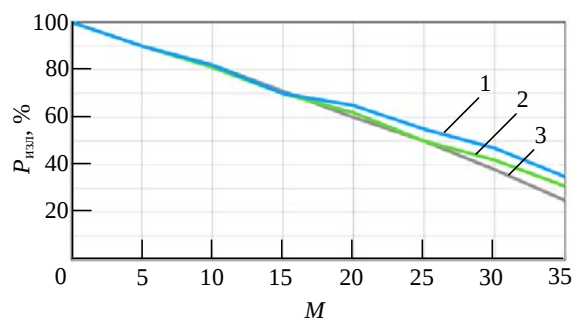


Рис. 11. Графики зависимостей мощности излучения в направлении главного максимума ДН от количества неисправных ФВ для 1, 2 и 3-го вариантов неисправностей
Fig. 11. Dependencies of radiation power in the direction of the main maximum RP on the number of faulty PS for 1, 2, and 3 fault variants

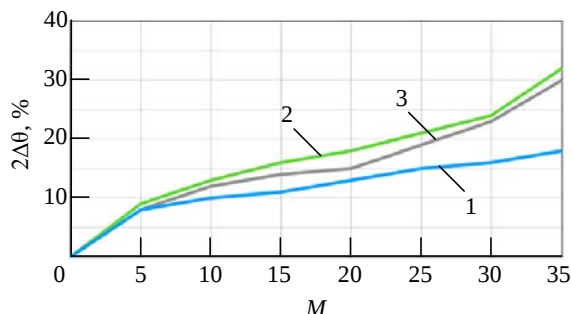


Рис. 10. Графики зависимостей ШДН от количества неисправных ФВ для 1, 2 и 3-го вариантов неисправностей

Fig. 10. Dependence of the RP width on the number of faulty PS for 1, 2, and 3 fault variants

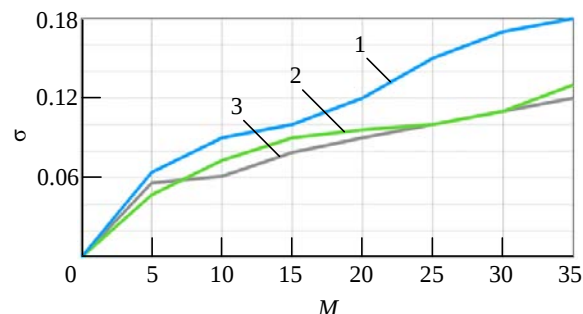


Рис. 12. График зависимости СКО ДН в зависимости от количества неисправных ФВ для 1, 2 и 3-го вариантов неисправностей

Fig. 12. Dependence of the SD of the RP on the number of faulty PS for 1, 2, and 3 fault variants

Табл. 4. Количество отказов ФВ
для оценки состояния ВЦФАР

Tab. 4. Number of PS failures
for assessing WSPAA operation

Количество отказов ФВ	Вариант	Параметр		
		ШДН	УБЛ	$P_{\text{отн}}$
при котором параметр изменяется на 20 %	1	–	16	11
	2	23	7	10
	3	26	7	10
при котором параметр изменяется на 30 %	1	–	19	17
	2	33	12	14
	3	35	13	14

Оценка состояния антенной системы осуществляется путем измерения основных параметров. В сложных ВЦФАР имеется система контроля, которая позволяет установить число отказавших элементов и их координаты.

По количеству отказавших элементов можно приблизительно оценить изменение выходных параметров, однако система контроля ВЦФАР не позволяет обнаружить механические повреждения, такие как перекосы арматуры, смещение облучателей и др. Поэтому основным методом оценки состояния антенных систем является экспериментальный. На позиции без демонтажа антенны возможно измерить ДН, коэффициент усиления, поляризационные диаграммы, коэффициент стоячей волны волнового тракта, смещение равнотензорного направления. Оценка состояния антенной системы осуществляется сравнением измеренных параметров исправной и настроенной антенны с параметрами, измеренными при данном состоянии.

Определим диапазон состояний системы при наступлении отказов ФВ: нормальная работа системы будет происходить при ухудшении параметров в диапазоне от 0 до 20 %; значение "ухудшение параметров" – в диапазоне от 20 до 30 % и, соответственно, "отказ" – при ухудшении параметров более 30 %. Количество отказов ФВ, соответствующее этим значениям, сведено

Табл. 5. Диапазон состояний ВЦФАР
при наступлении отказов ФВ

Tab. 5. WSPAA operation states
upon occurrence of PS failures

Состояние ВЦФАР	Количество неисправных ФВ
Нормальная работа	0...7 неисправных ФВ
Ухудшение параметров	7...12 неисправных ФВ
Отказ	Более 12 неисправных ФВ

в табл. 4, где по горизонтали указаны параметры, ухудшение которых происходит, а по вертикали отложено значение изменения параметра для каждого варианта отказа.

В табл. 4 знак "–" означает, что данное значение ухудшения параметра наступает при отказе более, чем 35 ФВ.

Таким образом, получим диапазон состояний ВЦФАР при наступлении отказов ФВ, сведенный в табл. 5.

Получив соответствие между состоянием системы и количеством неисправных ФВ, можно провести их эксплуатационный контроль.

Заключение. В настоящей статье разработан алгоритм влияния неисправностей ФВ на электрические характеристики ВЦФАР при полном выключении ФВ из высокочастотного тракта. Приведен сравнительный анализ результатов данной работы с результатами, полученными в [28–30]. Всего проводилось моделирование 3 видов неисправностей, при которых устанавливались следующие параметры ФВ: фаза принимала значение, равное 0, вместо требуемого; фаза принимала случайное значение с учетом дискрета ФВ вместо требуемого; происходил отказ при полном выключении ФВ из работы. Были получены результаты оценки состояния ВЦФАР при указанных неисправностях, которые могут быть использованы в РЭС на этапе их разработки. Исследования неисправностей и оценки состояния ВЦФАР в статье проводились с помощью прикладного математического пакета Mathcad 15.

Дальнейшие направления исследований могут быть направлены на разработку методики эксплуатационного контроля состояния антенных систем, а также исследование компенсации искажений характеристик при их неисправностях.

Список литературы

1. Устройства СВЧ и антенны / Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В. М. Максимов, Л. И. Пономарев; под ред. Д. И. Воскресенского. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.

2. Воскресенский Д. И., Котов Ю. В., Овчинникова Е. В. Тенденции развития широкополосных фазированных антенных решеток (обзор работ) // Антенны. 2005. № 11 (102). С. 7–21.

3. Григорьев Л. Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. М.: Радиотехника, 2010. 144 с.
4. Хансен Р. С. Фазированные антенные решетки. 2-е изд. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
5. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. 3rd ed. N. J.: John Wiley & Sons, 2005. 1136 p.
6. 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.
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. 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. 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
18. 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 06.05.2024).
19. Прокис Дж. Цифровая связь / пер. с англ. под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь. 2000. 800 с.
20. Манаенко С. С., Дворников С. В., Пшеничников А. В. Теоретические аспекты формирования сигнальных конструкций сложной структуры // Информатика и автоматизация. 2022. Т. 21, № 1. С. 68–94. doi: 10.15622/ia.2022.21.3
21. Анализ потерь помехоустойчивости в условиях медленных замираний / А. А. Русин, М. Р. Бибарсов, Б. А. Аюков, Д. Ю. Гордиенко, С. А. Лященко, С. В. Дворников, А. А. Устинов // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2022. № 1. С. 81–85.
22. Теоретические предложения по повышению помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов в каналах с переменными параметрами / С. В. Дворников, А. В. Пшеничников, А. Ф. Крячко, М. Р. Бибарсов, Г. Ш. Бибарсова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 2. С. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-6-15
23. Научно-технические предложения по повышению помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов в каналах с переменными параметрами / М. Р. Бибарсов, С. В. Дворников, А. Ф. Крячко, А. В. Пшеничников // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 6. С. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-6-15
24. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. М.: Сов. радио, 1970. 384 с.
25. Синтез амплитудно-фазового распределения в квазиколецевой антенной решетке / М. Р. Бибарсов, Е. В. Грибанов, Д. Д. Габриэлян, Ден. С. Федоров, Дан. С. Федоров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. Вып. 2. С. 28–33.
26. Влияние локально плоских искажений излучающего раскрыва на диаграмму направленности фазированной антенной решетки / М. Р. Бибарсов, Г. Ш. Бибарсова, Д. Д. Габриэлян, 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
27. Влияние ошибок формирования амплитудно-фазового распределения в раскрыве фазированной антенной решетки на точность пеленгации / М. Р. Бибарсов, Г. Ш. Бибарсова, Д. Д. Габриэлян, В. Н. Шацкий // Информация и космос. 2023. № 2. С. 18–23.
28. 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
29. 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
30. Крячко А. Ф., Бибарсов М. Р., Аюков Б. А. Алгоритм моделирования изменения характеристик волноводно-щелевой антенной решетки при неисправностях фазовращателей // Тр. междунар. симп. "Надежность и качество", Пенза, 27 мая – 1 июня 2024 / Пензенский гос. ун-т. 2024. Т. 2. С. 472–474.

Информация об авторах

Бибарсов Марат Рашидович – кандидат технических наук (1999), доцент (2007), старший преподаватель кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, доцент кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 197 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

Крячко Александр Федотович – доктор технических наук (2005), профессор (2008), заведующий кафедрой радиосвязи радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 201 научной работы. 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>

Пшеничников Александр Викторович – доктор технических наук (2018), профессор (2022), начальник кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Автор 141 научной работы. Сфера научных интересов – радиотехника; системы передачи и приема информации; сигнально-кодовые конструкции.

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

E-mail: practicdsv@yandex.ru

References

1. Voskresensky D. I., Gostyukhin V. L., Maksimov V. M., Ponomarev L. I. *Ustrojstva SVCh i anten* [Microwave Devices and Antennas]. Ed. by D. I. Voskresensky. 2nd ed. Moscow, *Radiotekhnika*, 2006, 376 p. (In Russ.)
2. Voskresensky D. I., Kotov Yu. V., Ovchinnikova E. V. Trends in the Development of Broadband Phased Antenna Arrays (review of works). *Antenna*. 2005, no. 11 (102), pp. 7–21. (In Russ.)
3. Grigoriev L. N. *Cifrovoe formirovanie diagrammy napravlenosti v fazirovannykh antennykh reshetkakh* [Digital Beamforming in Phased Antenna Arrays]. Moscow, *Radiotekhnika*, 2010, 144 p. (In Russ.)
4. Hansen R. S. *Phased Antenna Arrays*. 2nd ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2009, 551 p.
5. Balanis C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3rd ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2005, 1136 p.
6. 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.)
7. Koshkidko V. G., Migalin M. M. Design and Investigation of a Linear Equidistant Slotted Waveguide Antenna. *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. Levin B. *Antenna Engineering Theory and Problems*. Boca Raton, CRC Press, 2017, 406 p.
10. Pelevin A. O., Zargano G. V., Vyatkinsa 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. *Skaniruyushchie mnogochastotnye sovmeshchennye antennye reshetki* [Scanning Multi-Frequency Combined Antenna Arrays]. Moscow, Radio engineering, 2009, 328 p. (In Russ.)
16. Vendik O. G., Parnes M. D. [Antennы s elektricheskimi skanirovaniem] Antennas with Electrical Scanning. Moscow, Science Press, 2001, 232 p. (In Russ.)
17. 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
18. 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 06.05.2024).

19. Proakis J. Digital Communication. New York, McGraw-Hill, 2000, 905 p.
20. Manaenko S. S., Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V. Theoretical Aspects in Forming Complex Structure Signal. Informatics and Automation. 2022, vol. 21, no. 1, pp. 68–94. doi: 10.15622/ia.2022.21.3
21. Rusin A. A., Bibarsov M. R., Ayukov B. A., Gordienko D. Yu., Lyashchenko S. A., Dvornikov S. V., Ustinov A. A. Analysis of Immunity Losses Under Slow Fading. Radio Electronics Issues. The TV Technique Series. 2022, no. 1, pp. 81–85. (In Russ.)
22. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Kryachko A. F., Bibarsov M. R., Bibarsova G. Sh. Theoretical Proposals for Improving the Noise Immunity of Receiving Multi-Position Signals in Channels with Variable Parameters. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 2, pp. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-6-15 (In Russ.)
23. Bibarsov M. R., Dvornikov S. V., Kryachko A. F., Pshenichnikov A. V. Scientific and Technical Proposals for Improving the Noise Immunity of Receiving Multi-Position Signals in Channels with Variable Parameters. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 2, pp. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-6-15 (In Russ.)
24. Shifrin Y. S. [Voprosy statisticheskoi teorii antenn] Questions of statistical theory of antennas. Moscow, Sov. radio, 1970, 384 p. (In Russ.)
25. Bibarsov M. R., Gribanov 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.)
26. Bibarsov M. R., Bibarsova G. Sh., Gabrielyan 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.)
27. 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.
28. Bibarsov M. R. Research into the Impact of Phase Shifter Failures on the Characteristics of Slotted Waveguide Array Antenna. J. 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.)
29. Kryachko A. F., Gladkiy N. A., Bibarsov M. R., Ayukov B. A. Algorithm for Assessing the Characteristics of a Waveguide Slot Antenna Array when Changing Antenna Element Phasing. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 3, pp. 42–51. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-42-51 (In Russ.)
30. Kryachko A. F., Bibarsov M. R., Ayukov B. A. Algorithm for Modeling Changes in the Characteristics of a Waveguide-Slot Antenna Array in Case of Phase Shifter Failures. Proc. of the Intern. Symp. "Reliability and Quality", Penza, 27 May – 1 June 2024. Penza State University, 2024, vol. 2, pp. 472–474. (In Russ.)

Information about the authors

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 197 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

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 201 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>

Alexander V. Pshenichnikov, Dr Sci. (Eng.) (2018), Professor (2022), Head of the Department of the Radio Communication Department of the Military Telecommunications Academy. The author of 141 scientific publications. Area of expertise: radio technology; information transmission and reception systems; signal-code structures. Address: Military Telecommunications Academy, 3, Tikhoretsky Ave., St Petersburg 194064, Russia
E-mail: practicsv@yandex.ru