

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОКИ. Н. Карцан^{1*}, С. В. Ефремова¹, Е. А. Шангина², А. И. Логачева³, Е. С. Горев⁴¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

³Штаб материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации

Российская Федерация, 119160, г. Москва, переулок Большой Козловский, 6

⁴Войсковая часть 40056

Российская Федерация, 125413, г. Москва, ул. Онежская, 26а

*E-mail: kartsan2003@mail.ru

Особенностью настоящего времени является переход к созданию многофункциональных комплексов наземных и бортовых радиотехнических систем на основе новых технических решений, повышающих уровень функциональной интеграции аппаратуры, в том числе путем внедрения в них активных фазированных антенных решеток (АФАР). В зависимости от решаемых задач такие антенные системы содержат от сотен до нескольких тысяч активных модулей (АМ). В связи с этим вероятность выхода из строя (отказов) АМ, по сравнению с пассивной фазированной антенной решеткой, повышается. Соответственно, встают вопросы обеспечения работоспособности АФАР в подобных условиях. Рассмотрено влияние рабочей температуры на характеристики излучения активной фазированной антенной решетки, размещаемой на космическом аппарате.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка, отказы активных элементов, диаграмма направленности.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 575–579

OPERATING TEMPERATURE AND ITS INFLUENCE ON THE RADIATION OF PHASED ANTENNA ARRAYSI. N. Kartsan^{1*}, S. V. Efremova¹, E. A. Shangina², A. I. Logacheva³, Y. S. Gorev⁴¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”

52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

³Headquarters of material and technical support of the Armed Forces of the Russian Federation

6, Bolshoy Kozlovsky lane, Moscow, 119160, Russian Federation

⁴Military Unit Office 40056

26a, Onezhskaya Str., Moscow, 125413, Russian Federation

*E-mail: kartsan2003@mail.ru

A current mainstream phenomenon is the design of ground based and onboard multifunctional radio electronics complexes, which are based on new technical solutions, including the application of active phased antenna arrays. This boosts the functional integration of the system equipment. Depending on the tasks, such antenna systems contain from hundreds to several thousand active modules. In this regard, the probability of failure of the active module drastically increases in comparison with the passive phased array. In these circumstances, ensuring the efficiency of active phased antenna arrays is a paramount task. In this paper we discuss the influence of operating temperature on the radiation characteristics in active phased antenna arrays onboard spacecraft.

Keywords: active phased antenna array, failures of active elements, radiation pattern.

Введение. Целесообразность построения того или иного вида передающего устройства во многом обуславливается его энергетическими характеристиками. Как правило, подобное устройство, особенно в системах с ограниченными источниками энергии, должно обеспечивать заданную излучаемую мощность при максимуме коэффициента полезного действия (КПД).

Активные фазированные антенные решетки (АФАР) описываются в основном теми же параметрами, что и антенны других типов. Они также обладают диаграммой направленности (ДН), уровнем боковых лепестков, коэффициентом направленного действия, коэффициентом усиления (КУ), излучаемой мощностью, диапазоном рабочих частот и другими величинами. Но, как правило, обычно используемый параметр – коэффициент усиления фактически непригоден для АФАР из-за наличия в схеме антенны активных элементов [1].

АФАР как передающее устройство не просто генерирует и излучает мощность в определенном направлении, но и максимально концентрирует ее в заданной части пространства, т. е. гарантирует максимум КУ [1].

В отличие от пассивных, активным фазированным антенным решеткам присущи дополнительные источники погрешностей сигналов возбуждения излучателей за счет присутствия в каждом канале решетки активных модулей (АМ), характеристики которых в каждый момент времени различны из-за воздействия дестабилизирующих факторов и непохожести их электрических параметров. Возникающие при этом искажения энергетического спектра ухудшают параметры радиоэлектронных комплексов и в первую очередь тех, где критериями качества генерируемых и излучаемых сигналов являются высокая степень монохроматичности колебаний и низкий уровень побочного излучения. Все рассмотренные выше обстоятельства определяют основные отличия расчета характеристик АФАР от иных типов антенн [1; 2].

Важным условием при создании современных спутниковых систем на базе АФАР является конечная стоимость продукции. Способом решения такой проблемы является применение интенсивно развивающейся теории численных методов, использование новых технологий проектирования и изготовления, а также устройств СВЧ, теплового обмена и несущей конструкции АФАР. При этом в классической постановке задача синтеза не дает ответа на вопрос о способе реализации АФАР. Это вызывает необходимость постановки новых, практически значимых задач параметрического и конструктивного синтеза, которые и определяют требуемые конечные характеристики АФАР. При этом АФАР представляет собой совокупность малых антенных систем с содержанием от нескольких десятков до нескольких сотен и даже тысяч активных модулей, которые с некоторой вероятностью могут выходить из строя [3]. В подобных условиях работы, тем более на орбите, когда нет возможности провести физическую замену отказавшего канала, необходимо четко представлять, к каким последствиям приведет отказ одного, двух и даже 20 % каналов усиления.

Сегодня режимы работы АФАР, размещаемых на космических аппаратах как ближнего, так и дальнего космоса, в значительной степени зависят от режимов работы систем обеспечения теплового режима (СОТР), так как известно, что работа таких сложных систем, как АФАР, связана с необходимостью отвода значительных плотностей потоков теплоты при воздействии внешних факторов космического пространства и собственных факторов работы устройств АФАР в режимах с высокими тепловыми нагрузками. Функционирование, надежность и управление комплектом электронных блоков (КЭБ) АФАР существенно зависит от СОТР, которые позволяют решить задачу температурной стабилизации и управления режимами КЭБ. Однако сбои в работе СОТР могут привести к отказам передающих (или приемно-передающих) АМ КЭБ. Знание характеристик направленности АФАР в таких сложных режимах работы с отказавшими АМ КЭБ позволит более эффективно управлять лучом при сканировании, заранее заложить компенсационные механизмы [3–5].

Электродинамический расчёт характеристик излучения АФАР дает возможность оценить изменение характеристик излучения АФАР при отказах каналов усиления, а также выявить влияние фазовых ошибок на характеристики излучения. Таким образом, в результате испытаний АФАР были получены экспериментальные данные, сравнение с которыми результатов расчётов позволяет дополнительно оценить адекватность полученных теоретических результатов.

Изменения характеристик АФАР, обусловленные отказами модулей, могут быть описаны статистическими методами. Средняя ДН по мощности системы из N излучателей имеет вид

$$\overline{|F(\vec{k}, \vec{k}_0)|^2} = \overline{|f(\vec{k})|^2} \left[\sum_{n=1}^N I_n (1 + A_n) e^{i(\vec{k} - \vec{k}_0, \vec{r}_n)} e^{i\Phi_n} \right]^2, \quad (1)$$

где $\vec{k}$ – волновой вектор, направленный в точку наблюдения; $\vec{k}_0$ – волновой вектор, направленный в точку фазирования системы; $\overline{|f(\vec{k})|^2}$ – средняя ДН излучателя по мощности; $\vec{r}_n$ – вектор, задающий положение n -го излучателя; I_n – детерминированная часть амплитуды возбуждения n -го излучателя; A_n , Φ_n – случайные амплитудная и фазовая ошибки возбуждения n -го излучателя. Соотношение позволяет с помощью усреднения по ансамблю реализаций случайных ДН АФАР найти зависимости ее параметров от параметров случайных амплитудно-фазовых ошибок [6–8].

Если амплитудные и фазовые ошибки в каналах независимы и малы, т. е. имеют нулевые средние значения и малую дисперсию $\alpha = (\overline{A_n^2} + \overline{\Phi_n^2}) < 1$, а средние значения амплитуд одинаковы ($I_n = 1$), то деградация параметров АФАР описывается приведенными ниже приближенными соотношениями.

Коэффициент усиления определяется соотношением

$$G = G_0 - \Delta G \approx G_0 e^{-\alpha} \approx G_0 (1 - \alpha). \quad (2)$$

Средняя погрешность установки максимума ДН $\delta\theta$, отнесенная к ширине ДН $\Delta\theta_{05}$ по уровню половинной мощности (для случая квадратной решетки) выражается формулой

$$\delta\theta / \Delta\theta_{05} \approx 0,3 \sqrt{\alpha / N}. \quad (3)$$

Распределение уровня боковых лепестков ДН подчиняется обобщенному релеевскому закону. Средний уровень боковых лепестков ДН описывается соотношением

$$\overline{f_6^2} = f_{60}^2 + \alpha \pi / N, \quad (4)$$

где f_{60}^2 – относительное значение какого-либо бокового лепестка по мощности при отсутствии амплитудно-фазовых ошибок, $\overline{f_6^2}$ – среднее значение того же лепестка при наличии ошибок. В отдельной реализации уровень бокового лепестка может быть и больше. С вероятностью, практически равной единице, максимальный уровень бокового излучения не превосходит величины

$$f_1 = f_{60} + 3\sqrt{\alpha \pi / 2N}. \quad (5)$$

В 80 % реализаций уровень бокового лепестка не превышает величины

$$f_2 = f_{60} + \sqrt{\alpha \pi / 2N}. \quad (6)$$

Для оценки уровня первого бокового лепестка АФАР с квадратной апертурой при равноамплитудном возбуждении излучателей в формулах следует принять $f_{60} = 0,217$.

На рисунке приведены зависимости ΔG и $\overline{f_6^2}, f_1^2, f_2^2$ для первого бокового лепестка от величины дисперсии α и числа излучателей N [9; 10].

Характерно, что деградация КУ зависит только от α , а боковое излучение, вызванное случайными ошибками, уменьшается с увеличением N . Так, максимальный уровень первого бокового лепестка решетки с прямоугольной апертурой, равный –13,2 дБ при отсутствии ошибок ($\alpha = 0$), повышается при наличии ошибки $\alpha = 0,3$ до –8,8 дБ в решетке с $N = 200$ и только до –12,7 дБ в решетке с $N = 20000$. Для тех же параметров относительная погрешность установки максимума ДН составляет примерно 1 % от ширины луча при $N = 200$ и только 0,1 % при $N = 20000$.

Соотношения (2)–(4) могут быть использованы и для оценки влияния выхода модулей из строя на характеристики АФАР [11].

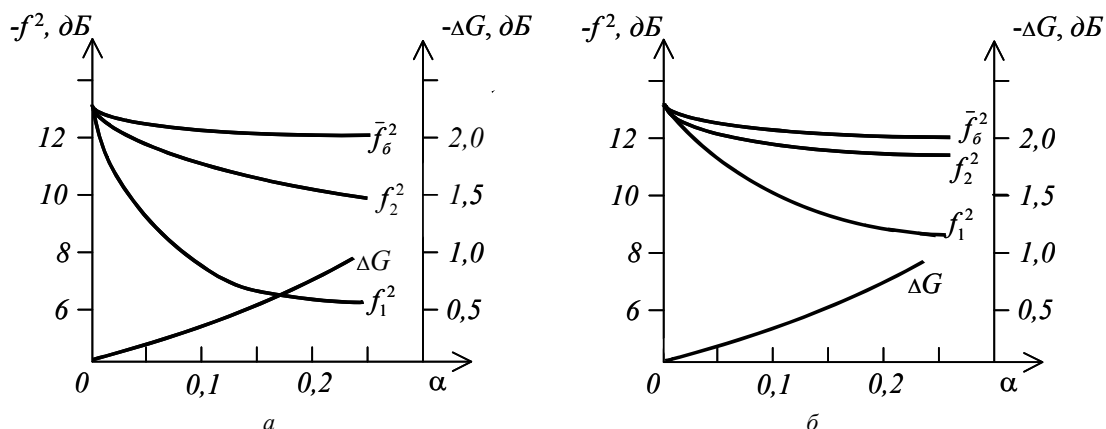
В статистической теории антенных решеток показано, что выход из строя n случайно расположенных элементов в решетке из N элементов можно считать эквивалентным действию равномерно распределенных по всем элементам решетки случайных амплитудно-фазовых ошибок с дисперсией $\alpha = n/N$ [12]. Выражая долю вышедших из строя элементов как функцию интенсивности отказов, получим:

$$\alpha = \alpha(t) = n(t) / N = 1 - e^{-\lambda t} \approx \lambda t = t / T_0. \quad (7)$$

Следует иметь в виду, что выход из строя модулей передающей АФАР приводит не только к ухудшению коэффициента усиления и диаграммы направленности, но и к снижению излучаемой мощности, поэтому потенциал передающей АФАР при $n \ll N$ описывается следующим соотношением:

$$\begin{aligned} P &= PG = P_0(1 - \alpha)e^{-\alpha} \approx \\ &\approx P_0(1 - \alpha)^2 = P_0(1 - t / T_0)^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Наработка до отказа T_0 современных транзисторных передающих модулей АФАР Х-диапазона доходит до 100 000 ч (более 11 лет). Приемные модули, выполненные по гибридной технологии, имеют наработку в 2–3 раза больше, а приемные модули на интегральных схемах СВЧ могут иметь $T_0 > 1\,000\,000$ ч, т. е. на порядок больше.



Зависимости характеристик АФАР от дисперсии амплитудно-фазовых ошибок α и числа излучателей: а – для $N = 50$; б – для $N = 200$

Dependence of the characteristics of active phased antenna arrays on the dispersion of the amplitude-phase errors α and the number of radiators: а – for $N = 50$; б – for $N = 200$

Из соотношений (7), (8) следует, что передающая АФАР, имеющая $N = 20\,000$ модулей с $T_0 = 100\,000$ ч, за один год работы без ремонта (около 8600 ч) претерпит следующие изменения параметров: снижение КУ и эффективной площади апертуры – примерно 0,4 дБ, уменьшение потенциала – примерно 0,8 дБ, максимальный рост первого бокового лепестка – не более 0,3 дБ, максимальная погрешность установки луча – примерно 0,2 % (здесь не учтена погрешность установки, связанная с дискретностью фазовращателей и погрешностями калибровки каналов решеток) [14].

Приведенные параметры достижимы при условии, что правильно выбран тепловой режим работы мощных транзисторов. Это обеспечивается за счет организации оптимального режима их работы на пониженном уровне мощности, рационального выбора материалов корпуса и его конструкции, обеспечивающей максимальный отвод тепла от кристаллов, достаточного расхода охлаждающего воздуха или жидкости в системе охлаждения.

Практически, модули, находящиеся у краев апертуры, за счет теплопередачи в окружающую среду имеют более низкую температуру, чем модули, расположенные в центральной части. Например, в литературе приведены результаты испытаний 17-элементной активной решетки с воздушным охлаждением [13–15]. Потребляемая от источника мощность постоянного тока в каждом канале составляет 9 Вт. В отсутствие принудительного охлаждения центральные элементы решетки имеют температуру примерно 100 °С, крайние – 60 °С. При включенном принудительном обдуве эти температуры составляют 40 и 20 °С соответственно.

Заключение. Таким образом, повышенная температура в центральной части апертуры приводит к более высокой интенсивности отказов. Это, в свою очередь, приводит к более высокому росту бокового излучения.

Для более точного описания характеристик АФАР необходимо создание модели ее надежности. Такая модель должна учитывать энергетические параметры модулей и их элементов, зависимость КПД (и, следовательно, рабочей температуры) от уровня выходной мощности, зависимость температуры от конструктивных параметров системы охлаждения, упомянутую выше зависимость наработки на отказ от температуры, более точное описание интенсивности отказов модулей на основе анализа интенсивности отказов их элементов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.577.21.0220, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57716X0220).

Acknowledgments. This work was supported by a project of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (agreement No. 14.577.21.0220, unique project identifier RFMEFI57716X0220).

Библиографические ссылки

1. Активные фазированные антенные решетки / под ред. Д. И. Воскресенского и А. П. Канащенкова. М. : Радиотехника, 2004. 488 с.

2. Воскресенский Д. И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. М. : Радиотехника, 2003. 632 с.

3. Сабиров Т. Р. Характеристики излучения передающей АФАР при отказах каналов усиления // Радиолокация и радиосвязь : доклады 6-й Всерос. науч.-техн. конф. (19–22 ноября 2012, г. Москва). М. : Издание JRE – ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2012. Т. 2. С. 133–135.

4. Дмитриев Д. Д., Тяпкин В. Н., Кремез Н. С. Методы адаптации фазированных антенных решеток к помехам в спутниковых радионавигационных системах // Радиотехника. 2013. № 9. С. 39–43.

5. Пространственное подавление помех при различных конфигурациях антенной решетки угломерной навигационной аппаратуры / В. Н. Тяпкин [и др.] // Научные технологии. 2016. Т. 17, № 8. С. 52–56.

6. Phase methods for measuring the spatial orientation of objects using satellite navigation equipment / Yu. L. Fateev [et al.] // IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. 2015. № 94 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/94/1/012022.

7. Наработка на отказ адаптивной цифровой антенной решетки / И. Н. Карцан [и др.] // Norwegian Journal of development of the International Science. 2017. Т. 2, № 9. С. 61–64.

8. Гостюхин А. В., Трусов В. Н. Коррекция характеристик направленности АФАР при отказах АМ // Антенны. 2003. Вып. 3–4 (70–71). С. 15–23.

9. Algorithms for adaptive processing of signals in a flat phased antenna array / V. N. Tyapkin [et al.] // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON – 2017 (29–30 June 2017, Astana, Kazakhstan). 2017. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998452.

10. Spatial filtering algorithms in adaptive multi-beam hybrid reflector antennas / V. N. Tyapkin [et al.] // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON – 2015. (21–23 May 2015, Omsk). 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147244.

11. Spatial suppression of interference in hybrid reflector antennas / I. N. Kartsan [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016, № 122.. DOI: 10.1088/1757-899X/122/1/012010.

12. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. М. : Советское радио, 1970. 384 с.

13. Серенков В. И., Карцан И. Н., Дмитриев Д. Д. Метод синтеза амплитудно-фазового распределения гибридно-зеркальной антенны // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 3. С. 664–669.

14. Correcting non-identity in receiving channels in interference-immune systems for GLONASS and GPS / V. N. Tyapkin [et al.] // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON – 2015 (21–23 May 2015, Omsk). 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147246.

15. Зависимость характеристик активной фазированной антенной решетки от наработки / И. Н. Карцан [и др.] // Научный альманах. 2017. № 7–1(33). С. 189–192.

References

1. Voskresenskii D. I., Kanaschenkov A. P. et al. *Aktivnye fazirovannye antennoye reshetki* [Active phased antenna arrays]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004, 488 p.

2. Voskresenskii D. I. *Ustroistvo SVCh i antennoy. Proektirovaniye fazirovannykh antennoykh reshetok* [Microwaves and antennas. The design of phased antenna arrays] Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003, 632 p.
3. Sabirov T. R. [The characteristics of radiation of a transmitting active phased antenna array]. *Doklady 6-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Radiolokatsiya i radiosvyaz"* [Proceedings of the 6th All-Russian scientific research conference "Radiolokatsiya i radiosvyaz"]. Moscow, 19–22 November 2012. Moscow, 2012. Vol. 2, P. 133–135 (In Russ.).
4. Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Kremez N. S. [Methods of adaptation of the phased antenna array to noise in satellite radio navigational systems]. *Radio-tekhnika*. 2013, No. 9, P. 39–43 (In Russ.).
5. Tyapkin V. N., Garin, E. N., Ratushniak V. N., Gladyshev A. D. [The spatial noise suppression in various configurations goniometric of navigation equipment]. *Naukoenkie tekhnologii*. 2016, Vol. 17, No. 8, P. 52–56 (In Russ.).
6. Fateev Yu. L., Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Goncharov A. E. Phase methods for measuring the spatial orientation of objects using satellite navigation equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, Vol. 94 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/94/1/012022.
7. Kartsan I., Kiselev G., Kiseleva Ye., Logacheva A., Nasyrov I., Efremova S. Handling to failures in smart antennas. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2017, Vol. 2, No. 9, P. 61–64 (In Russ.).
8. Gostiukhin A. V., Trusov V. N. [The correction of active phased antenna arrays directivity during failure of active modules]. *Antenny*. 2003, Vol. 3–4 (70–71), P. 15–23 (In Russ.).
9. Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Efremova S. V. Algorithms for adaptive processing of signals in a flat phased antenna array. *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 2017. (Astana, Kazakhstan, 29–30 June 2017). 2017. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998452.
10. Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Goncharov A. E. Spatial Filtering Algorithms in Adaptive Multi-Beam Hybrid Reflector Antennas. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147244.
11. Kartsan I. N., Zelenkov P. V., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D., Goncharov A. E. Spatial suppression of interference in hybrid reflector antennas. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, Vol. 122, P. 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/122/1/012010.
12. Shifrin Ia. S. *Voprosy statisticheskoi teorii antennoy* [Issues of the statistical antenna theory]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970, 384 p.
13. Serenkov V. I., Kartsan I. N., Dmitriev D. D. [Method for the synthesis of amplitude-phase distribution of hybrid-mirror download]. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, No. 3, P. 664–669 (In Russ.).
14. Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Goncharov A. E. Correcting non-identity in receiving channels in interference-immune systems for Glonass and GPS. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147246.
15. Kartsan I. N., Kiseleva E. A., Logacheva A. I., Kartsan T. I. [Dependence of the characteristics of the active phased array antenna on the time]. *Science Almanac*. No. 7–1(33), P. 189–192. DOI: 10.17117/na.2017.07.01.189 (In Russ.).

© Карцан И. Н., Ефремова С. В., Шангина Е. А.,
Логачева А. И., Горев Е. С., 2017