

УДК 621.396.67

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-497-503

**Для цитирования:** Карцан И. Н., Шангина Е. А., Киселев Г. Г., Ефремова С. В. Повышение надежности СВЧ-каналов модулей активной фазированной антенной решетки. 2018. Т. 19, № 3. С. 497–503. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-497-503

**For citation:** Kartsan I. N., Shangina E. A., Kiselev G. G., Efremova S. V. [Increase reliability of ultrahigh-frequency channels of the active phased array antenna modules]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 3, P. 497–503 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-497-503

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СВЧ-КАНАЛОВ МОДУЛЕЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

И. Н. Карцан<sup>1</sup>, Е. А. Шангина<sup>2\*</sup>, Г. Г. Киселев<sup>3</sup>, С. В. Ефремова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>3</sup>Штаб Ракетных войск стратегического назначения  
Российская Федерация, 143010, Московская обл., Одинцовский р-н, п. Власиха, ул. Маршала Жукова, 10  
\*E-mail: kati6230@yandex.ru

*В настоящее время в мире ведутся активные работы по исследованию структуры приёмопередающего модуля активной фазированной антенной решетки (АФАР), а также его составных элементов. Увеличение мощностей АФАР при общей тенденции уменьшения массогабаритных характеристик требует внедрения новых конструктивно-технологических решений, направленных на стабильную работу устройств.*

*От выбора схемы многоканального модуля и АФАР в целом существенно зависят их показатели надежности, следовательно, и эксплуатационные расходы, которые возможно оптимизировать на этапе проектирования и тем самым минимизировать стоимость эксплуатации всей системы.*

*Рассмотрено влияние схемных решений модулей и надежности их функциональных узлов на надежность характеристики АФАР. Показано, что надежность характеристики АФАР тем хуже, чем больше СВЧ-каналов в модуле, из чего следует, что очевидным путем улучшения надежности характеристики АФАР является переход к одноканальным модулям. Приводятся расчетные величины среднего времени наработки на отказ АФАР при различных сценариях отказов элементов, входящих в модули.*

*Ключевые слова:* активная фазированная антенная решетка, отказы СВЧ-каналов, диаграмма направленности, космический аппарат.

## INCREASE RELIABILITY OF ULTRAHIGH-FREQUENCY CHANNELS OF THE ACTIVE PHASED ARRAY ANTENNA MODULES

I. N. Kartsan<sup>1</sup>, E. A. Shangina<sup>2\*</sup>, G. G. Kiselev<sup>3</sup>, S. V. Efremova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>3</sup>Headquarters of the Strategic Missile Force  
10, Marshal Zhukov Str., vil. Vlasikha, dist. Odintsovo, Moscow region, 143010, Russian Federation  
\*E-mail: kati6230@yandex.ru

*Currently in the world active work is underway to study the structure of the transmit-receive module of the active phased array antenna (APAA) as well as its composite elements. Their reliability indicators depend significantly on the choice of the multi-channel module and APAA scheme, therefore operational costs that can be optimized at the design stage, thereby minimizing the cost of living of the entire system, also depend on that.*

*Reliability indicators essentially depend on the choice of the scheme of the multichannel module and APAA as a whole, therefore also operational cost, which can be optimized at the design stage, thereby minimizing the cost of operating the entire system.*

*The influence of circuit solutions of modules and reliability of their functional nodes on reliability characteristics of APAA is considered in the article. It is shown that the more ultrahigh-frequency (UHF) channels in the module, the*

worse the reliability characteristics of APAA. It follows that an obvious way to improve the reliability characteristics of APAA is to switch to single-channel modules. Calculated values of the mean time between failures of APAA are given for various failure scenarios of the elements included in the modules.

**Keywords:** active phased antenna array, ultrahigh-frequency channel failures, directional pattern, space vehicle.

**Введение.** Отказ СВЧ-каналов активной фазированной антенной решетки (АФАР) приводит к уменьшению её коэффициента усиления и увеличению уровня боковых лепестков. При этом следует иметь в виду, что для АФАР снижение величины ее энергетического потенциала на передачу и на прием зависит только от числа отказавших СВЧ-каналов и мало зависит от их расположения в апертуре антенны. При равноамплитудном возбуждении СВЧ-каналов расположение вышедших из строя СВЧ-каналов по раскрытию вообще не сказывается на значении уменьшения  $PG$  антенны. Совсем иная картина происходит с изменением уровня боковых лепестков. Чем большее число отказавших СВЧ-каналов собрано в группы с заметным числом СВЧ-каналов, тем больше меняется форма диаграммы направленности (ДН) в области боковых лепестков. В роли таких групп могут выступать многоканальные модули, претерпевшие катастрофический отказ. Причинами таких отказов могут быть источники питания или ячейки управления, обслуживающие модуль в целом [1; 2].

При рассмотрении влияния отказов СВЧ-каналов на ДН АФАР следует иметь в виду следующие обстоятельства. Внутри СВЧ-канала модуля передающая и приемная части практически независимы друг от друга. Это означает, что распределения по раскрытию отказавших приемных и передающих СВЧ-каналов разные. В силу этого будут разными и их ДН, в особенности в области боковых лепестков. Угловые положения увеличившихся по уровню боковых лепестков будут отличаться. Это означает, что ДН АФАР в радиолокационном режиме (как произведение ДН для передающего режима и ДН для приемного режима) в подавляющем числе реализаций будут иметь меньшие ухудшения уровня боковых лепестков, чем каждый из СВЧ-каналов в отдельности.

От выбора схемы многоканального модуля и АФАР в целом существенно зависят их показатели надежности, следовательно, и эксплуатационные расходы. На этапе проектирования возможна оптимизация соотношения начальной стоимости аппаратуры и стоимости ее эксплуатации (зависящей от надежных характеристик), которые обеспечат минимальную стоимость эксплуатации радиосистемы [3–5].

**Надежные характеристики АФАР.** Рассмотрим пример влияния схемных решений модулей и надежности их функциональных узлов на надежные характеристики АФАР в целом. В качестве объекта исследования выберем АФАР, включающую в себя 10 000 СВЧ-каналов, сгруппированных в многоканальный модуль (МКМ) с различным числом интегрируемых СВЧ-каналов. Архитектура решетки показана на рис. 1.

Выше уже отмечалось, что отказы СВЧ-каналов влияют как на энергетические характеристики, так и на уровень боковых лепестков ДН. Оценки показы-

вают, что влияние отказов СВЧ-каналов на уровень боковых лепестков более критично, чем на изменение энергетических характеристик.

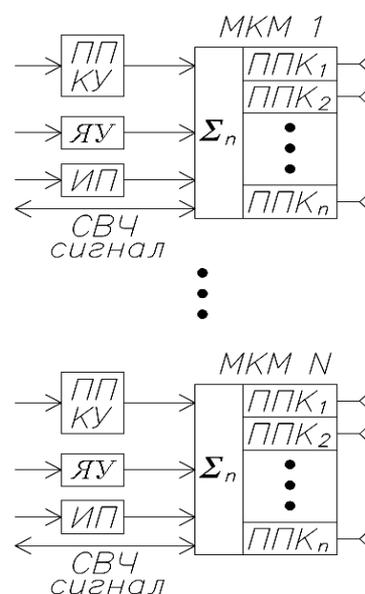


Рис. 1. Надежная схема АФАР: МКМ – многоканальный модуль; ППК – приемно-передающий канал; ППКУ – приемно-передающий каналный усилитель; ЯУ – ячейка управления; ИП – источник питания

Fig. 1. Reliability scheme: multichannel module; a receiving-transmitting channel; a receiving-transmitting channel amplifier; control cell; power supply

Будем считать критериями отказа АФАР изменение ее энергетических параметров на  $-1$  дБ либо изменение уровня максимальных боковых лепестков на  $+3$  дБ или  $+6$  дБ. Известно, что снижение величины  $PG$  на  $-1$  дБ происходит при отказе около 10 % СВЧ-каналов. Увеличение уровня максимальных боковых лепестков на  $+3$  дБ и  $+6$  дБ происходит при отказе меньшего числа СВЧ-каналов [6–10]. Принятые для исследований значения среднего времени на отказ приведены в табл. 1.

В решетку с количеством элементов 10 000 входят 10 000 приемно-передающих каналов (ППК). Если использовать 8-канальные модули, то в решетку входит 1250 ячеек управления (ЯУ), 1250 источников питания (ИП), 1250 каналных усилителей модулей (ППКУ). При указанных в табл. 1 значениях среднего времени наработки на отказ каждые 10 часов отказывает один ППК, каждые 80 часов – одна ЯУ, каждые 160 часов – один ППКУ, каждые 40 часов – один ИП.

В табл. 2 приведено допустимое количество отказавших модулей при разрешенных увеличениях мак-

симметричных боковых лепестков на 3 и 6 дБ. Расчеты выполнены для АФАР, состоящих из 1-, 2-, 4- и 8-канальных модулей.

Соответствующие графики представлены на рис. 2.

Из приведенных результатов можно сделать следующие выводы. В многоканальных модулях возможен отказ всех входящих в модуль СВЧ-каналов при отказе общих для них элементов – узла управления, усилителя-возбудителя и источника питания. При отказах таких элементов допустимая деградация характеристик ДН наступает при значительно меньших количествах отказавших СВЧ-каналов, чем при использовании одноканальных модулей. Это означает, что надежность характеристики АФАР тем хуже, чем больше СВЧ-каналов в модуле [11–13]. Иллюстрацией этому является табл. 3, в которой приводятся расчетные величины среднего времени наработки на отказ (СВНО) АФАР при различных сценариях отказов элементов, входящих в модули.

Расчеты приведены для 8-канального модуля. В качестве критерия отказа АФАР при расчетах, результаты которых приведены в табл. 3, выбрано увеличение уровня максимальных боковых лепестков на +3 дБ. Подчеркнем, что выбранный критерий может оказаться чрезмерно «суровым» и неоправданным. Аналогичные расчеты могут быть проведены для других критериев отказа АФАР.

В графе 6 табл. 3 приводятся значения СВНО АФАР, обусловленные отказами только одного типа элементов, входящих в модули. В графе 7 приводятся значения СВНО АФАР, обусловленные совместным

влиянием отказов элементов модуля. Из табл. 3 видно, что при естественном процессе функционирования АФАР одновременно случающиеся отказы всех типов элементов в соответствии с присущими им значениями СВНО приводят к тому, что при рассматриваемой архитектуре АФАР ее надежность характеристики катастрофически деградируют [14].

Очевидным путем улучшения надежности характеристик АФАР является переход к одноканальным модулям, включающим в себя весь набор функциональных элементов. В табл. 4 приведены результаты расчета СВНО АФАР из одноканальных модулей, содержащих все функциональные элементы. Критерий отказа АФАР – увеличение УБЛ на +3 дБ.

Как видно из графы 7 табл. 4, АФАР из одноканальных модулей имеет существенно лучшие надежность характеристики, чем АФАР из 8-канальных модулей (СВНО больше в 7,6 раза!). Это приводит к снижению стоимости эксплуатационных расходов. Вместе с тем, стоимость набора одноканальных модулей выше стоимости набора восьмиканальных модулей. Баланс полных стоимостей жизни двух вариантов АФАР может быть выведен в результате анализа стоимостных характеристик конкретной АФАР.

Можно рассматривать другие схемы АФАР, имеющие более высокое значение их СВНО. Показана архитектура АФАР, в которой применены источники питания с резервированием и каналные усилители с резервированием, имеющие существенно более высокую надежность, чем устройства без резервирования (рис. 3).

Таблица 1

Значения среднего времени на отказ

Наименование функционального элемента	Среднее время наработки на отказ (СВНО), ч
Приемо-передающий канал	100 000
Ячейка управления	100 000
Приемо-передающий канальный усилитель	200 000
Источник питания	50 000

Таблица 2

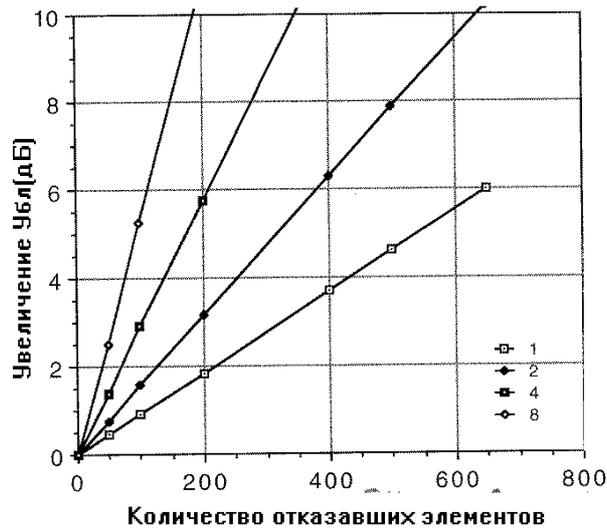
Допустимое количество отказавших модулей при разрешенных увеличениях максимальных боковых лепестков

Число СВЧ-каналов в модуле	Увеличение уровня боковых лепестков (УБЛ) на 3дБ	Увеличение уровня боковых лепестков на 6дБ
1	320	650
2	180	410
4	100	210
8	55	110

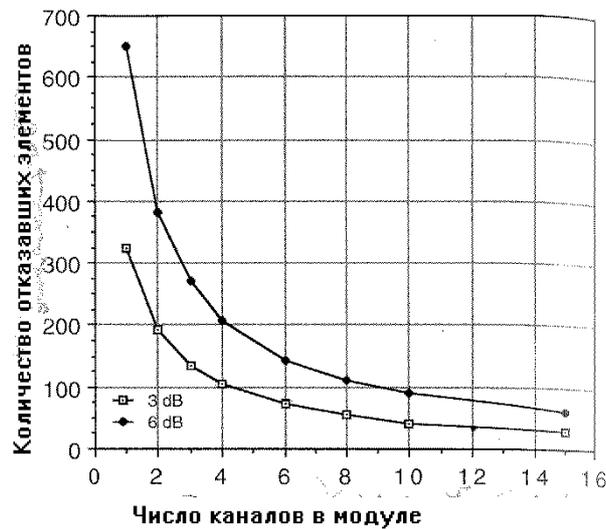
Таблица 3

Расчетные величины среднего времени наработки на отказ АФАР при различных сценариях отказов элементов, входящих в модули

Элемент модуля	Количество	СВНО, ч	Интервал отказов, ч	Допустимое количество отказов	СВНО АФАР, ч	Аккумулятивное СВНО АФАР, ч
1	2	3	4	5	6	7
ППК	10 000	100 000	10	320	3200	3200
ЯУ	1250	50 000	40	7	280	257
ППКУ	1250	200 000	160	7	1120	209
ИП	1250	50 000	40	7	280	<b>120</b>



a



b

Рис. 2. Графики: *a* – зависимости увеличения УБЛ от количества отказавших элементов для 1-, 2-, 4- и 8-канальных модулей; *b* – зависимости допустимого количества отказавших элементов от числа СВЧ-каналов в модуле

Fig. 2. Dependence: *a* – of the increase in level of side lobes on the number of failed elements for 1, 2, 4 and 8 channel modules; *b* – the dependence of the permissible number of failed elements on the number of microwave channels in the module

Таблица 4

Результаты расчета СВНО АФАР

Элемент модуля	Количество	СВНО, ч	Интервал отказов, ч	Допустимое количество отказов	СВНО АФАР, ч	Аккумулярованное СВНО АФАР, ч
1	2	3	4	5	6	7
ППК	10 000	100 000	10	320	3200	3200
ЯУ	10 000	100 000	10	320	3200	1600
ППКУ	10 000	200 000	20	320	6400	1280
ИП	10 000	100 000	10	320	3200	<b>914</b>

Результаты расчета СВНО АФАР с выбором в качестве критерия отказа увеличение УБЛ

Элемент модуля	Количество	СВНО, ч	Интервал отказов, ч	Допустимое количество отказов	СВНО АФАР, ч	Аккумулярованное СВНО АФАР, ч
1	2	3	4	5	6	7
ППК	10 000	100 000	10	650	6500	6500
ЯУ	10 000	100 000	10	650	6500	<b>3250</b>

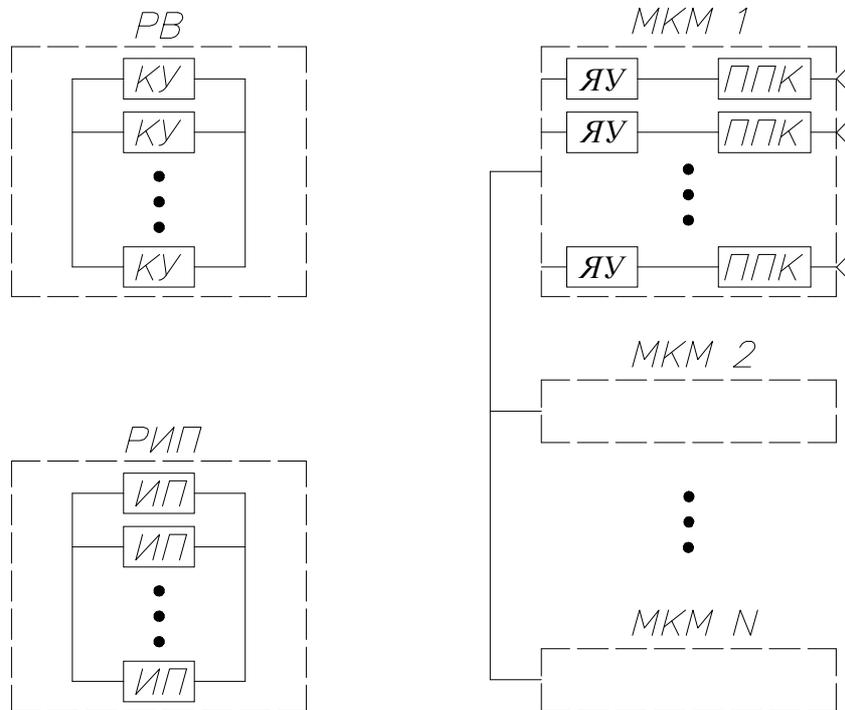


Рис. 3. Структурная схема АФАР с повышенной надежностью:  
 КУ – каналный усилитель; РВ – резервированный усилитель; ИП – источник питания;  
 РИП – резервированный источник питания; МКМ – многоканальный модуль;  
 ЯУ – ячейка управления; ППК – прямо-передающий канал

Fig. 3. Structural diagram of APAA with increased reliability:  
 channel amplifier; the reserved amplifier; power supply; redundant power supply;  
 multichannel module; control cell; a transceiver channel

Результаты расчета СВНО такой АФАР с выбором в качестве критерия отказа увеличение УБЛ на +6 дБ приведены в табл. 5.

Из графы 7 табл. 5 видно, что изменения структурной схемы и некоторое смягчение критерия отказа АФАР приводят к дальнейшему увеличению СВНО АФАР в 3,5 раза. К тому же при такой архитектуре АФАР на уровень боковых лепестков ДН в радиолокационном режиме будет положительно влиять различие в статистике отказов передающих и приемных СВЧ-каналов модулей.

Изложенное показывает, что такие важные характеристики АФАР, как их начальная стоимость, стоимость эксплуатации в пределах назначенного срока службы, определяются критериями ее параметрических отказов.

Приведенные выше результаты исследований справедливы для случаев полного (катастрофического) отказа модулей или их отдельных СВЧ-каналов.

На практике наряду с такими отказами имеют место параметрические отказы – снижение коэффициентов усиления в передающем и приемном СВЧ-каналах, «залипание» отдельных разрядов фазовращателей или аттенуаторов и т. д. Такие отказы влияют на изменение ДН несколько меньше.

Приведенные выше расчеты надежности сделаны в предположении, что аппаратура АФАР не ремонтируется за время эксплуатации. Во многих радиосистемах с АФАР, которые обслуживаются и в которых вышедшие из строя блоки и модули заменяются при регламентных работах, показатели надежности существенно выше приведенных.

Уместно сделать следующее замечание. Если известны признаки отказов в СВЧ-каналах модулей (их координаты в раскрыте АФАР, характер отказов), то чисто программными средствами может быть частично осуществлена операция уменьшения уровня всплесков боковых лепестков, вызванных физической

деградацией СВЧ-каналов [15]. Очевидно, что при выполнении такой операции произойдет дополнительное ухудшение направленных свойств АФАР. Но выше уже отмечалось, что именно уровень боковых лепестков является более чувствительным параметром по отношению к изменению амплитудно-фазовых распределений в раскрыве АФАР.

**Заключение.** Таким образом, наличие в составе АФАР достоверной системы контроля реального состояния СВЧ-каналов модулей в сочетании с возможностями специализированных программных средств управления коэффициентами передачи СВЧ-каналов позволяет снизить влияние отказов на УБЛ и существенно улучшить показатели надежности АФАР за счет повышения среднего времени наработки на отказ. Реализация такого приема является дополнительным средством повышения экономической эффективности АФАР путем совершенствования ее архитектуры.

**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. Тушнов П. А., Бердыев В. С., Левитан Б. А. Аспекты развития технологий приемо-передающих модулей активных фазированных решеток // Радиотехника. 2015. № 4. С. 91–98.
2. Воскресенский Д. И. Активные фазированные антенные решетки / под ред. Д. И. Воскресенского, А. И. Канашенкова. М. : Радиотехника, 2004. С. 488.
3. Дмитриев Д. Д., Карцан И. Н. Адаптивные антенные решетки с цифровым формированием луча // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 263–265.
4. Зависимость характеристик активной фазированной антенной решетки от наработки / И. Н. Карцан [и др.] // Научный альманах. 2017. № 7-1 (33). С. 189–192.
5. Шангина Е. А., Патраев В. Е. Оценка надежности перспективных космических комплексов // Исследование наукограда. 2015. № 1 (11). С. 28–31.
6. Шангина Е. А., Патраев В. Е. Формирование оптимизированных требований по надежности к перспективным космическим комплексам экспериментального назначения // Космическое приборостроение : материалы III Всерос. форума школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. С. 91.
7. 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 (Astana, Kazakhstan, 29–30 June, 2017). 2017. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998452.

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

10. 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.

11. Повышение эффективности передающих АФАР за счет управления выходной мощностью каналов приемо-передающих модулей / В. С. Бердыев [и др.] // Радиотехника. 2016. № 10. С. 88–99.

12. 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.

13. An adaptive algorithm for interference suppression in phased antenna arrays / I. N. Kartsan [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. № 255 (1). С. 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/255/1/012009.

14. Устройства СВЧ и антенны / под ред. Д. И. Воскресенского. 2-е изд. М. : Радиотехника, 2006. 376 с.

15. Влияние рабочей температуры на характеристики излучения АФАР / И. Н. Карцан [и др.] // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 3, № 18. С. 575–579.

#### References

1. Tushnov P. A., Berdyev V. S., Levitan B. A. Aspects of the development of the technologies of the transmit modules of active phased arrays. *Radiotechnics*. 2015, No. 4, С. 91–98.
2. Voskresenskii D. I., Kanaschenkov A. P. (eds.) [Active phased antenna arrays]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. P. 488.
3. Dmitriev D. D., Kartsan I. N. [Adaptive antenna arrays with digital beamforming]. *Reshetnevskie chteniya* [Proceedings of XVII International. Scientific. Conf. “Reshetnev reading”]. Krasnoyarsk, 2016, Vol. 1, No. 20, P. 263–265 (In Russ.).
4. 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*. 2017, No. 7-1(33), P. 189–192. DOI: 10.17117/na.2017.07.01.189 (In Russ.).
5. Shangina A. E. Estimation of reliability of perspective space complexes. *Research of science city*. 2015, No. 1 (11), P. 28–31.
6. Shangina A. E. Creation of optimized reliability requirements for promising experimental natured space complexes. *Space Instrumentation: Proceedings of the III National Forum of pupils, students, post-graduate students and young scientists with international participation*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2015, P. 91.

7. 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.
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. Sabirov T. R. [The characteristics of radiation of a transmitting active phased antenna array]. *Proceedings of the 6th All-Russian scientific research conference "Radiolokatsiia i radiosviat'"* (Moscow, 19–22 November 2012). 2012, Vol. 2, P. 133–135 (In Russ.).
10. 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.).
11. Berdyev V. S., Levitan B. A., Tushnov P. A., Shishlov A. V. [Increase the efficiency of the transmitting APAA by controlling the output power of the channels of the transmit / receive modules]. *Radiotechnics*. 2016, No. 10, P. 88–99.
12. 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.).
13. Kartsan I. N., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D., Goncharov A. E., Kovalev I. V. An adaptive algorithm for interference suppression in phased antenna arrays. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, Vol. 255 (1), P. 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/255/1/012009.
14. Voskresensky D. I., Gostyukhin V. L., Maksimov V. M., Ponomarev L. I. *Ustroystva SVCh i anteny* [Ultra-high frequency devices and antennas]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006, 376 p.
15. Kartsan I. N., Efremova S. V., Shangina E. A., Logacheva A. I., Gorev Y. S. [Operating temperature and its influence on the radiation of phased antenna arrays]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 575–579 (In Russ.).

© Карцан И. Н., Шангина Е. А.,  
Киселев Г. Г., Ефремова С. В., 2018