

ЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Научная статья
УДК 621.396.946
DOI: [10.34759/trd-2023-128-10](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-10)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ РАДИОЛИНИИ

Андрей Вадимович Азаров¹✉, Александр Евгеньевич Латышев²,
Сергей Сергеевич Рожков³, Максим Александрович Семернин⁴,
Андрей Олегович Славянский⁵, Максим Николаевич Караваев⁶

^{1,3,6}НТЦ «СИГМА», Королев, Московская область, Россия

^{2,5}АО «ЦНИРТИ имени академика А.И. Берга», Москва, Россия

⁴Военное Представительство № 2823 Министерства обороны Российской Федерации, Белгород, Россия

¹andrey_91@bk.ru✉

²a.e.latishev@yandex.ru

³SSR.kgd@mail.ru

⁴semernin.88@mail.ru

⁵andrey.slavyanskiy@gmail.ru

⁶kmn.2693@yandex.ru

Аннотация. В работе проводится обоснование технических требований и приводятся результаты моделирования и оценки характеристик кольцевого резистивного делителя мощности системы распределения сигналов АФАР. В ходе выполнения работы спроектирован кольцевой резистивный делитель мощности,

имеющий коэффициент стоячей волны по напряжению входа и выходов не превышающий 1,05 в интересующей полосе частот, развязку между выходными каналами не менее 27 дБ, и неидентичность выходов по фазе не более $0,2^\circ$, что обеспечивает высокие требования по точности и скорости электронного сканирования лучом АФАР бортовой аппаратуры высокоскоростной радиолинии.

Ключевые слова: высокоскоростная радиолиния, активная фазированная антенная решётка, сканирование лучом, делитель мощности

Для цитирования: Азаров А.В., Латышев А.Е., Рожков С.С., Семернин М.А., Славянский А.О., Караваяев М.Н. Сравнительный анализ вариантов построения антенной решетки бортовой аппаратуры высокоскоростной радиолинии // Труды МАИ. 2023. №128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-10](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-10)

ELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING AND COMMUNICATIONS

Original article

COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTIONS FOR CONSTRUCTING AN ANTENNA ARRAY OF ONBOARD HIGH-SPEED RADIO LINK EQUIPMENT

Andrey V. Azarov^{1✉}, Alexander E. Latyshev², Sergey S. Rozhkov³,
Maxim A. Semernin⁴, Andrey O. Slavyansky⁵, Maksim N. Karavaev⁶

^{1,3,6}STC "SIGMA", Korolev, Moscow region, Russia

^{2,5}Central Research Institute of Radio Engineering named after Academician A.I. Berg,
Moscow, Russia

⁴Military representative office №2823, Belgorod, Russia

¹andrey_91@bk.ru✉

²a.e.latishev@yandex.ru

³SSR.kgd@mail.ru

⁴semernin.88@mail.ru

⁵andrey.slavyanskiy@gmail.ru

⁶kmn.2693@yandex.ru

Abstract. The paper considers and substantiates the options for constructing a high-speed radio communication line based on an active phased array antenna (APAA) with electronic beam scanning. The methods of beam scanning, power distribution systems and schemes for supplying power to the emitting elements of an active phased array are considered, namely, a circuit with a series supply of APAA emitters is considered, a circuit with a series supply of APAA emitters based on phase shifters is considered, a circuit of parallel supply of APAA emitters is considered, as well as a binary-level scheme of parallel power supply of emitters of an active phased array. Requirements have been produced for the key element for supplying power to APAA emitters - annular resistive power divider, a block diagram of the APAA transmitter (beamforming module) has been proposed, including an antenna array, each emitter of which is connected to the corresponding transmitter module, which are powered through power distribution devices, signals conversion path, signal generation and processing devices, control device. While working on the requirements produced, the structure of annular resistive power divider was developed, which has a standing wave ratio of the input and output voltage of no more than 1.05 in the frequency band of interest, an isolation between the output channels of the divider of at least 27 dB, and a phase non-identity of

the outputs of no more than 0.2° , which meets high requirements for the accuracy and speed of electronic scanning by the APAA beam of the onboard equipment of high-speed radio links for use in radio communication systems of advanced spacecraft.

Keywords: high-speed radio line, active phased array antenna, beam scanning, power divider

For citation: Azarov A.V, Latyshev A.E., Rozhkov S.S., Semernin M.A., Slavyanskiy A.O., Karavaev M.N. Comparative analysis of options for constructing an antenna array of onboard high-speed radio link equipment. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-10](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-10)

Введение

Бортовая аппаратура системы радиосвязи состоит из следующих основных элементов: антенно-фидерное устройство, блоки приемной и передающей аппаратуры, блок цифровой обработки информации. В работе предложено рассмотреть вопрос развития антенной системы на основе активных фазированных антенных решеток (АФАР), в частности улучшения характеристик одного из ключевых элементов АФАР – кольцевого резистивного делителя мощности системы распределения сигналов.

Основными достоинствами активных фазированных антенных решеток (АФАР) являются [1, 2]:

- возможность управления параметрами излучения в пространстве и энергетическим потенциалом в условиях сложной помеховой обстановки;
- высокий относительно одиночного антенно-фидерного тракта уровень

излучаемой мощности, обеспечиваемый суммированием в пространстве маломощных сигналов;

– обеспечение высокой надежности за счет наличия большого числа элементов АФАР и их функциональными возможностями;

– возможность работы в более широкой полосе частот и в большем секторе сканирования.

Целесообразность построения того или иного варианта передающего устройства во многом определяется его энергетическими характеристиками. Обычно такое устройство, особенно в системах с ограниченными источниками энергии, должно обеспечивать заданную излучаемую мощность при максимуме коэффициента направленного действия антенны. Но АФАР, как передающее устройство, не просто генерирует и излучает мощность в определенном направлении, но и максимально концентрирует её в заданной части пространства, то есть обеспечивает максимум коэффициента усиления, что позволяет передавать большой объем информации в сеансе связи с заданной скоростью передачей.

Способы электрического сканирования лучом

Современные методы электронного управления диаграммой направленности антенной системы включают использование либо механического, либо электронного управления. Системы с механическим управлением в сравнении с электронным медлительны, энергоемки, требуют регулярного технического обслуживания, а также имеют большие массо-габаритные

характеристики.

Традиционно существуют три способа электрического сканирования лучом:

- фазовый способ путем регулирования только фазовых сдвигов возбуждения элементов решетки [3];
- амплитудный способ путем коммутации парциальных диаграмм направленности в многолучевой антенной системе [4];
- способ частотного сканирования, при котором фазовые сдвиги в излучающих элементах решетки регулируются за счет изменения частоты колебаний [5].

Так как мы не рассматриваем многолучевые антенные системы, применение амплитудного способа электрического сканирования неуместно.

Частотное сканирование, как способ управления лучом антенной решетки, наиболее эффективно для эквидистантной линейной антенной решетки с последовательной схемой возбуждения элементов [6]. Существуют также сканирующие антенны, в которых изменение частоты генератора используется для отклонения луча в двух плоскостях [7]. Стоит отметить, что использование всего лишь одного генератора для сканирования пространства приводит к более низким показателям надежности бортовой аппаратуры [8].

Фазовый способ электрического сканирования является самым простым и надежным и позволяет строить сканирующие антенные системы средних и больших размеров.

Системы распределения мощности АФАР

Системы с фазированной антенной решетки требуют, чтобы приемо-передающий тракт к каждому антенному элементу имел несколько распределителей мощности и фазовращателей с электронным управлением.

Классификация делителей мощности представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Классификация делителей мощности.

Традиционно различают два класса схем подведения СВЧ мощности к излучателям решетки: с последовательным и параллельным питанием [9].

Классическая схема последовательного питания эквидистантной решетки показана на рисунке 2.

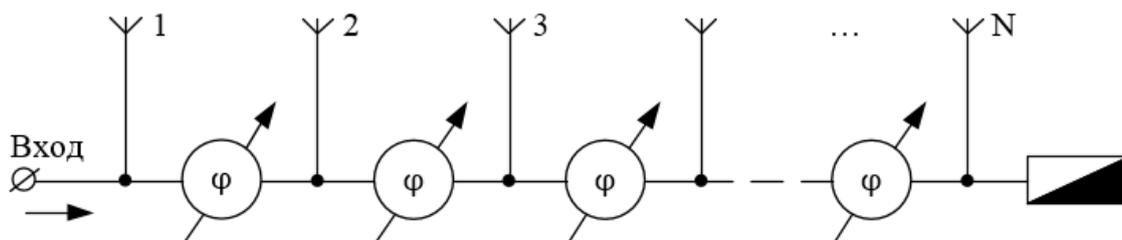


Рисунок 2 – Схема последовательного питания излучателей АФАР.

Мощность к каждому излучателю ответвляется шаг за шагом от общего

фидера, и одинаковые фазовращатели (ФВ) включаются в главный фидерный тракт между отводами к соседним излучателям. Существенными недостатками данной схемы является накопление и возрастание фазовых ошибок и вносимых потерь к концу решетки [10].

Для устранения большинства описанных недостатков ФВ в передающей АФАР включают в боковые отводы (рисунок 3).

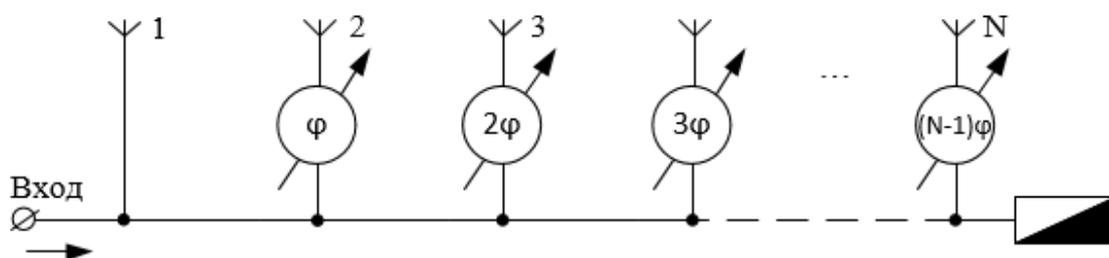


Рисунок 3 – Схема последовательного питания излучателей АФАР с ФВ в боковых отводах.

Предлагаемая схема лишена описанных недостатков, но требует сложной системы управления ФВ.

Ряд важнейших преимуществ имеет параллельная схема (рисунок 4) питания N -элементной решетки [11]. Идеология построения такой распределительной системы подразумевает использование сравнительно маломощных ФВ, так как через каждый из них проходит только $1/N$ часть излучаемой мощности. Общие потери мощности в управляющих устройствах определяются величиной вносимых потерь лишь в одном ФВ, следовательно, допустимо применение ФВ со значительной величиной потерь. Существует возможность выравнивания фазовых длин отдельных каналов для обеспечения

широкополосности. Из недостатков стоит выделить трудность в обеспечении корректного согласования входа при одновременном делении мощности на большое число каналов [12].

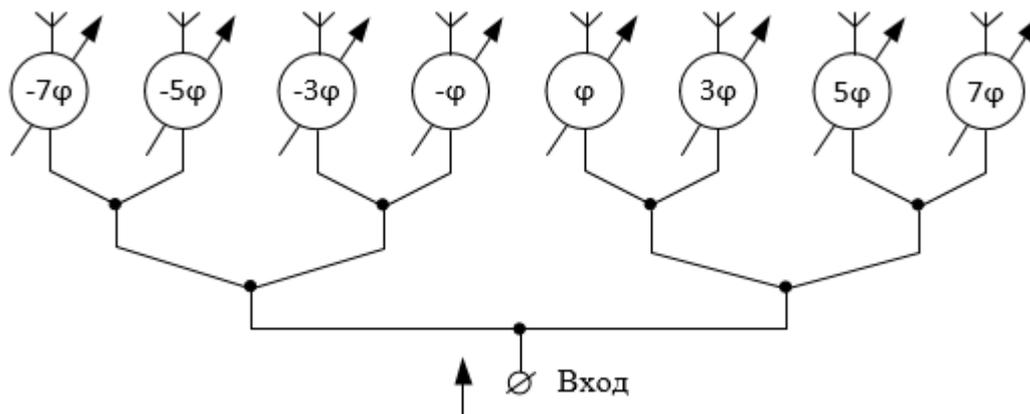


Рисунок 4 – Схема параллельного питания излучателей АФАР.

На рисунке 5 показана частная реализация схемы параллельного питания - двоично-этажная схема. В качестве делителей мощности в узлах «елочки» могут быть использованы различные СВЧ-устройства: тройники, направленные ответвители, кольцевые делители мощности [13].

Для упрощения схемы управления решеткой с параллельным делением можно включать ФВ в каждый этаж лестничной схемы (рисунок 5).

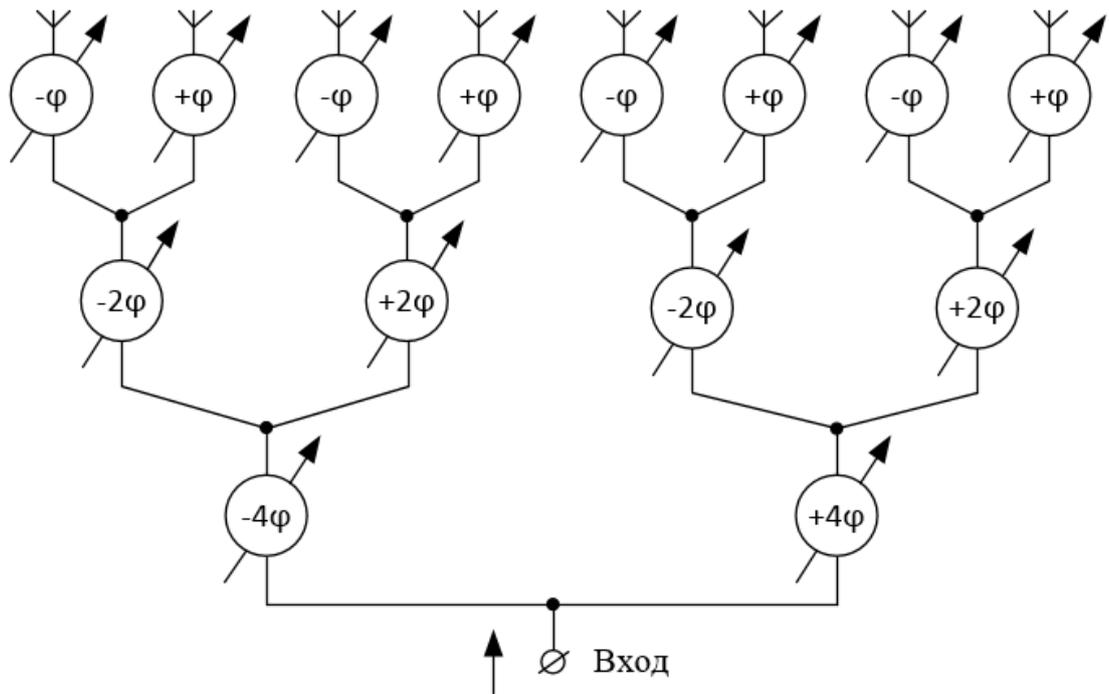


Рисунок 5 – Двоично-этажная схема параллельного питания.

Теперь для получения линейного фазового распределения с фиксированным шагом между соседними излучателями все ФВ каждого этапа должны отработать одинаковый фазовый сдвиг - число управляющих сигналов уменьшается до числа этажей схемы [14].

Другой большой класс распределительных систем - распределители оптического типа [15, 16]. Но применение их при построения рассматриваемой бортовой АФАР не обеспечивает результативное функционирование системы деления мощности, поэтому их рассмотрение и анализ нецелесообразны.

Устройство распределения мощности

В работе рассмотрена АФАР (модуль формирования луча), которая включает в себя антенную решетку, каждый излучатель которой соединен с соответствующим передающим модулем (ПМ), устройство распределения мощности (УРМ), тракт преобразования сигналов (ТПС), устройство

формирования и обработки сигналов (УФ и ОС) и устройство управления (УУ). Разрабатываемая блок-схема передающего модуля представлена на рисунке 6. С одной стороны ПМ подключается к АР, а с другой – через УРМ к генераторной части тракта преобразования сигнала.

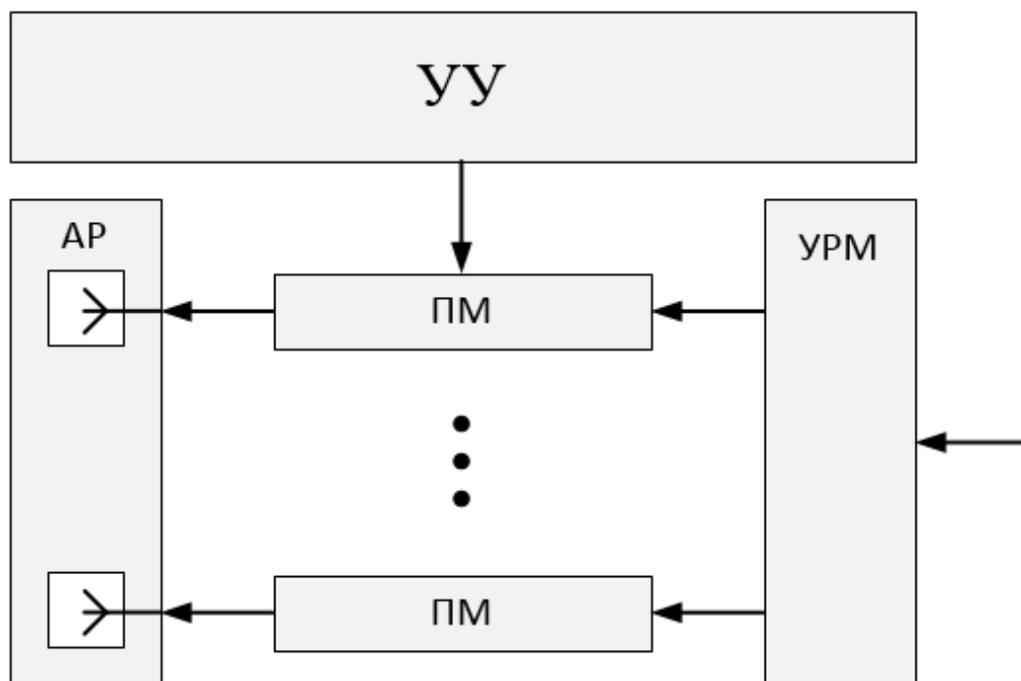


Рисунок 6 – Функциональная схема модуля формирования луча АФАР

Каждый передающий модуль в составе АФАР выполняет следующие функции:

- формирует требуемый уровень СВЧ мощности в АР АФАР;
- управляет амплитудой и фазой излучаемых СВЧ сигналов с обеспечением требуемой глубины регулировки, точности установки и стабильности во времени;
- обеспечивает заданное время переключения луча.

Активной частью модуля является усилительная часть. Усилитель мощности (УМ) расположен в непосредственной близости от излучателя, чтобы исключить необходимость введения высокочастотного фидерного тракта на

высоком уровне мощности и тем самым существенно уменьшить высокочастотные потери. Требования к стабильности амплитудных и фазовых характеристик АФАР обеспечиваются за счет высокостабильных элементов, цепей автоматической подстройки фазы и усиления в каждом модуле или специальными схемотехническими решениями.

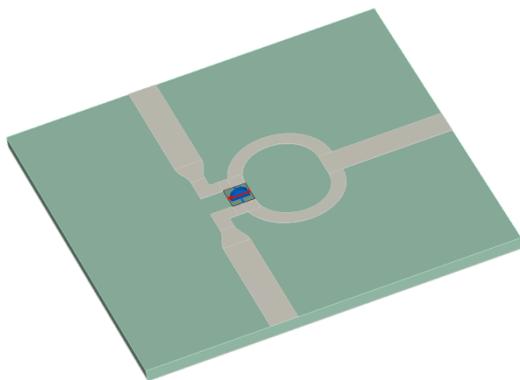
Для разделения сигнала на два может быть использовано Т-образное включение. Однако у этой схемы имеется несколько недостатков. Во-первых, рассогласование импедансов. Если оба выхода работают на нагрузку 50 Ом, то входной порт нагружен на 25 Ом. Если импеданс устройства на входе равен 50 Ом, возникает рассогласование. Во-вторых, отсутствует развязка. Если, например, один из выходов закорочен, второй тоже закорачивается. Известны три схемы, лишенные указанных недостатков: резистивный и гибридный делители, а также делитель Вилкинсона. Резистивные делители обычно имеют самую широкую частотную полосу, поскольку они не содержат частотно зависящих компонентов. Основным преимуществом резистивных делителей мощности (ДМ) в передающем тракте АР является корректное согласование со стороны выходов, обращенных к излучателям решетки [17, 18, 19].

При моделировании устройства распределения мощности АФАР предлагается [20] рассмотреть следующие требования:

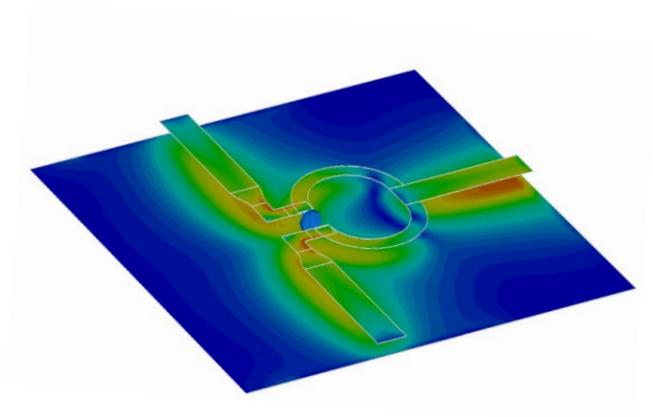
- делитель должен обеспечивать равноамплитудное и равнофазное деление с отклонениями между каналами амплитуд ± 1 дБ и фаз не более $\pm 1^\circ$,
- коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВн) по всем выходам не должен превышать – 1.5,

- развязка между выходами не должна быть больше, чем минус 20 дБ,
- активные потери – не более 2 дБ.

Для оценки реальной распределительной системы рассчитан кольцевой резистивный делитель мощности (рисунок 7).



а



б

Рисунок 7 – Топология резистивного делителя мощности: а - топология печатной платы; б - распределение электромагнитной энергии в структуре многослойной печатной платы.

Результаты моделирования электрических характеристики делителя с ранее рассмотренной топологией приведены на рисунках 8 - 10.

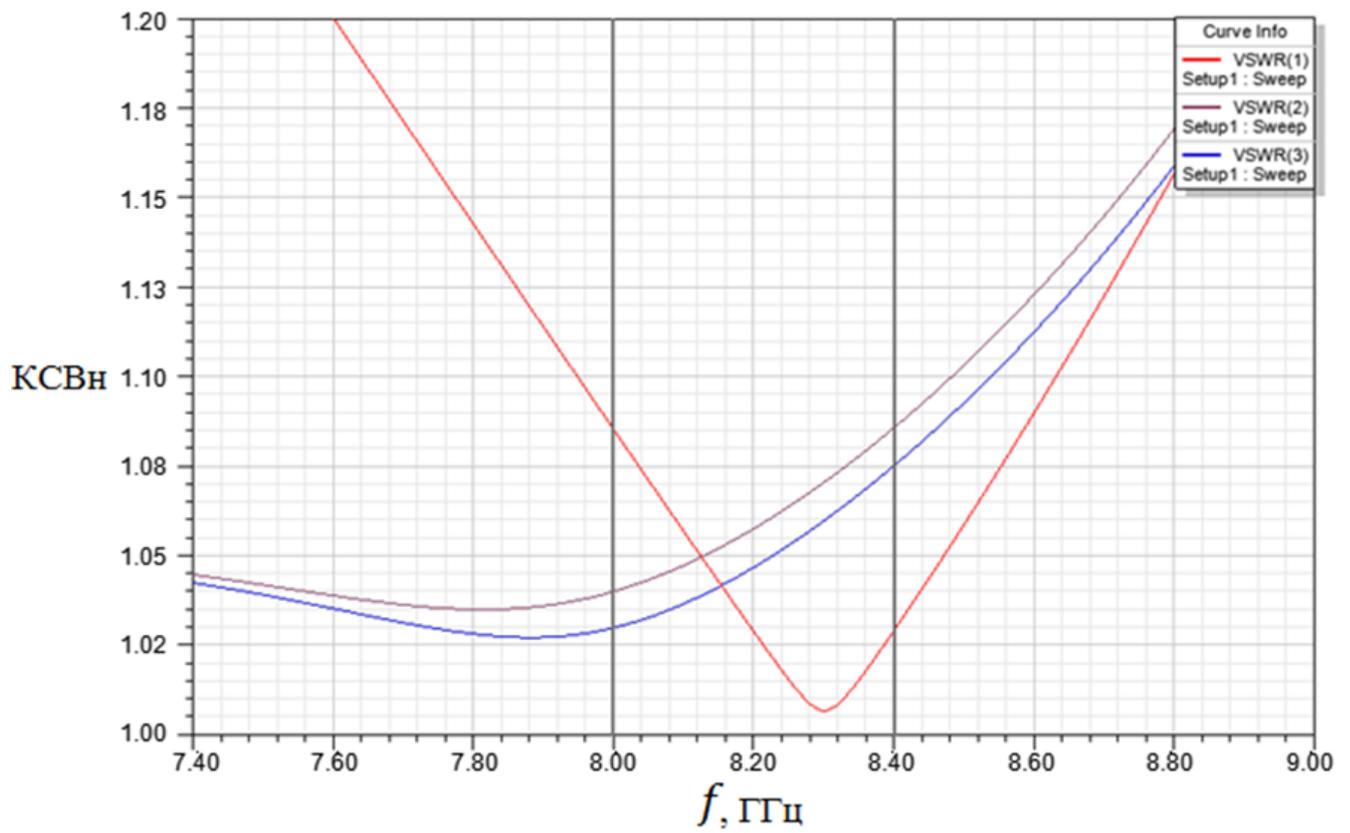


Рисунок 8 – Зависимость КСВн от частоты входа и выходов делителя.

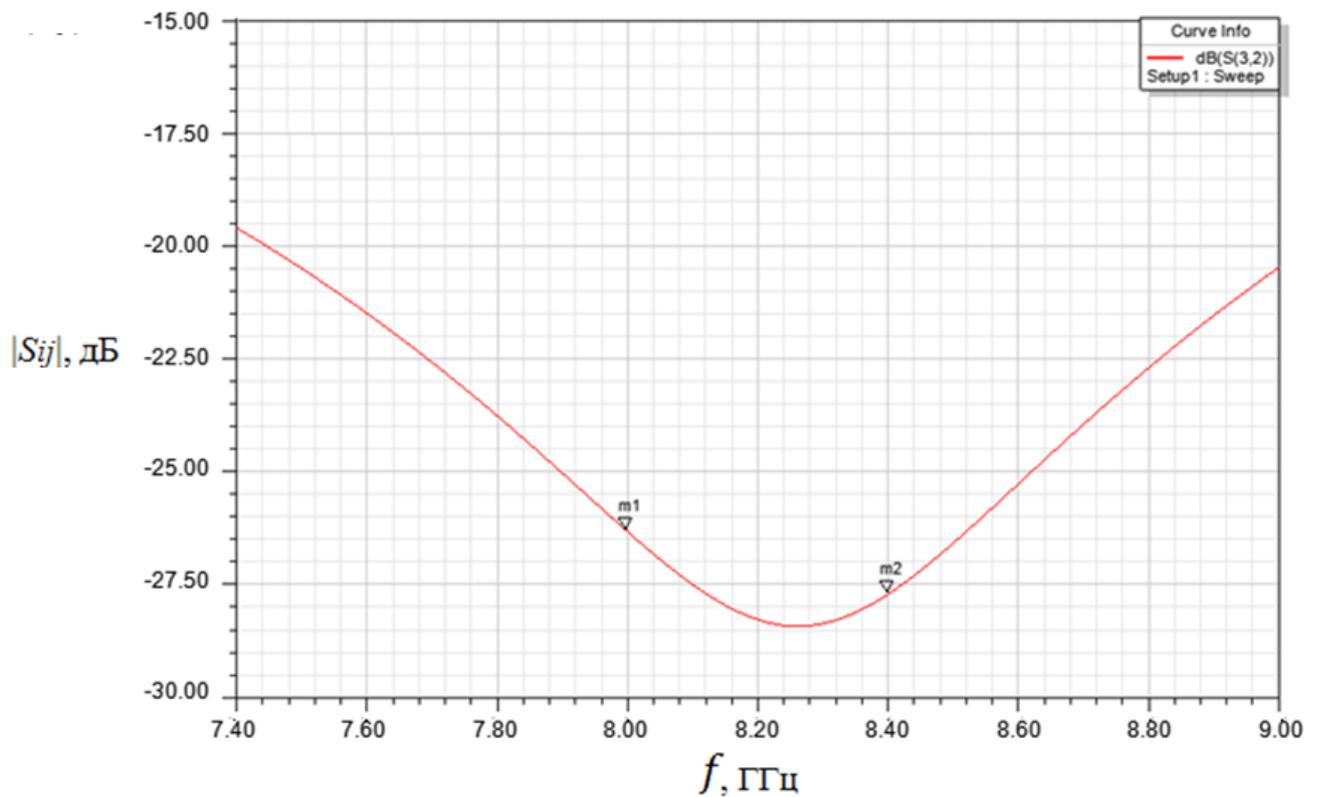


Рисунок 9 – Развязка между выходными каналами ДМ.

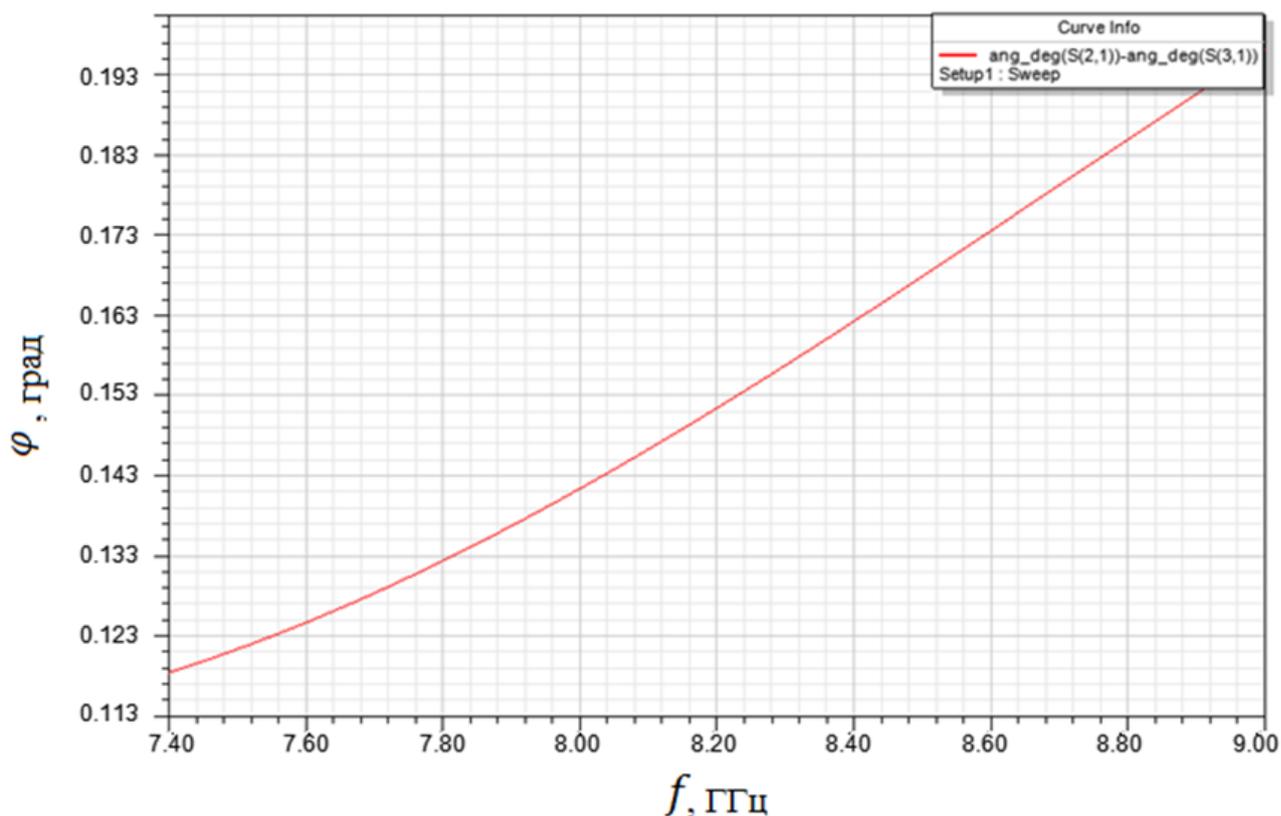


Рисунок 10 – Разность фаз на выходах ДМ.

Из рисунка 8 видно, что коэффициент стоячей волны по напряжению входа и выходов не превышает 1,05 в интересующей полосе частот, по результатам моделирования, представленным на рисунках 9 и 10, видно, что между выходными каналами достигается развязка не менее 27 дБ, а неидентичность выходов делителя мощности по фазе не более $0,2^\circ$.

Заключение

К устройствам распределения мощности предъявляют два главных требования: электрические длины и волновые сопротивления распределительных фидеров, включенных симметрично в схему подачи СВЧ сигнала, должны быть соответственно равными. Невыполнение этих требований нарушает работу системы питания антенной решетки.

Также важными требованиями для обеспечения точности электронного сканирования лучом исследуемой АФАР являются равноамплитудное и равнофазное деление с отклонениями между каналами амплитуд и фаз, а также высокая степень согласования тракта и нагрузки, характеризующаяся коэффициентом стоячей волны по напряжению.

На базе разработанного кольцевого резистивного делителя мощности, обеспечивающего КСВН входа и выходов не выше 1,05 в заданной полосе частот, развязку между выходными каналами не менее 27 дБ, и неидентичность выходов по фазе не более $0,2^\circ$, предполагается формирование всей распределительной системы СВЧ АФАР для реализации бортовой аппаратуры высокоскоростной радиолинии для использования в система радиосвязи перспективных космических аппаратов.

Предметом дальнейшего исследования является проектирование полотна излучателей, передающих модулей, устройств управления и АФАР в целом.

Список источников

1. Криков Д.С. Синтезаторы сетки частот в радиоэлектронных системах // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90403>
2. Androsov A.A., Karmanov I.N. Active phased array antenna (АРАА) // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. № 9. С. 153-157.
3. Парнес М.Д. Высокотехнологичные антенные решетки СВЧ на основе многослойных плат для радаров и систем связи: Дисс.... доктора техн. – Санкт-Петербург, 2011, 282 с.

4. Скобелев С.П. Фазированные антенные решетки с секторными парциальными диаграммами направленности. - М.: Физматлит, 2010. – 320 с.
5. Булыгин М.Л. Особенности реализации многолучевых режимов съемки с частотным разделением лучей в космических РСА на базе АФАР // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=93428>
6. Шишов Ю.А., Голик А.М., Подгорный А.В. и др. Способ цифрового формирования диаграммы направленности активной фазированной антенной решётки при излучении и приеме линейно-частотно-модулированных сигналов. Патент № 2732803 С1 РФ, МПК H01Q 21/00, 22.09.2020
7. Орешкин В.И., Мелешин Ю.М., Цветков В.К. Повышение точности пеленга сигнала в цифровой антенной решётке // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161424>. DOI: 10.34759/trd-2021-120-10
8. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны. - М.: Радиотехника, 2016. – 560 с.
9. Демшевский В.В., Цитович А.А., Левашов М.С., Стукалов М.А. Теоретическое исследование и разработка многоканального делителя/сумматора мощности х-диапазона устойчивого к внешним паразитным влияниям // 27-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" КрыМиКо'2017 (Севастополь, 10–16 сентября 2017): материалы конференции. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2017. С. 729-734.

10. Кузьмин Р.Э. Фазовая автоподстройка приемных каналов систем спутниковой связи // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=91978>
11. Сучков А.В., Рыжов Д.А. Узконаправленная волноводная антенна х-диапазона // XVIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (Сочи, 01–10 октября 2021): сборник трудов. – М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА имени профессора Н.Е.Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2021. С. 236-238.
12. Чистяков В.А. Алгоритм адаптивной фильтрации помех в цифровых антенных решетках спутниковой связи // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=104239>
13. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка прямоугольной микрополосковой антенны дециметрового диапазона для применения на космическом аппарате "Ионосфера" // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=35852>
14. Дробышев С.В. Принципы функционирования, классификация, тенденции развития и отличительные особенности антенных решеток // Наука и образование сегодня. 2016. № 10 (11). С. 13-17.
15. Шурховецкий А.Н., Алпатова А.В. Многолучевая антенная решетка миллиметрового диапазона на основе волноводной линзы Ротмана // Радиотехника. 2018. № 11. С. 94-98. DOI: 10.18127/j00338486-201811-15

16. Щетинин Н.Н., Андреев Р.Н., Чепелев М.Ю., Мельник В.А. Матричные схемы Батлера СВЧ-диапазона // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 10-1. С. 78-85.
17. Печурин В.А. Кольцевые делители-сумматоры мощности СВЧ диапазона с расширенной полосой рабочих частот: Дисс.... канд. техн. наук. Москва, 2010, 146 с.
18. Тушнов П.А., Бердыев В.С., Левитан Б.А. Исследование влияния конструктивных факторов на электрические параметры интегральных функциональных устройств приемопередающих модулей АФАР // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 4(7). С. 47-60. DOI: 10.18127/j00338486-202004(7)-06
19. Петров И.А. Проектирование линейных и нелинейных устройств сверхвысоких частот с использованием широкополосных согласующих структур // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29554>
20. Мунина И.В. Разработка и исследование направленных ответвителей СВЧ с расширенными функциональными возможностями, выполненных с применением многослойных технологий: Дисс.... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2015, 110 с.

References

1. Krikov D.S. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90403>

2. Androsov A.A., Karmanov I.N. Active phased array antenna (APAA), *Interekspos Geo-Sibir'*, 2018, no. 9, pp. 153-157.
3. Parnes M.D. *Vysokotekhnologichnye antennnye reshetki SVCh na osnove mnogoslainnykh plat dlya radarov i sistem svyazi* (High-tech microwave antenna arrays based on multilayer boards for radars and communication systems). Doctor's thesis, Sainkt-Petersburg, 2011, 282 p.
4. Skobelev S.P. *Fazirovannye antennnye reshetki s sektornymi partial'nymi diagrammami napravlenosti* (Phased antenna arrays with sector partial directional patterns), Moscow, Fizmatlit, 2010, 320 p.
5. Bulygin M.L. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93428>
6. Shishov Yu.A., Golik A.M., Podgornyi A.V. et al. *Patent № 2732803 C1 RF, MPK H01Q 21/00*, 22.09.2020
7. Oreshkin V.I., Meleshin Yu.M., Tsvetkov V.K. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161424>. DOI: 10.34759/trd-2021-120-10
8. Voskresenskii D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. *Ustroistva SVCh i anteny* (Microwave devices and antennas), Moscow, Radiotekhnika, 2016, 560 p.
9. Demshevskii V.V., Tsitovich A.A., Levashov M.S., Stukalov M.A. *27-ya Mezhdunarodnaya Krymskaya konferentsiya "SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii" KryMiKo'2017: materialy konferentsii*. Sevastopol', Sevastopol'skii gosudarstvennyi universitet, 2017, pp. 729-734.

10. Kuz'min R.E. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91978>
11. Suchkov A.V., Ryzhov D.A. *XVIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii» sbornik trudov*. Moscow, Assotsiatsiya vypusknikov i sotrudnikov VVIA imeni professora N.E.Zhukovskogo sodeistviya sokhraneniya istoricheskogo i nauchnogo naslediya VVIA imeni professora N.E. Zhukovskogo, 2021, pp. 236-238.
12. Chistyakov V.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104239>
13. Bocharov V.S., Generalov A.G., Gadzhiev E.V. *Trudy MAI*, 2013, no. 65. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35852>
14. Drobyshev S.V. *Nauka i obrazovanie segodnya*, 2016, no. 10 (11), pp. 13-17.
15. Shurkhovetskii A.N., Alpatova A.V. *Radiotekhnika*, 2018, no. 11, pp. 94-98. DOI: 10.18127/j00338486-201811-15
16. Shchetinin N.N., Andreev R.N., Chepelev M.Yu., Mel'nik V.A. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 8, no. 10-1, pp. 78-85.
17. Pechurin V.A. *Kol'tsevye deliteli-summatory moshchnosti SVCh diapazona s rasshirennoi polosoi rabochikh chastot* (Ring dividers-adders of microwave power with an extended operating frequency band). Doctor's thesis. Moscow, 2010, 146 p.
18. Tushnov P.A., Berdyev V.S., Levitan B.A. *Radiotekhnika*, 2020, vol. 84, no. 4 (7), pp. 47-60. DOI: 10.18127/j00338486-202004(7)-06

19. Petrov I.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 52. URL:
<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29554>

20. Munina I.V. *Razrabotka i issledovanie napravlennykh otvetvitelei SVCh s rasshirennymi funktsional'nymi vozmozhnostyami, vypolnennykh s primeneniem mnogosloinykh tekhnologii* (Development and research of directional microwave couplers with advanced functionality, made using multilayer technologies). Doctor's thesis. Saint-Petersburg, 2015, 110 p.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022

Одобрена после рецензирования 15.12.2022

Принята к публикации 27.02.2023

The article was submitted on 30.11.2022; approved after reviewing on 15.12.2022; accepted for publication on 27.02.2023