



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.2.12>

УДК: 621.396.6

## ПРИЁМОПЕРЕДАЮЩИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А.П. Панеева, Е.В. Комиссарова

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская д. 5

Статья поступила в редакцию 20.01.2024 г.

**Аннотация.** Анализируется состояние развития современной элементной базы АФАР для малых космических аппаратов, в частности, приёмопередающих модулей, с учетом наличия систем обеспечения теплового режима. По результатам сформулированы принципы построения приёмопередающих модулей и представлен их облик в случае применения в активных фазированных антенных решетках космического аппарата радиолокационного наблюдения X-диапазона.

**Ключевые слова:** приёмопередающий модуль, активная фазированная антенная решетка, космический аппарат.

**Автор для переписки:** Панеева Александра Павловна,  
[pap191075@student.bmstu.ru](mailto:pap191075@student.bmstu.ru)

## Введение

В настоящее время актуальным направлением является создание малых космических аппаратов (КА), что вызвано рядом причин:

- КА тяжелого класса занимают высокие орбиты, что делает данные орбиты недоступными для новых аппаратов;
- высокоорбитальные КА технологически сложны и требуют применения радиационно-стойкой электронной компонентной базы, что приводит к существенному удорожанию таких КА.

Малые КА (МКА) имеют ряд преимуществ по сравнению с высокоорбитальными группировками. Прежде всего, это унификация, позволяющая производить МКА серийно. Они имеют существенный выигрыш в энергетике, а также меньшие массогабаритные параметры по сравнению с КА тяжелого класса, что уменьшает стоимость их запуска. Кроме того, в МКА легко реализуется оперативная передача данных на станции наземного базирования.

С использованием МКА реализуются орбитальные группировки различного назначения: как для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), так и предоставления услуг широкополосного доступа, радиотелефонии, сотовой связи, что особенно актуально в труднодоступных районах, например, в Арктической зоне, а также для проведения исследований приземных слоев ионосферы и космического пространства. Большая часть малых КА осуществляет функцию ДЗЗ. Примером группировок, которые решают данную задачу, может служить финский проект «ICEYE», американский проект «Capella», японские проекты «StriX» и «QPS-SAR».

Антенные системы являются неотъемлемой частью любого КА, поскольку они применяются как для связи с наземными станциями, так и в исследовательской аппаратуре. Существуют различные варианты построения антенн, одним из которых является использование в составе аппарата активной фазированной антенной решетки (АФАР). Наряду с достоинствами, свойственными АФАР, такими как повышение энергетического потенциала

и дальности, они обладают рядом недостатков, главными из которых, несомненно, являются высокая стоимость, сложность построения антенной системы; и трудности реализации системы теплоотвода.

При построении бортовой радиотехнической системы необходимо выделить следующие задачи:

- создание схемы построения АФАР на основе перспективной полупроводниковой элементной базы, обеспечивающую возможность совмещения ряда функций в одной антенной системе;
- разработка оптимальных методов управления частотой, амплитудой и фазой сигналов в АФАР;
- увеличение излучаемой мощности и КПД при одновременном расширении рабочей полосы частот, уменьшении массы, габаритных размеров и стоимости приемопередающих модулей.

Таким образом, актуальной задачей является разработка отдельного антенного приемопередающего модуля (ППМ), который составляет основу антенной системы с АФАР.

## **1. Принципы построения приемопередающих модулей для бортовых АФАР**

Требования к ППМ бортовых АФАР, в особенности космического базирования на малом КА, формулируются исходя из того, что имеют место значительные ограничения по массогабаритным характеристикам. С ростом частоты шаг антенной решетки уменьшается, а, следовательно, возникают технологические трудности компоновки АФАР, вследствие уменьшения зазоров между ППМ, в которых размещается как каркас, представляющий собой несущую конструкцию антенной решетки, так и элементы системы обеспечения теплового режима АФАР, а также линии системы управления.

В таблице 1 приведены зависимости габаритных размеров корпуса ППМ от используемого частотного диапазона. В таблице взяты центральные частоты рабочих диапазонов, при этом антенная решетка считается эквидистантной с шагом равным  $\lambda/2$  ( $\lambda$  – длина волны).

Из таблицы 1 следует, что с увеличением частоты в СВЧ диапазоне резко уменьшаются габаритные размеры корпуса ППМ и величина зазора между соседними модулями, что приводит к усложнению размещения систем обеспечения теплоотвода. В низкочастотной части СВЧ диапазона зазор достигает нескольких сантиметров и вопрос компоновки ППМ практически не имеет технологических проблем. Следовательно, актуальным является решение задачи проектирования АФАР диапазонов С, Х, Ku и выше.

Таблица 1. Влияние диапазона частот на габаритные размеры ППМ и величина зазоров между модулями в АФАР.

Диапазон	Центральная рабочая длина волны, мм	Шаг решетки, мм	Габаритный размер корпуса ППМ, мм	Зазоры между ППМ, мм
S	100	50	30	20
C	50	25	16	9
X	30	15	10	5
Ku	20	10	6	4

На сегодняшний день на территории РФ основными разработчиками ППМ для АФАР являются такие предприятия как НПФ «Микран», ОАО «НИИПП», ОАО «НПП «Пульсар», АО «НПП «Исток» им. Шокина», ЗАО «Микроволновые системы».

В ОАО «НИИПП» ведется разработка многоканальных интегрированных планарных ППМ АФАР с использованием технологии LTCC-керамики [1]. Модуль включает в себя активные элементы, антенные излучатели, системы распределения сигналов СВЧ и управления, вторичный источник питания, управляющий цифровой контроллер с интерфейсной схемой, систему жидкостного охлаждения. Разработанные модули имеют ряд преимуществ, таких как возможность объединения модулей для создания антенных решеток

любых размеров, что позволяет упростить создание несущей конструкции; применение перспективных материалов, например, низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC), композитных материалов, многослойных микроканальных жидкостных охлаждающих структур, позволяющих улучшить технические характеристики ППМ; малые массогабаритные характеристики; высокую надежность, ремонтпригодность и технологичность, а также низкую стоимость.

На рис. 1 приведены разработанные в ОАО «НИИПП» ППМ М55328, М55323, М55326.



Рис. 1. Примеры модулей, разработанных ОАО «НИИПП»,  
а – ППМ М55328, б – ППМ М55323, в – ППМ М55326.

Модуль М55328, показанный на рис. 1 а, предназначен для работы в миллиметровом диапазоне длин волн, имеет выходную мощность не менее 15 мВт. Он выполняется в виде интегрированной в металлическом корпусе конструкции. Рабочая полоса частот не превышает 1,5 %. Вход-выход КВЧ сигнала модуля – волноводный. Масса модуля не превышает 50 г. Модуль М55323 (рис. 1 б) трехмиллиметрового диапазоне длин волн, обладает выходной мощностью более 1 мВт и выполнен по интегрированной технологии в едином металлическом корпусе. Однако его габаритные размеры в поперечном сечении составляют более  $6,8\lambda$ , что требует решения технологических проблем, связанных возникновением побочных главных лепестков в диаграмме направленности, а масса ППМ составляет 95 грамм.

Широкополосный модуль М55326, изображенный на рисунке 1. в, разработан на основе современных арсенид-галлиевых, гибридно-монолитных интегральных схем, имеет герметичную конструкцию. При рабочем диапазоне частот от 5 до 16 ГГц ППМ имеет габаритные размеры модуля составляют  $70 \times 64 \times 12$  мм<sup>3</sup> и массу не более 150 г.

Пример планарного модуля АФАР Х-диапазона на основе ЛТСС-керамики, разработанного в ОАО «НИИПП», показан на рис. 2. Данные модули имеют толщину порядка  $0,4\lambda$ , высокую стойкость к внешним воздействующим факторам, они технологичны и имеют высокую повторяемость и стабильность характеристик. ППМ обладают интегрированным высокоскоростным синхронным последовательным интерфейсом управления с возможностью объединения модулей для создания антенн любого размера, что снижает их стоимость.

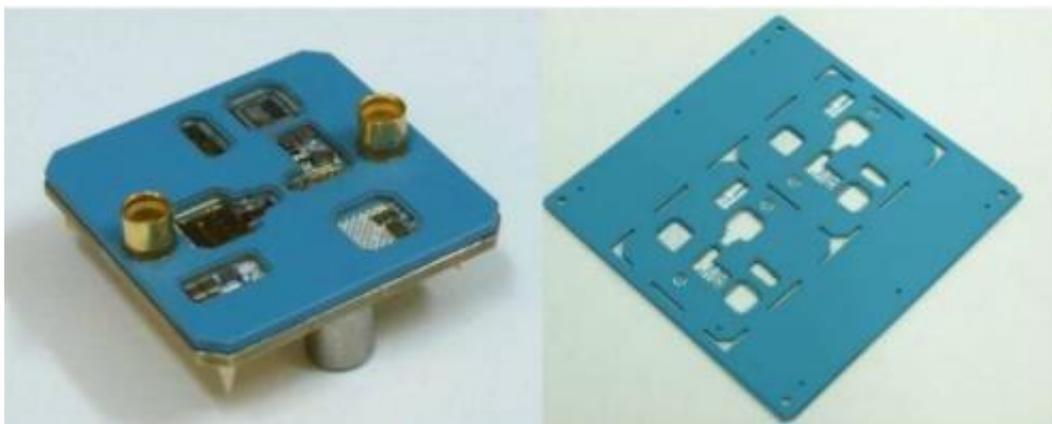


Рис. 2. Планарный модуль Х-диапазона.

В НПФ «Микран» ведется разработка ППМ С- и Х-диапазонов [2]. На рис. 3 показаны примеры ППМ, разработанные НПФ «Микран».

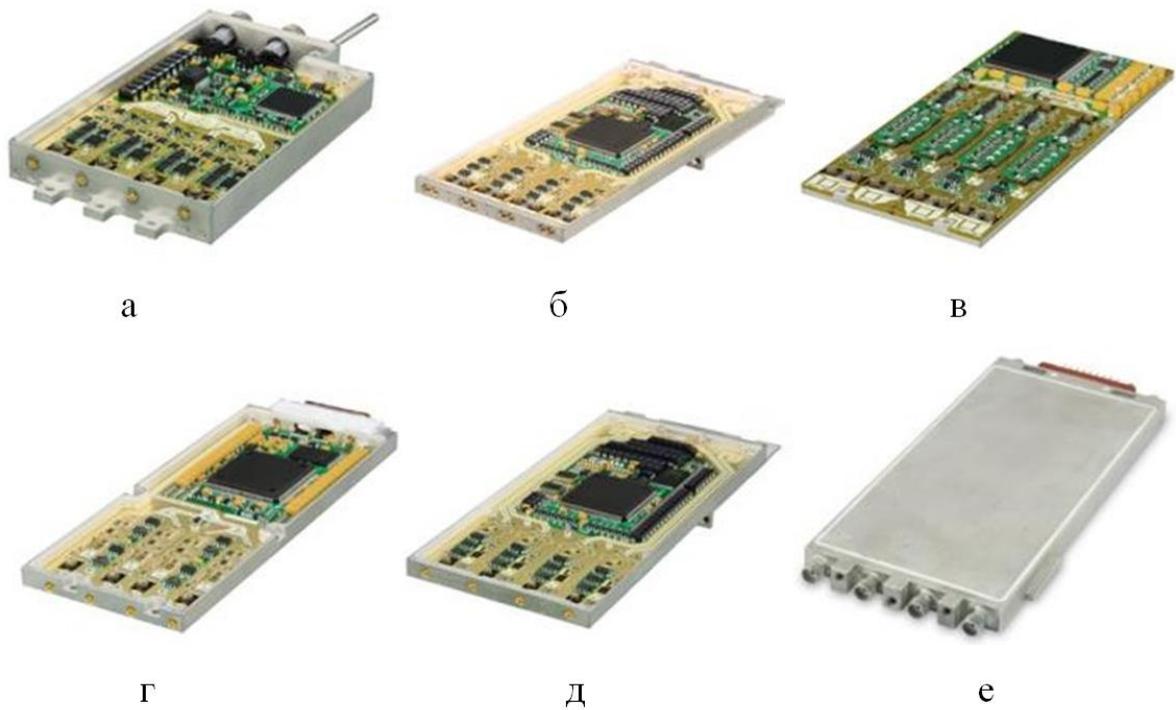


Рис. 3. Примеры модулей, разработанных НПФ «Микран».

Они работают в диапазонах от С до Х, имеют от одного до четырех входов на четыре выхода, встроенные вторичный источник питания с нагрузочной способностью до 200 Вт и память для хранения корректирующих кодов (коррекция проводится в диапазоне рабочих частот и температур), линии управления TTL, LVDS, RS485, соединители SMP либо SMA и герметичный корпус.

В ОАО «НПП «Пульсар» ведется разработка ППМ для АФАР, пример реализации модуля X-диапазона [3] приведен на рис. 4.

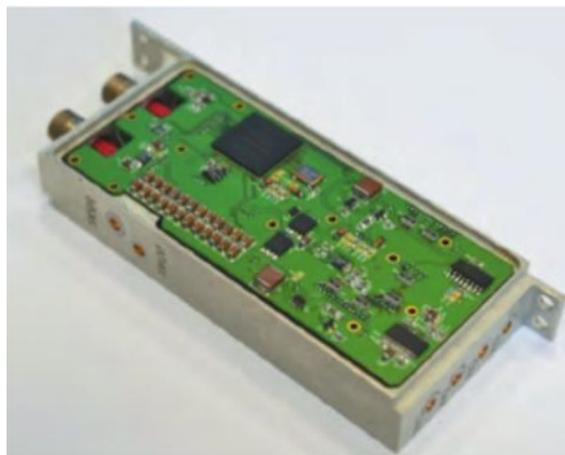


Рис. 4. ППМ, изготовленный ОАО «НПП «Пульсар».

Модуль разработан и изготовлен для РЛС с АФАР космического базирования, работающей в X-диапазоне. Конструктивно ППМ представляет одноканальный двухполяризационный модуль, в котором осуществлена возможность корректировки ФЧХ как приемных, так и передающих каналов.

В работе [4] рассмотрен многофункциональный ППМ, разработанный в АО «НПП «Исток» им. Шокина» и показанный на рис. 5, где приводится его конструкция и обосновывается использование современного перспективного композиционного материала AlSiC в составе разработанного модуля, а также приводятся результаты экспериментальной проверки приемного и передающего каналов. Отмечено, что модуль разработан с использованием технологии LTCC-керамики. Управление и питание элементов модуля разделено между слоями внутри многослойной платы, что позволяет уменьшить массогабаритные параметры ППМ. В составе ППМ применяется основание из композиционного материала AlSiC, что позволяет снизить массу основания в три раза без снижения электрической прочности и ухудшения теплоотвода.

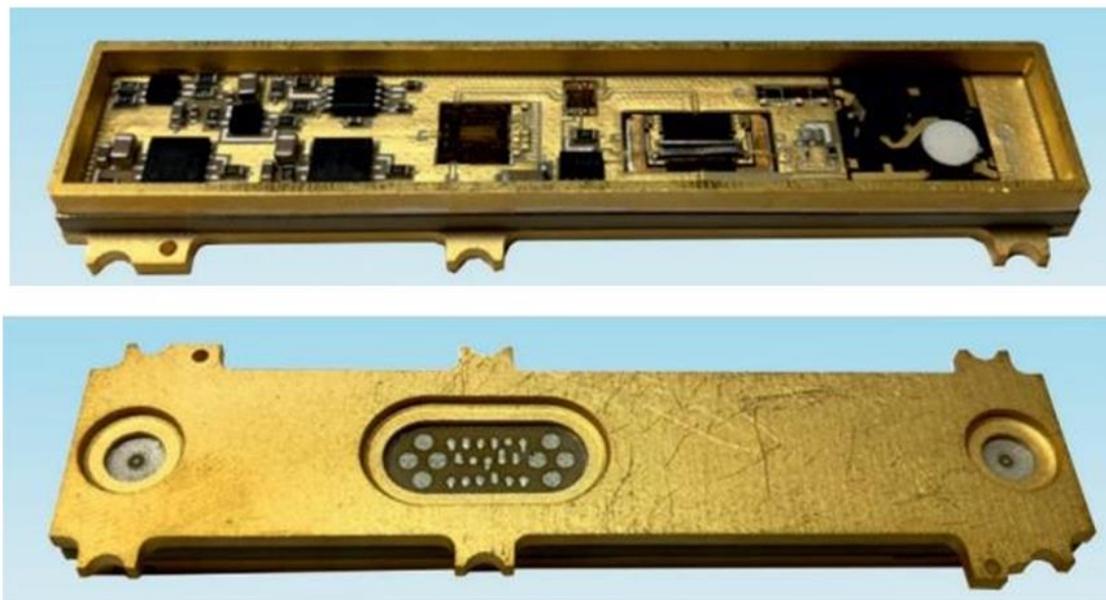


Рис. 5. ППМ АО «НПП «Исток» им. Шокина».

В статье [5] анализируются варианты построения АФАР с различными диаграммообразующими схемами, исходя из чего меняется конфигурация ППМ. Указывается принципиальная возможность применения как одноканального,

так и многоканального ППМ, причем многоканальный модуль может быть brick (кирпичного) или tile (плиточного) типа. Представлена упрощенная структура данных типов построения, описаны элементы, составляющие основу модуля АФАР, приведены примеры реализации двух типов модулей в разных системах.

В статье [6] представлен вариант реализации tile-модуля (рис. 6), работающего в Ka-диапазоне, с архитектурой построения, позволяющей уменьшить толщину, вес и стоимость антенной решетки. Модуль АФАР содержит шестнадцатиеlementную антенную решетку (размером  $4 \times 4$ ), габаритными размерами  $3,6\lambda \times 3,6\lambda \times 0,85\lambda$  и межэлементным расстоянием  $0,94\lambda$ . Кроме того, в модуль интегрирован ППМ с шестнадцатиканальной сетью деления мощности, в каждый канал которой входит четырехбитный фазовращатель на p-i-n диодах (с вносимыми потерями 4,5 дБ) и усилитель мощности на основе рНЕМТ транзисторов (с коэффициентом усиления около 20 дБ, выходной мощностью около 100 мВт и КПД равным 25 %). В качестве системы управления используется шина данных, по которой передаются логические команды для управления амплитудно-фазовым распределением. Для предотвращения сильного нагрева ППМ на его задней стороне расположена холодная пластина. Компактность модуля обеспечивается тем, что компоненты, входящие в состав модуля расположены в разных слоях платы, и имеют вертикальные связи.

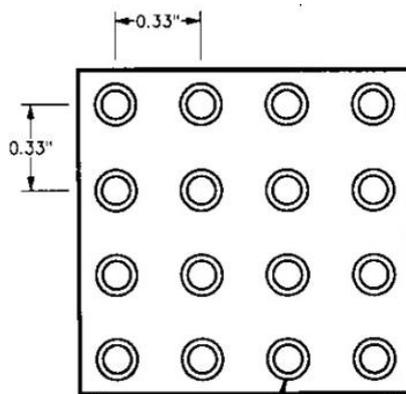


Рис. 6. Эскиз ППМ, работающего в Ka-диапазоне.

В статье [7] представлен модуль АФАР, входящий в состав антенной системы немецкого исследовательского КА «Генрих Герц» (рис. 7), запущенного в июле 2023 года. Модуль Ka-диапазона имеет приемный блок из 16 элементов (4×4), в котором применяется специальная гибкая многослойная подложка, позволяющая интегрировать множество элементов на ограниченном пространстве одного слоя. Передающий модуль состоит из 64 излучателей (8×8), плата которого содержит 17 слоев на основе LTCC-керамики.

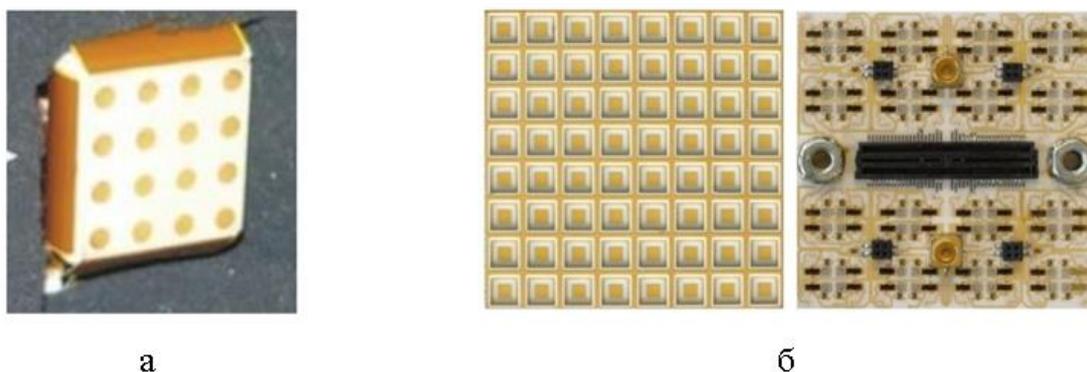


Рис. 7. Модуль приемной (а) и передающей (б) антенн Ka-диапазона.

В работе [8] описан ППМ tile-типа X-диапазона (рис. 8). Модуль содержит 16 элементов (4×4), габаритные размеры которого  $2\lambda \times 2\lambda \times 0,53\lambda$  включая слои металлического радиатора.

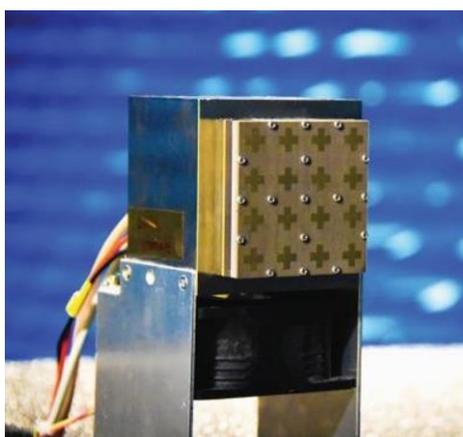


Рис. 8. ППМ X-диапазона.

На рис. 9 представлен многофункциональный приемо-передающий модуль АФАР X-диапазона [9]. Составные элементы модуля располагаются на LTCC

керамике, многослойность которой позволяет произвести необходимую разводку СВЧ и НЧ проводников внутри платы, что уменьшает массогабаритные параметры модуля. Для теплоотвода от усилителей мощности LTCC керамика расположена на металлическом основании.

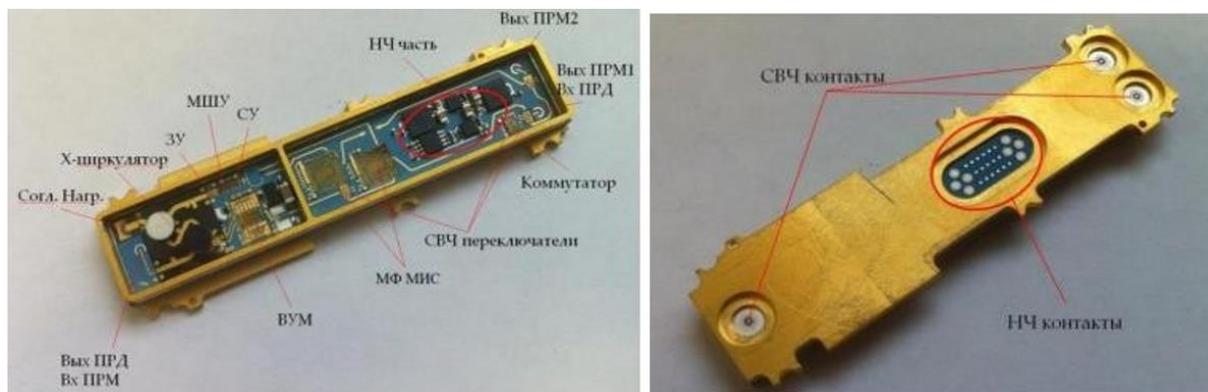


Рис. 9. ПИМ АФАР X-диапазона.

В работе [10] представлен ПИМ tile-структуры, внешний вид которого изображен на рис. 10. Модуль предназначен для работы в составе АФАР размером  $8 \times 8$ , является достаточно компактным за счет использования пятислойной печатной платы толщиной  $0,1\lambda$ . Два верхних слоя для излучающих элементов с активными элементами, два нижних слоя для линий управления и линии электропитания, последний слой предназначен для заземления. При моделировании было определено значение вносимых потерь в каждом канале – около 14 дБ (включая потери 12 дБ в сети деления мощности).

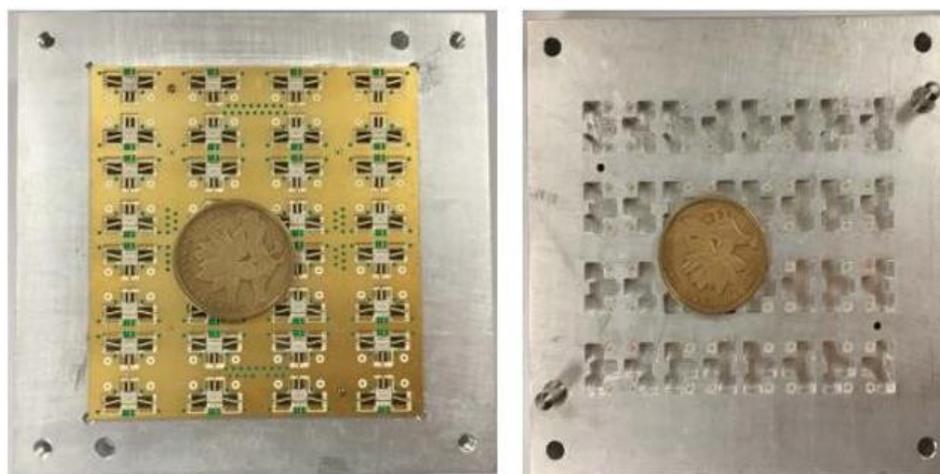


Рис. 10. ПИМ плиточного типа.

ППМ сантиметрового диапазона длин волн описан в статье [11]. ППМ tile типа на основе многослойной печатной платы (рис. 11) имеет размер  $5,7\lambda \times 3,4\lambda$  с массой одного канала порядка 2 г. Взаимодействие между слоями платы осуществляется посредством коаксиального вертикального перехода. В ППМ предусмотрена система теплоотвода и экранирование. ППМ обладает высокой степенью интеграции и низкой стоимостью изготовления.

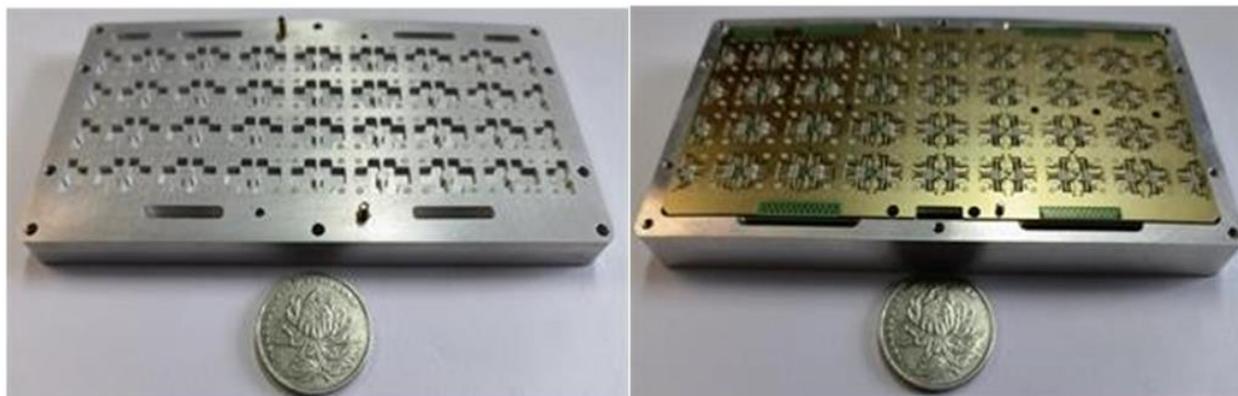


Рис. 11. ППМ плиточного типа.

В патенте [12] представлен многоканальный, герметичный, компактный ППМ плиточного типа. Общий вид ППМ представлен на рис. 12. Здесь показаны слои печатной LTCC платы, составляющую основу ППМ, и обеспечивающие радиочастотные соединения, питание постоянным током и управление, а также промежуточные устройства, для передачи питания постоянного тока и сигналов управления

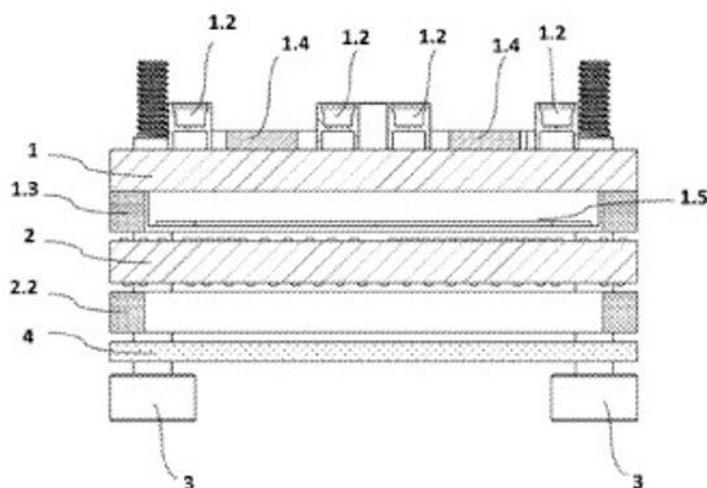


Рис. 12. Общий вид ППМ.

В статье [13] представлена реализация многоканального ППМ плиточного типа (рис. 13). Модуль обладает высокой надежностью, малыми массогабаритными характеристиками. Технология LTCC используется для достижения высокой плотности размещения радиочастотных устройств. Модуль объединяет 4 изолированных приемо-передающих канала размером  $40 \times 40 \times 10 \text{ мм}^3$ .

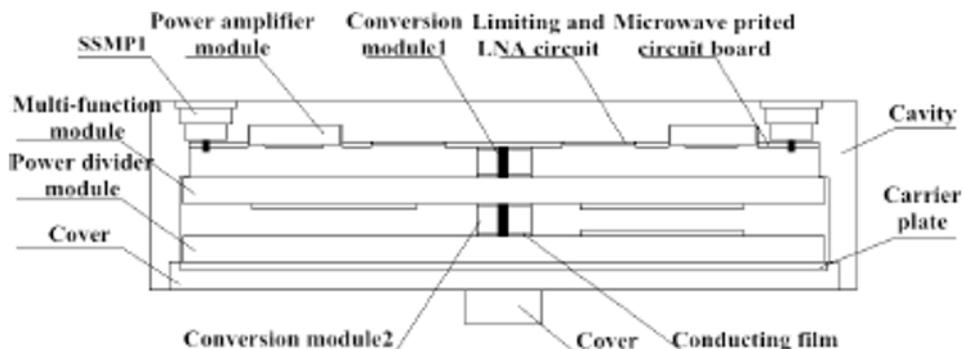


Рис. 13. Структура многослойной платы ППМ.

Пример варианта компактного антенного модуля на LTCC-керамике Ка-диапазона представлен в статье [14]. Компанией ООО «Базовые технологии» была проведена работа по созданию многослойной СВЧ-платы для антенного модуля Ка-диапазона (рис. 14 и рис. 15) для систем спутниковой связи. В качестве материала подложки была выбрана LTCC керамика производства АО «НПП «Исток» им. Шокина». Габаритные размеры модуля  $3,6\lambda \times 3,6\lambda \times 0,3\lambda$ .

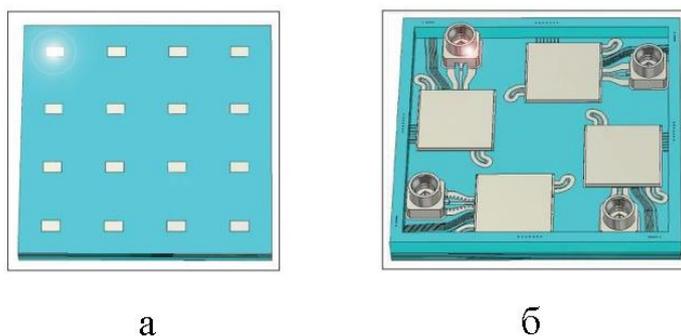


Рис. 14. Модуль АФАР Ка-диапазона:  
 а – лицевая сторона модели антенного модуля,  
 б – обратная сторона антенного модуля.

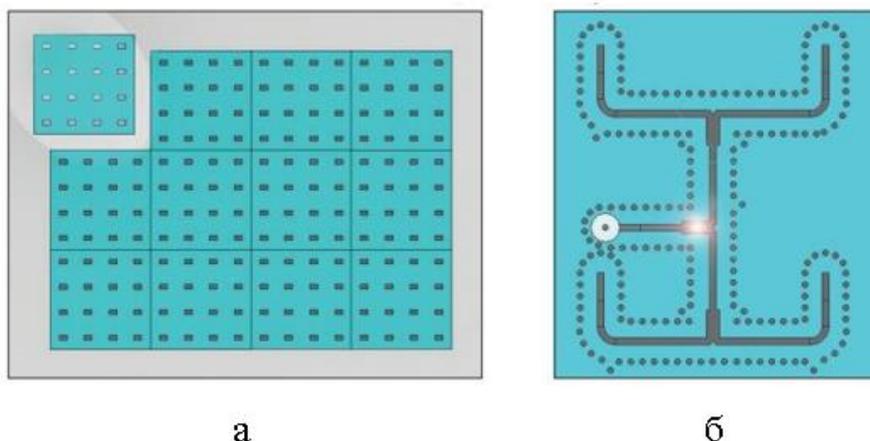


Рис. 15. Модульная АФАР: а – принцип расширения антенной решетки за счет увеличения количества модулей;  
б – схематичное изображение системы деления для подрешетки размером  $2 \times 2$ .

На технический облик антенной системы влияет не только конструкция ППМ, но и организация зазоров между модулями.

В патенте [15] представлен ППМ АФАР Ка-диапазона с двухступенчатой системой охлаждения. Необходимый отвод тепла от малогабаритных модулей реализуется с помощью плоских тепловых труб (толщиной до 2 мм). Такое техническое решение было принято ввиду малого шага между модулями (до 5 мм). Тепловые трубы установлены одной стороной непосредственно под печатной платой внутри корпуса ППМ. Зона испарения тепловой трубы располагается внутри корпуса приемо-передающего модуля, а зона конденсации – вне корпуса (рис. 16).

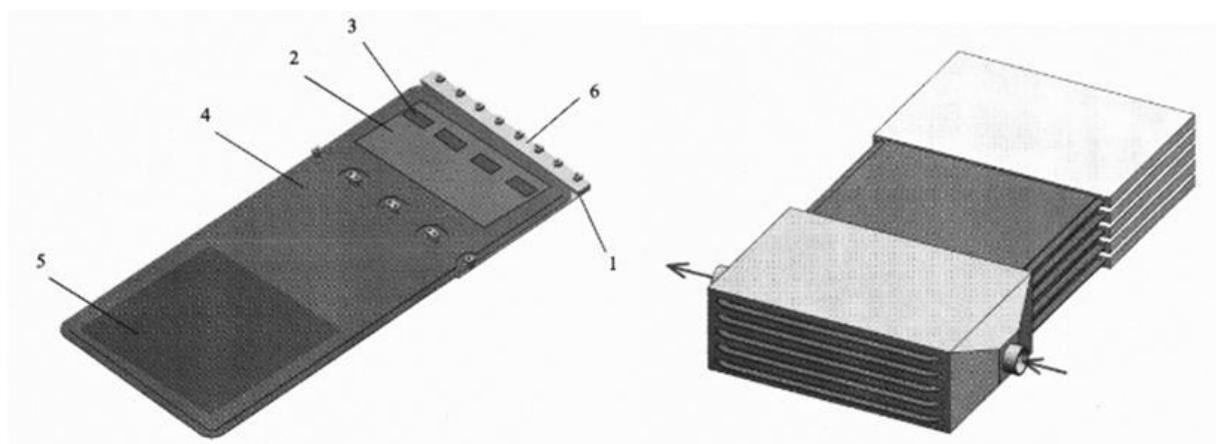


Рис. 16. Приемо-передающий модуль активной фазированной антенной решетки Ка-диапазона с двухступенчатой системой охлаждения.

В патенте [16] показан вариант реализации корпуса ППМ АФАР, с каналом охлаждения, расположенным внутри корпуса и имеющим поперечное сечение  $5 \times 30 \text{ мм}^2$ , толщина стенок канала от 0,5 до 1,5 мм (рис. 17). Внутри канала присутствуют перегородки в тех областях корпуса, где размещаются наиболее мощные СВЧ-элементы ПММ. При суммарном тепловыделении 90 Вт и работе системы охлаждения с расходом 5 л/мин, при температуре окружающей среды до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  температура основных элементов в данном ППМ не превышает  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ .

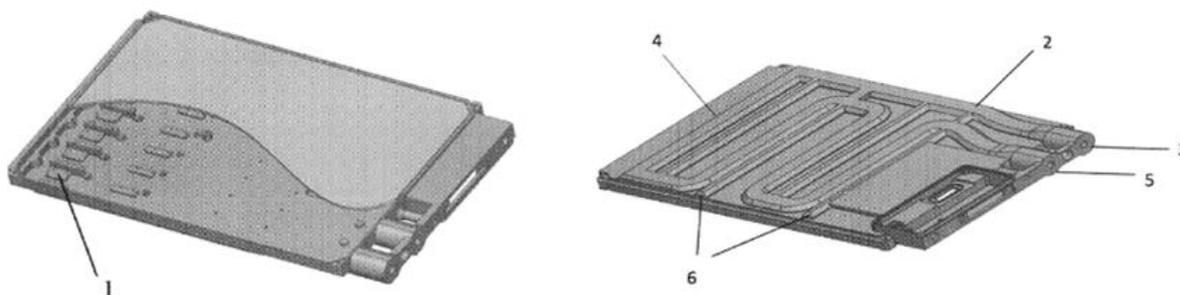


Рис. 17. Корпус приемно-передающего модуля активной фазированной антенной решетки, изготовленной методом послойного лазерного синтеза.

В патенте [17] показан вариант исполнения ППМ АФАР с теплоотводящим основанием в виде плоской тепловой трубки (рис. 18). В состав модуля входит плоская тепловая трубка толщиной от 1 до 4 мм, при этом, на тепловой трубке размещена печатная плата с радиоэлектронными тепловыделяющими элементами. В плате выполнены отверстия для крепления тепловыделяющих элементов непосредственно на тепловую трубку. С внешней стороны корпуса закреплен теплообменник внешней системы охлаждения.

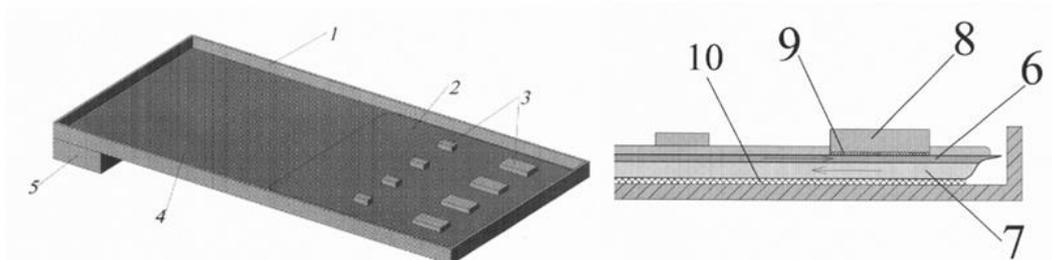


Рис. 18. Приемно-передающий модуль АФАР с теплоотводящим основанием в виде плоской тепловой трубки.

По результатам обзора и анализа существующих конструкций определить следующие направления развития при разработке модулей АФАР:

- удешевление производства и уменьшение массогабаритных характеристик АФАР достигается переходом от архитектуры модулей brick-типа к tile-типу;
- применение полупроводников SiGe, InP, GaN, керамических материалов необходимо для повышения уровня мощности и скорости работы ППМ;
- переход от аналогового диаграммообразования к цифровому позволяет расширить функциональные возможности АФАР;
- в СВЧ- и КВЧ- диапазонах эффективно охлаждение помощью тепловых труб.

### **Заключение**

По результатам анализа существующих конструкций модулей АФАР с ППМ определена конфигурация антенного модуля, АФАР X-диапазона для МКА РЛН:

- составные элементы антенного модуля располагаются на многослойной печатной плате по LTCC-технологии;
- антенный модуль имеет плиточный тип;
- габаритные размеры модуля X-диапазона, для конфигурации решетки антенного модуля  $3 \times 3$  элемента, составят  $40 \text{ мм} \times 40 \text{ мм}$ ;
- антенный модуль включает плоские тепловые трубы для обеспечения теплоотвода.

## Литература

1. Каталог предприятия АО «НИИПП» *Date of access:* 29.09.2023.  
URL: <http://www.niipp.ru/catalog/>
2. Каталог предприятия АО НПФ «Микран» *Date of access:* 29.09.2023.  
URL: [https://www.micran.ru/productions/microwave\\_electronics/](https://www.micran.ru/productions/microwave_electronics/)
3. Каталог предприятия АО НПП «Пульсар» *Date of access:* 29.09.2023.  
URL: <https://pulsarnpp.ru/kompleksirovannye-izdeliya/svch-moduli>
4. М.С. Карасев Многофункциональный приемопередающий модуль X-диапазона частот, Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника, вып. 3(542), 2019
5. А.В. Шишлов, В.В. Денисенко, Б.А. Левитан Активные фазированные антенные решетки – состояние и тенденции развития, Журнал радиоэлектроники, 2023
6. Sanzgiri S., Bostrom D. Pottenger W., Lee R.-Q. A Hybrid Tile Approach for Ka Band Subarray Modules. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1995 V.43. №9. P.953-959. <https://doi.org/10.1109/8.410212>
7. Holzwarth S., Jacob A.F., Dreher A., Hunscher C., Fischer H., Stark A., Rohrdantz B., Geise A., Kuhlmann K., Gieron R., Litschke O., Lohmann D., Simon W., Buchner P., Heckler M.V.T., Greda L.A. Active Antenna Arrays at Ka-Band: Status and Outlook of the SANTANA Project. Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. Barcelona. 2010 P.1-5.
8. Ortiz J.A., Salazar J.L., D'iaz J., Sim S., Aboserwal N., Chun J., and Jeon L. Ultra-compact universal polarization X-band unit Cell for High- Performance Active Phased Array Radar. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Waltham-Boston, 2016  
<https://doi.org/10.1109/ARRAY.2016.7832592>
9. Перспективный многофункциональный приемо-передающий модуль АФАР X-диапазона и методика измерения его параметров Карасев М.С., Далингер А.Г., Шацкий С.В., Жерновенков В.А., АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2017
10. Tile Type Multi-Channel Transceiver Module Applied for Phased Array Antenna,

Fuzhou Tai, Jian Zhang, Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu, China, 2018

11. Zhou, T. and Zhang, J. (2021) Research of Tile Type Transceiver Module Integrating with Two-Dimensional Sum Difference Network. Journal of Computer and Communications, 9, 116-124. <https://doi.org/10.4236/jcc.2021.912009>.
12. Патент Structure of a tile receiver/transmitter module with high power output WO 2019/168484 A2, 2019
13. Ziran Chen, Zhi Huang, Qi Zhang and Meng Zhang Design and Research of Highly Integrated Multi-channel Tiletype T/R Module, Journal of Physics: Conference Series, 2021 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2065/1/012008>
14. Царьков А., Бочкова Е., Нечаев В. Компактный антенный модуль на LTCC-керамике Ka-диапазона, СВЧ-электроника, №1, 2021
15. Патент Приемно-передающий модуль активной фазированной антенной решетки Ka-диапазона с двухступенчатой системой охлаждения RU 196690 U1 Публикация: 2020.03.11
16. Патент Корпус приемно-передающего модуля активной фазированной антенной решетки, изготовленной методом послойного лазерного синтеза RU 190821 U1 Публикация: 2019.07.15
17. Патент Приемно-передающий модуль АФАР с теплоотводящим основанием в виде плоской тепловой трубки RU 189664 U1 Публикация: 2019.05.30

**Для цитирования:**

Панеева А.П., Комиссарова Е.В. Приёмопередающий модуль для активной фазированной антенной решетки малого космического аппарата. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.2.12>.