

# Многолучевая приемо-передающая АФАР S-диапазона

А.Г. Ефимов<sup>1</sup>, С.А. Корнеев<sup>1</sup>, И.А. Костылев<sup>1</sup>, В.В. Хворенков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Ижевский радиозавод»

<sup>2</sup>Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова

**Аннотация:** Рассмотрена концепция реализации многолучевых антенных систем на основе АФАР для низкоорбитальной системы связи. Показано, что использование турникетного излучателя на базе печатной технологии позволяет снизить трудоемкость изготовления без ухудшения технических параметров в широком секторе сканирования. Даны рекомендации по обеспечению электромагнитной совместимости связанных систем за счет разнесения антенн и использования полосно-пропускающих фильтров.

**Ключевые слова:** приемная и передающая АФАР, излучатель, диаграмма направленности, сектор сканирования, полосно-пропускающий фильтр.

## 1. Введение

Одним из направлений развития современных систем спутниковой связи стали системы связи на основе низкоорбитальных космических аппаратов. К низкоорбитальным относят космические аппараты с высотой орбиты от 700 до 1500 км. Низкоорбитальная группировка может содержать до нескольких десятков малых космических аппаратов на орбитах в разных плоскостях, что позволяет реализовать максимальную зону покрытия, включая приполярные районы, где невозможно использование спутниковых ретрансляторов на геостационарной орбите [1]. В настоящее время идет активное наращивание спутниковой группировки системы Spacex, которая имеет 36 абонентских лучей с сектором сканирования  $\pm 17$  градусов, и системы OneWeb с 16 абонентскими лучами в секторе  $\pm 30$  градусов [2].

Энергетические характеристики спутников-ретрансляторов, их количество и орбиты определяют сложность абонентского терминала, его стоимость и эксплуатационные характеристики [3]. Бортовые антенны с широкой диаграммой направленности имеют малое усиление, повышение усиления антенны приводит к сужению диаграммы направленности и уменьшению зоны покрытия. Одним из вариантов решения является использование многолучевых антенн, которые обеспечивают приемлемое усиление и требуемую зону покрытия.

Данная работа посвящена оценкам возможных характеристик варианта приемо-передающей антенны спутниковой системы, а именно, – излучающей апертуры многолучевой антенны на базе активной фазированной антенной решетки (АФАР).

При проектировании связной приемо-передающей АФАР целью является достижение уровня максимальной развязки между приемным и передающим каналами. С учетом возможностей размещения антенной системы на космическом аппарате необходимо максимально разнести приемную и передающую апертуры, что значительно облегчает решение поставленной задачи. Дополнительная развязка обеспечивается за счет использования полосно-пропускающих фильтров на входе приемного тракта и на выходе передающего тракта.

## 2. Выбор типа излучателя и моделирование излучающей апертуры

Для решения поставленной задачей необходимо спроектировать две апертуры АФАР для S диапазона частот с круговой поляризацией:

- на прием с центральной частотой 2000 МГц;
- на передачу с центральной частотой 2200 МГц.

В секторе сканирования  $\pm 55$  градусов необходимо получить максимальное усиление при максимальной ширине диаграммы направленности (ДН) и минимальном уровне боковых лепестков (УБЛ).

На начальном этапе проектирования производится выбор типа излучателя, расчет его геометрических и электрических характеристик. Определяющим параметром при выборе типа излучателя является требование на заданный сектор сканирования. С учетом этого требования ширина диаграммы направленности используемого излучателя должна составлять величину порядка  $110^\circ$ . При этом излучаемое поле должно иметь круговую поляризацию.

Наиболее полно способен выполнить поставленные требования турникетный излучатель. К основным достоинствам такого излучателя относятся:

- возможность изменения ширины ДН в большом диапазоне (от  $70...80^\circ$  до  $120...140^\circ$ ) путем изменения высоты его расположения над экраном и угла наклона плеч вибратора;
- возможность согласования излучателя в достаточно широком диапазоне частот (порядка 10-15%) с помощью подбора ширины подводящих линий;
- возможность использования печатной технологии при его изготовлении, что обуславливает его относительную дешевизну, и способность работать в открытом космосе при правильном выборе диэлектрической подложки.

В качестве подложки предлагается использовать диэлектрический материал FR4, сертифицированный для работы в открытом космосе, толщиной 1 мм. Такая толщина диэлектрика, с одной стороны, обеспечивает достаточную жесткость конструкции, а, с другой стороны, она составляет очень малую величину по сравнению с рабочей длиной волны ( $\lambda \sim 15$  см), что позволяет рассматривать данную подложку как несущую конструкцию, практически не влияющую на электрические характеристики самого излучателя.

Диаграмма направленности одиночного турникетного излучателя приведена на рисунке 1.

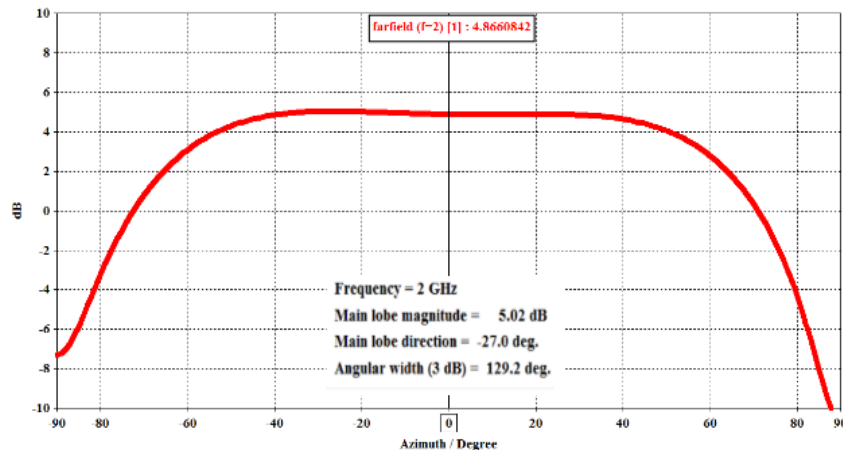


Рисунок 1. Диаграмма направленности турникетного излучателя

Диаграмма направленности АФАР из 16 элементов приведена на рисунке 2. При выборе вариантов реализации излучателя и выборе межэлементного расстояния особое внимание уделялось сохранению коэффициента усиления антенны на предельных углах сканирования.

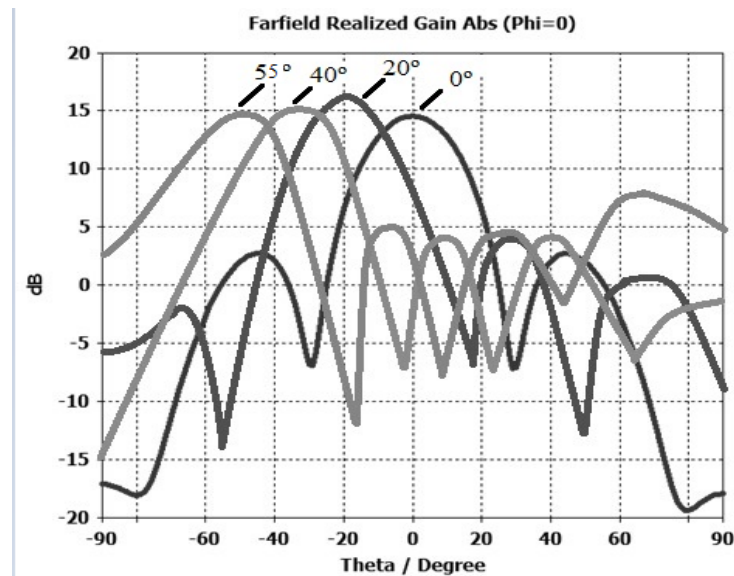


Рисунок 2. Диаграмма направленности АФАР при сканировании

Анализ представленных данных позволяет сказать, что коэффициент усиления решетки более 14 дБ, а уровень боковых лепестков менее минус 10 дБ во всем секторе сканирования, что удовлетворяет заданным требованиям. Следует отметить, что при максимальных углах сканирования не наблюдается снижение коэффициента усиления антенной решетки, что важно при работе с максимальной наклонной дальностью между спутником и наземной абонентской станцией. Аналогичные результаты получены для апертуры передающей АФАР.

При проектировании использовались следующие значения межэлементных расстояний:

- на прием -  $d_{nm} \approx 7,5$  см;
- на передачу -  $d_{nd} \approx 6,8$  см.

Для выбранного количества излучателей в составе проектируемых решеток, их геометрические размеры составляют:

- на прием 300 x 300 мм;
- на передачу 272 x 272 мм.

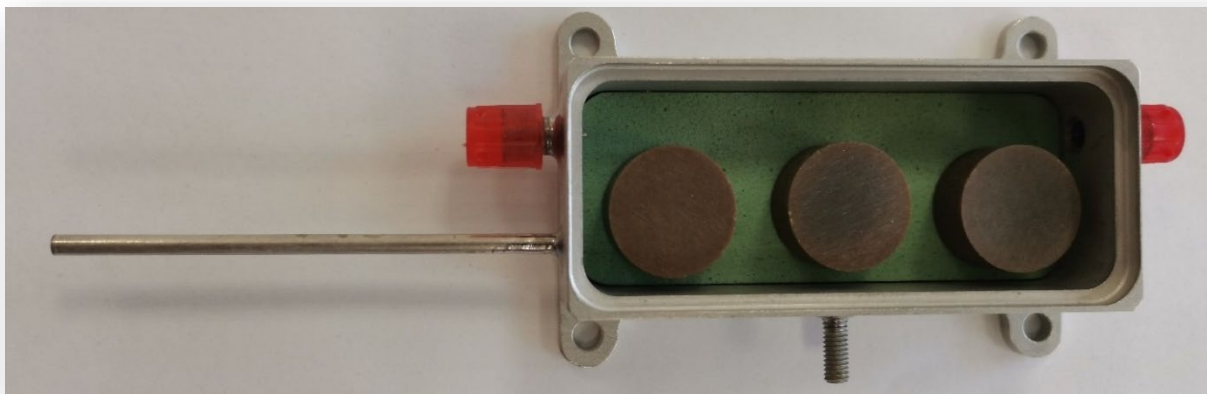
Пространственное разнесение приемной и передающей решетки обеспечивает развязку 45 дБ, введение дополнительного экрана позволяет увеличить развязку между ними до 53 дБ [4]. Для обеспечения устойчивой работы связной системы требуется дополнительная частотная развязка, которая достигается использованием полосно-пропускающих фильтров (ППФ) на входе приемных каналов и на выходе передающих каналов. ППФ на входе приемного канала обеспечивает требуемое подавление сигнала на частоте передачи, а ППФ на выходе передающего канала обеспечивает подавление шумового сигнала на частоте приема.

В Табл.1 приведены характеристики полосно-пропускающих фильтров, которые проектировались и изготавливались на предприятии ООО «Ижевский радиозавод».

Таблица 1. Характеристики полосно-пропускающих фильтров

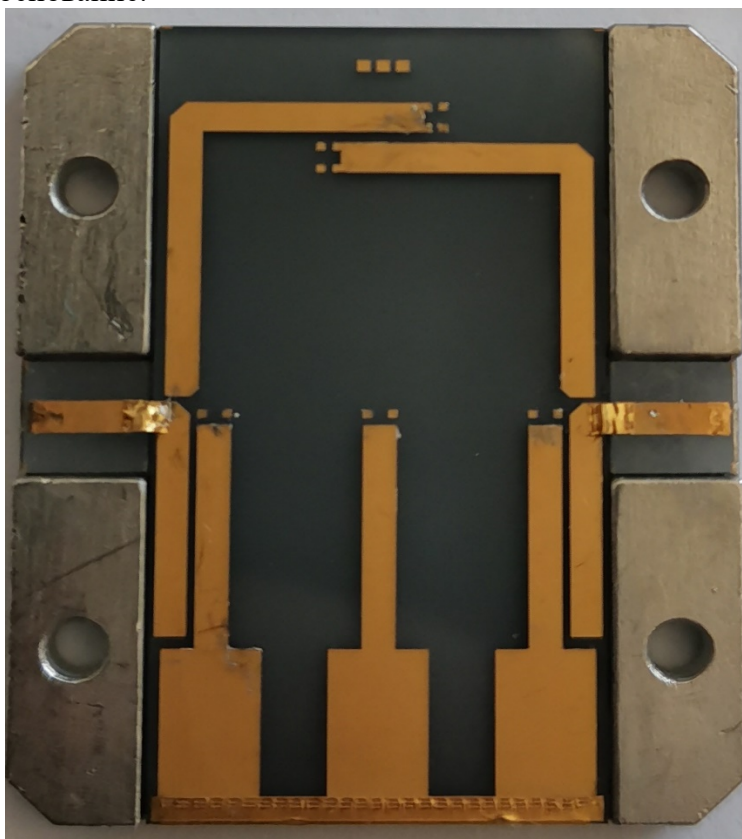
Тип фильтра	Число резонаторов	Полоса, МГц	Прямые потери, дБ	Запирание, дБ	Применение
ППФ на ДР	3	25	0,8	Более 45	Приемный тракт
Микрополосковый ППФ	3	150	1,0	22...25	Передающий тракт

Внешний вид фильтра на диэлектрических резонаторах представлен на рисунке 3. Для получения требуемых характеристик резонаторы должны быть расположены в отдельном отсеке, в данном случае был выбран вариант отдельного корпуса с герметичными разъемами. Фильтр соединяется с входом четырехканального приемного модуля коаксиальным кабелем, что обеспечивает гибкость конструкции [5].



**Рисунок 3.** Полосно-пропускающий фильтр на диэлектрических резонаторах

Внешний вид микрополоскового фильтра представлен на рисунке 4. Для удобства механического монтажа в передающий модуль поликоровая плата установлена на металлическое основание.



**Рисунок 4.** Микрополосковый фильтр

### 3. Заключение

Рассмотрен вариант построения приемной и передающей апертур многолучевой АФАР для низкоорбитальной системы связи. Представлены характеристики АФАР на основе турникетного излучателя при сканировании в широком секторе углов. Обосновано использование полосно-пропускающих фильтров для обеспечения электромагнитной совместимости связных систем. Приведены экспериментальные результаты измерения полосно-пропускающих фильтров двух типов.

#### Список литературы

1. Анпилогов В.Р. Эффективность низкоорбитальных систем спутниковой связи на основе малых космических аппаратов // Технологии и средства связи. 2015, № 4, с. 62 – 67.
2. Анпилогов В.Р., Шишлов А.В., Эйбус А.Г. Анализ систем LEO-HTS и реализуемости фазированных антенных решеток для абонентских терминалов // Спутниковая связь и вещание. 2015, № 6-2, с. 14 – 26.
3. Анпилогов В., Денисенко В., Зимин И., Кривошеев Ю., Чекушкин Ю., Шишлов А. Проблемы создания антенн с электрическим сканированием луча для абонентских терминалов спутниковых систем связи в Ku- и Ka-диапазонах // Первая миля. 2019, №3, с.16 - 27. DOI: 10.22184/2070-8963.2019.80.3.16.27
4. Ефимов А.Г., Корнеев С.А., Матвеев В.С., Чистюхин В.В. Проектирование многолучевой приемо-передающей апертуры низкоорбитальной космической системы связи // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 1. С. 64–73. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-1-64-73
5. V. Timoshenkov, A. Efimov, V. Losev Multi-Channel Receiving Module of Multi Beam C-Band Active Phased Array Antenna // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 EIConRus) p.4 – 7.