

# Проектирование АФАР для системы спутниковой связи

М.Д. Парнес, П.Э. Осипов, Д.В. Логинов

ООО «Резонанс»

**Аннотация:** в данной работе подтверждены расчетные характеристики путем измерения диаграмм направленности приемо-передающей линейки двухдиапазонных излучателей с круговой поляризацией сигнала при электронном отклонении луча. Приведены методы построения АФАР и её базового излучателя. Изготовленный макет является экспериментальным обоснованием для реализации абонентского терминала спутниковой системы связи в Ku-диапазоне частот на основе плоской многослойной АФАР с электронным сканированием.

**Ключевые слова:** АФАР, FPA, Ku-диапазон, двухдиапазонный излучатель, круговая поляризация, абонентский терминал, спутниковая связь.

## 1. Введение

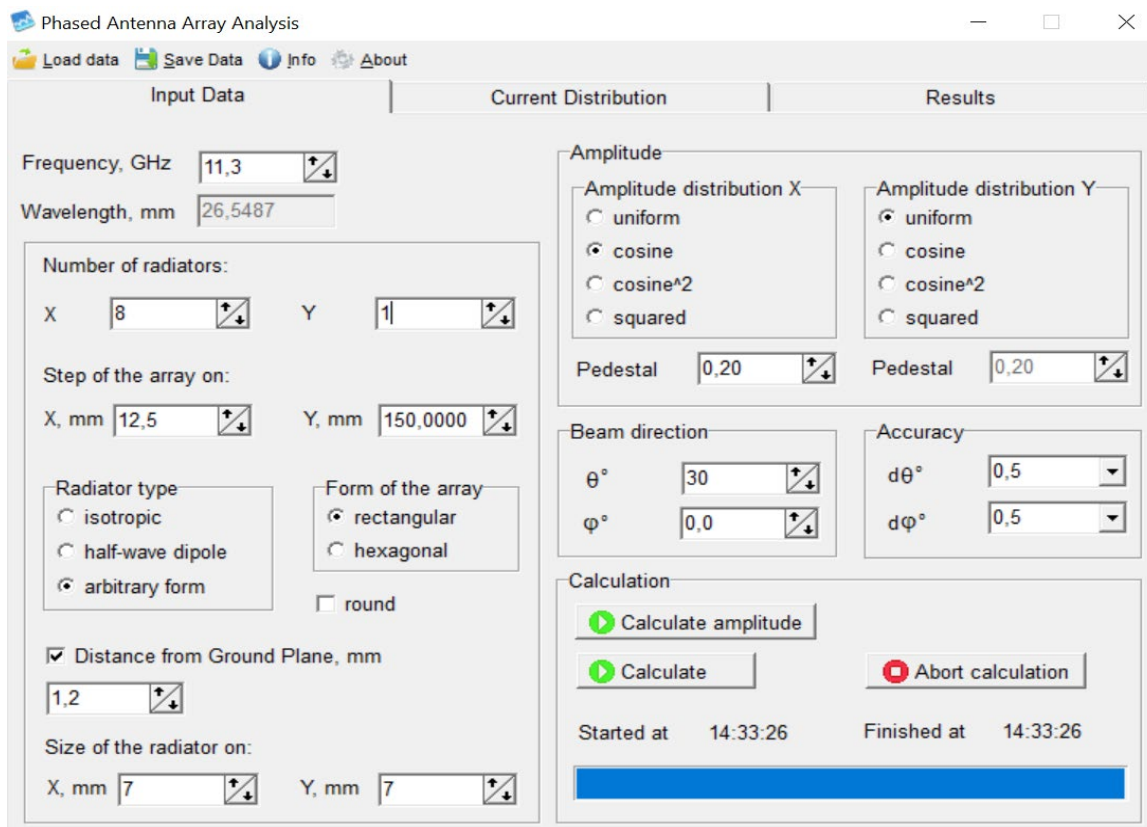
В последнее десятилетие во многих странах мира активно проводятся исследования, целью которых является поиск технических решений для создания недорогих плоских сканирующих антенн (Flat-panel antennas, FPA). Различные реализации FPA известны достаточно давно, однако до сих пор они относились к классу оборудования, не предназначенного для массового применения. Отсутствие на рынке недорогих пользовательских\_абонентских терминалов с плоской сканирующей антенной часто обозначается как проблема, ограничивающая коммерциализацию новых низкоорбитальных систем спутникового широкополосного доступа, поэтому работой в этом направлении занимаются большое количество инженерных коллективов во всем мире.

В работе приведено возможное решение задачи на основе плоской многослойной АФАР с электронным движением луча на примере макета из восьми излучателей, представляющих часть будущей антенной решетки. Проведена оценка корректности методов построения АФАР и моделирования двухдиапазонного излучателя.

## 2. Проектирование эквивалентного макета АФАР и базового излучателя.

Для проверки возможности реализации АФАР спроектирован восьмиканальный приемо-передающий макет на микросхемах Renesas F6121 для приемного канала в диапазоне частот 10.9-11.7 ГГц и Renesas F6521 для передающего канала на 13.7-14.5 ГГц. Согласно источнику [1] для заданного направления решетка излучателей эквивалента линейке, излучатели которой расположены на линии вдоль этого направления и являются проекциями всех излучателей решетки на это направление. Расположив 8 излучателей в линию, появляется возможность формирования луча управлением им вдоль направления линейки путем регулирования фазовых сдвигов сигнала каждого отдельного излучателя.

Программа FAZAR позволяет рассчитывать параметры антенных решеток, такие как диаграмма направленности, ширина луча, коэффициент усиления. Также имеется возможность рассчитывать ДН с отклонением, задавать различное амплитудное и фазовое распределение. По результатам расчетов определено оптимальное расстояние между излучателями по 12.5 мм, при котором максимальный угол электрического сканирования при заданном уровне боковых лепестков достигает 30°, ширина ДН 18° и 15°, а Ku 14 dB и 15 dB для приемного и передающего диапазонов частот.



**Рисунок 1.** Интерфейс программы FAZAR с исходными данными для расчета макета АФАР.

Разработан излучатель, состоящий из двух патч-антенн, рассчитанных на разные диапазоны частот. Основой выбрана многослойная печатная плата на материале Rogers 4003 толщиной 0,5 мм. Патчи расположены друг над другом, один из слоев используется для разводки сигнала. Подключение излучателя реализовано на микрополосковых Т-делителях с разницей набега фазы в плечах 90 градусов для создания сигнала с круговой поляризацией, подключенных ортогонально к соответствующим частям патчей.

Похожий опыт приведен в статье [2] со схожим соотношением между диапазонами рабочих частот. Особенностью конструкции, описанной в статье, является металлический контакт через центры патчей, заземляющий их на экран. При этом металлических элементов цилиндрической формы два, и они имеют разные диаметры. В статье дается комментарий, что заземление введено для молниезащиты. В нашей конструкции заземляющие элементы так же используются для увеличения развязки между антеннами и реализованы в виде металлизированных отверстий. Одно по центру для обеих частей патча, и массив вокруг центра патча для нижней части. Размер массива влияет на характеристики патча и рассчитан для оптимальной работы устройства с учетом технических особенностей производства.

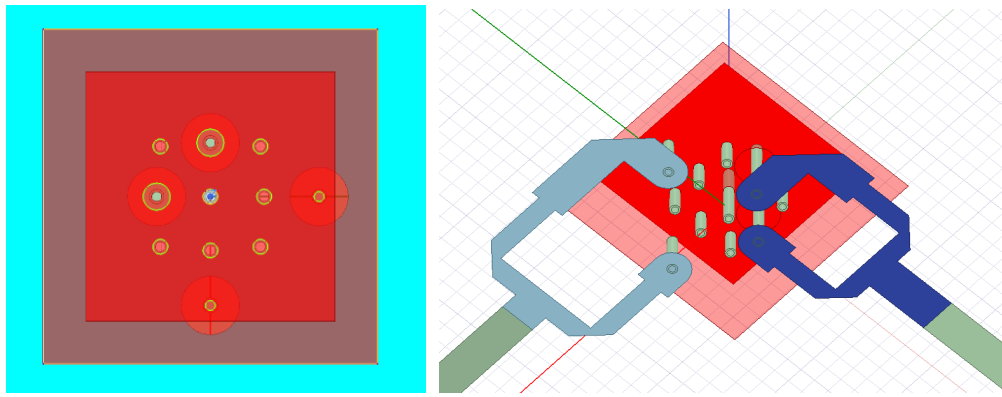


Рисунок 2. Изображения модели двухдиапазонного излучателя с разных ракурсов.

Расположив патчи в линейку из 8 элементов с шагом 12,5мм, был получен макет АФАР, результаты моделирования которого дают следующие диаграммы направленности (характеристики приведены в Таблице 1):

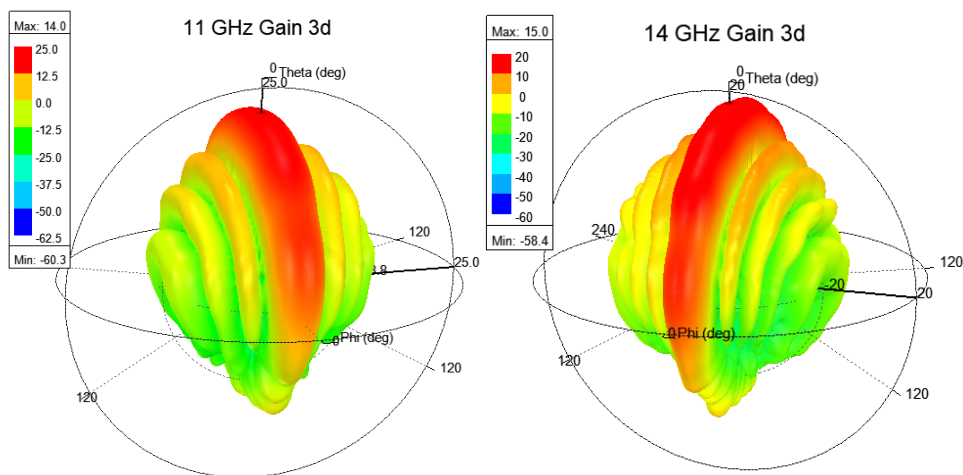


Рисунок 3. Изображения диаграмм направленности линейки излучателей в трехмерных полярных координатах.

### 3. Результаты измерения макета

Перед установкой на измерительный стенд, на изготовленную плату с излучателями были замонтированы разъемы и, используя векторный анализатор, проверена корректность изготовления платы излучателей путем измерения КСВ и переходного ослабления каналов с излучателями.

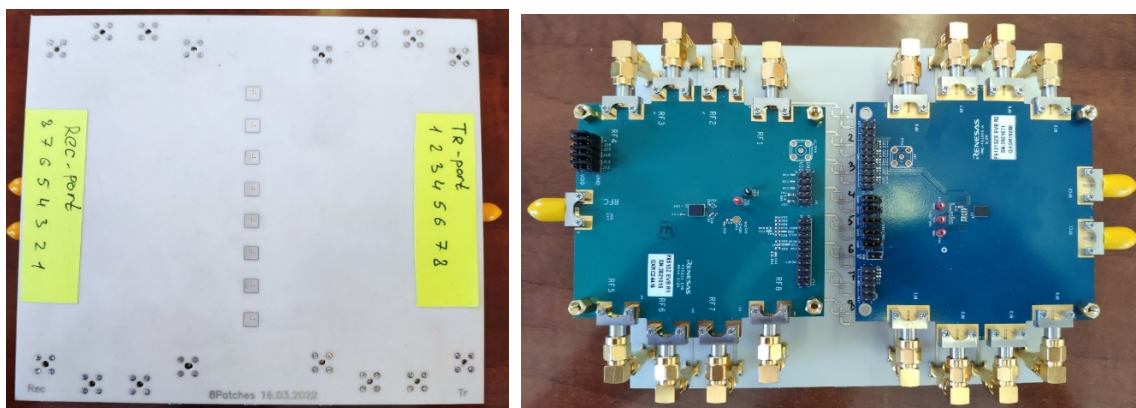
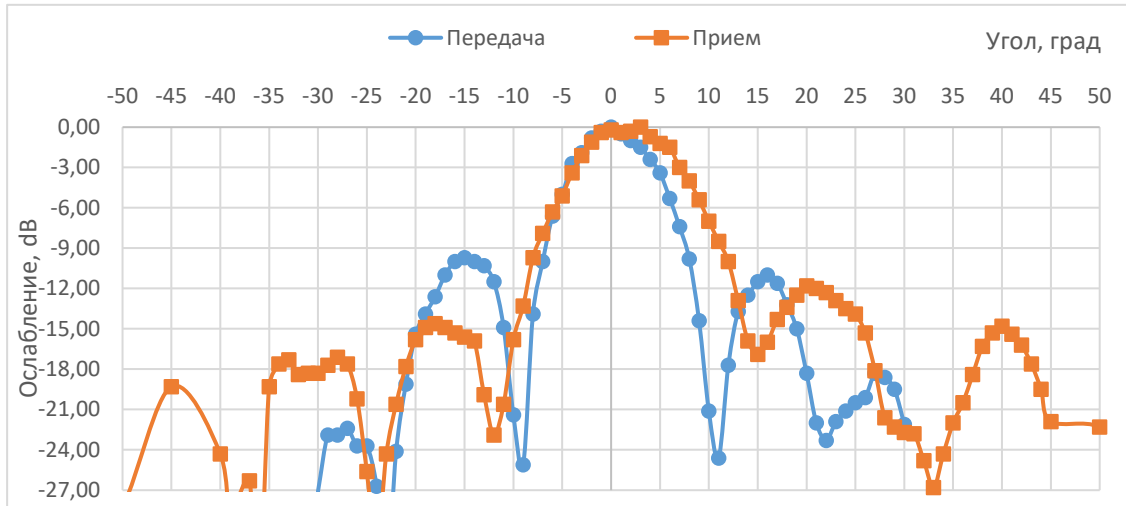
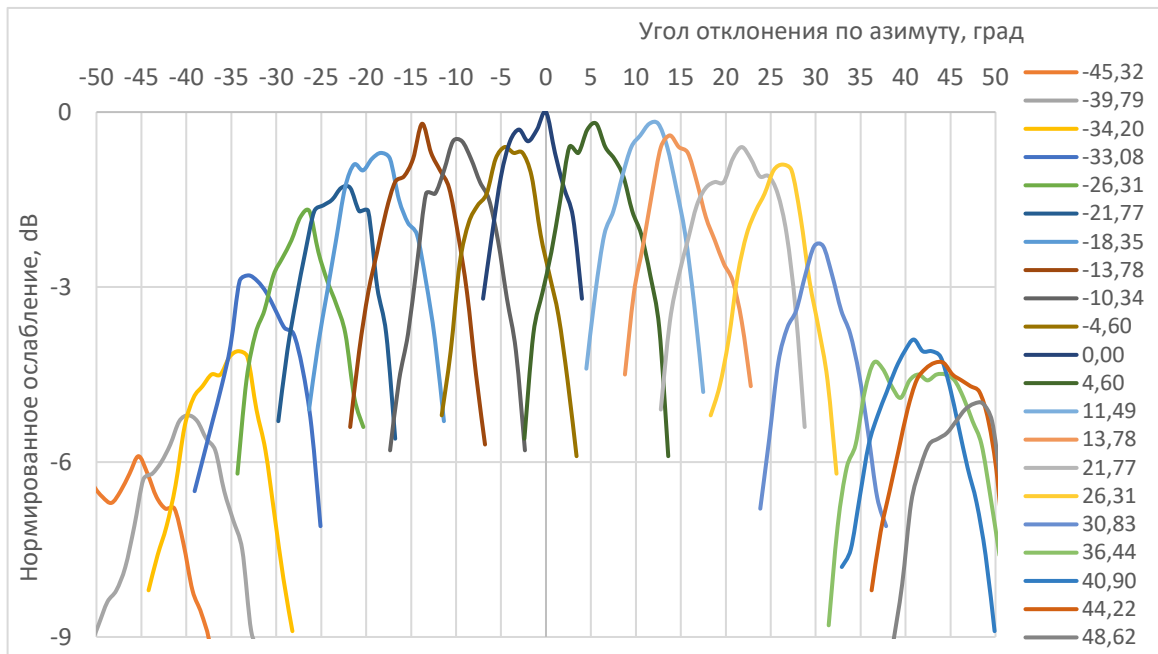


Рисунок 4. Фото изготовленного макета

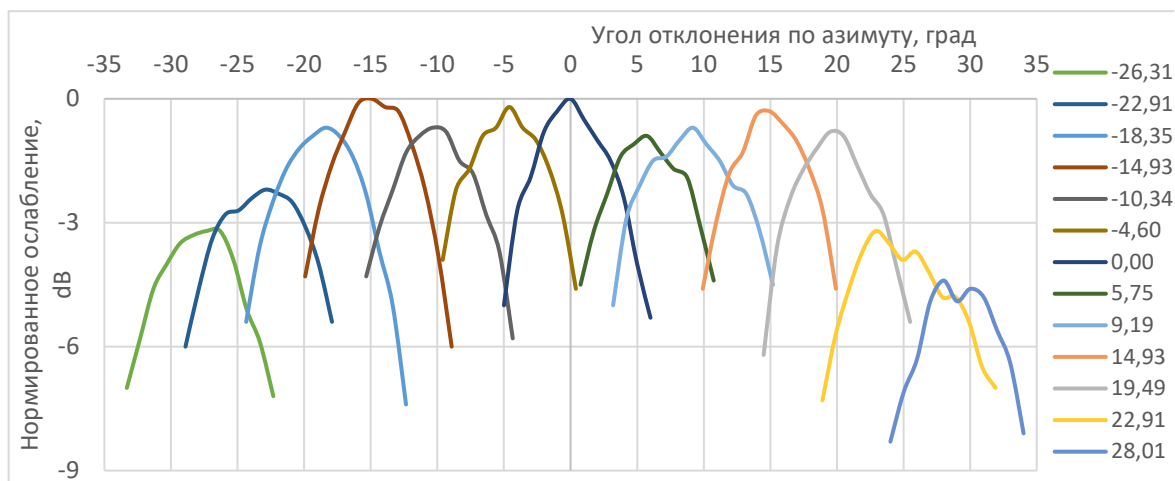
Измерения проводились на стенде с векторным анализатором, трехосным поворотным столом, рупорной антенной с линейной поляризацией, лазерными уровнем и дальномером для калибровки положения элементов тракта. С помощью ПО сопровождающего тестовые платы чипов Renesas, произведено фазовое сведение луча. Далее сняты ДН для не отклонённого и электрически отклоненного луча исследуемого макета.



**Рисунок 5.** Графики измеренных и нормированных азимутальных диаграмм направленности приемной и передающей частей антенны.



**Рисунок 6.** График диаграмм направленностей основного лепестка приёмной антенны при электронном отклонении луча в азимутальном направлении.



**Рисунок 7.** График диаграмм направленностей основного лепестка передающей антенны при электронном отклонении луча в азимутальном направлении.

#### 4. Заключение

По результатам измерений линейки излучателей, эквивалентной части АФАР при сканировании в одной плоскости получены следующие результаты:

**Таблица 1.** Сравнительная таблица характеристик макета АФАР

	Характеристика	Экспериментальная	Смоделированная
<b>Прием</b>	Ширина ДН по уровню -3dB, °	12°	13°
	Уровень первого бокового лепестка, dB	-14.9 dB/-11.8 dB	-13 dB
	Угол электрического сканирования, °	30°	°
	Ку антенны, dB	12.2 dB (грубая оценка)	14 dB
<b>Передача</b>	Ширина ДН по уровню -3dB, °	9°	10°
	Уровень первого бокового лепестка, dB	-9,7 dB / -11 dB	-13 dB
	Угол электрического сканирования, °	20°	30°
	Ку антенны, dB	11.8dB (грубая оценка)	15 dB

На отклонение уровня первого бокового лепестка передающей антенны от ожидаемых -13 dB на 3.3 dB могло повлиять большое количество факторов, как ошибка фазового сведения луча, линейная поляризация принимающего сигнал рупора, ошибка в амплитудном распределении мощности по излучателям т.д. Данный параметр проще достижим на антеннах с большим количеством элементов в линию (более 100). При малоразмерных ФАР зачастую это число ниже 10-11 dB. Так же на этот параметр влияет введение амплитудного распределения, которое не используется в проводимом эксперименте.

Полученные экспериментальные результаты в большей части совпадают с расчетными, что говорит о правильности выполняемого моделирования и проведенной конструкторской работы, и подтверждает достижимость требуемых характеристик АФАР.

Исследование выполнено по заказу и за счет финансирования ЛОНИИР (г. Санкт-Петербург).

#### Список литературы

1. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием //М.: Сайнс-пресс. – 2002. – Т. 16.
2. Yao Y. et al. A New Patch Antenna Designed for CubeSat: Dual feed, LVS dual-band stacked, and circularly polarized //IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2016. – Т. 58. – №. 3. – С. 16-21.