

# Проектирование цифровой антенной решетки для радиолокатора с синтезированной апертурой космического базирования на базе разрабатываемой активной фазированной антенной решетки

С.В. Павлов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО «НПП «Пульсар»

<sup>2</sup>Московский авиационный институт

**Аннотация:** в данной работе приводятся планы на разработку цифровой активной фазированной антенной. Проведено математическое моделирование антенны – прототипа. Выявлено соответствие моделей теории антенн. Предлагается проведение математического моделирования характеристик цифровых активных фазированных антенных решеток, построенных на базе разрабатываемой активной фазированной антенной решетки. Количество цифровых каналов увеличивается в соответствии с иерархией антенны – прототипа.

**Ключевые слова:** цифровая антенная решетка, активная фазированная антенная решетка, цифровая обработка сигнала, цифровой канал, математическое моделирование, дистанционное зондирование Земли, радиолокатор с синтезированной апертурой, антенны космических аппаратов.

## 1. Введение

За весь период развития радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования было создано и успешно эксплуатируется множество различных систем: от экспериментальных аппаратов серии Seasat и Алмаз до современных коммерческих и государственных спутников наблюдения, таких как TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, Sentinel-1 и Capella [1-2]. Развиваются системы РСА с возможностью бистатической съемки [3]. Каждая из этих систем внесла вклад в методологию дистанционного зондирования Земли, однако жесткие требования к разрешению, ширине полосы обзора и энергетическому потенциалу продолжают стимулировать поиск новых архитектурных решений.

В последнее десятилетие приоритет в разработке космических РСА все чаще отдается системам с цифровыми активными фазированными антенными решетками (ЦАФАР). Переход от аналоговых и гибридных АФАР к полностью цифровым архитектурам стал ключевым трендом, поскольку позволяет преодолеть ограничения, присущие традиционным системам, но имеют собственные технические и системные трудности [4].

Среди основных преимуществ РСА с ЦАФАР можно выделить [5]:

Цифровое формирование луча (Digital Beamforming – DBF). Возможность одновременного формирования нескольких независимых парциальных лучей и адаптивного управления диаграммой направленности в реальном времени без потерь на переключение.

Повышение отношения сигнал/шум (SNR). Цифровая обработка сигналов с каждого элемента решетки позволяет оптимально суммировать каналы, компенсируя потери в аналоговой части.

Реализация новых режимов. Становится возможным одновременное получение сверхвысокого разрешения и широкой полосы захвата (HRWS — High Resolution Wide Swath), что невозможно для классических РСА из-за фундаментального противоречия

между полосой обзора и импульсной мощностью.

Компенсация помех. Цифровое управление позволяет реализовывать адаптивное подавление активных шумовых помех и режекцию узкополосных помех на уровне антенной решетки.

Среди минусов ЦАФАР отмечают:

- Энергопотребление и тепловыделение. Рост числа цифровых приемопередающих модулей приводит к критическому увеличению потребляемой мощности и сложности отвода тепла на борту космического аппарата.
- Объемы цифровых данных. Необходимость оцифровки сигнала по каждому каналу с высокой частотой дискретизации порождает потоки данных на уровне десятков-сотен Гбит/с, что требует мощных бортовых вычислителей и широкополосных каналов связи.
- Калибровка. Обеспечение идентичности фазовых и амплитудных характеристик тысяч цифровых каналов в условиях деградации элементной базы и температурных градиентов представляет собой сложнейшую научно-техническую задачу.
- Стоимость и сложность проектирования. Разработка ЦАФАР требует создания специализированных больших интегральных схем (ASIC, FPGA) и высокоточных систем синхронизации [6].

## **2. Антенна – прототип**

В работе [7] рассматриваются перспективы создания активных фазированных антенных решеток космического базирования для обзора земной поверхности. Данная антенна показывает высокий уровень устойчивости функционирования при катастрофических воздействиях фрагментов космического мусора. Так, например, при выходе из строя 15 модулей антенных из 40 (37,5% площади АФАР) сохраняется устойчивость основного луча диаграммы направленности антенны.



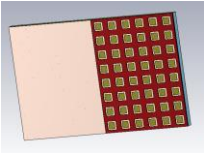
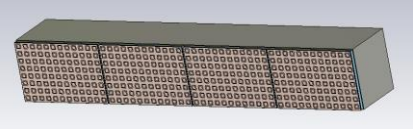
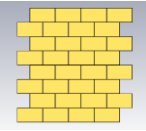
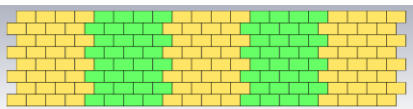
В качестве антенны – прототипа выбрана полноразмерная АФАР типа «Аракс-Р» с эффективной площадью антенны ~9,7м<sup>2</sup> разработки АО «НПП «Пульсар». Антенна состоит из 40 модулей антенных и содержит 1280 приемно-передающих модулей.

## **3. Задача моделирования**

В качестве прототипа выступает разрабатываемая АФАР, в которой на выходе установлен единственный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Такая архитектура не позволяет в полной мере реализовать преимущества цифрового формирования лучей, поскольку обработка сигналов возможна только после объединения аналоговых каналов. В настоящей работе предлагается исследовать эффект от перехода к ЦАФАР путем иерархического увеличения количества цифровых каналов. Уровень иерархии определяет, на сколько независимых подрешеток разбивается раскрыв антенны-прототипа, причем в каждой подрешетке предусматривается собственный АЦП. Это позволяет поэтапно наращивать степень цифровизации: от аналоговой схемы до многоканальной цифровой антенной решетки. Для каждого уровня иерархии с помощью математического моделирования планируется оцениваются ключевые характеристики – диаграмма направленности, энергетический потенциал, гибкость формирования лучей и чувствительность к ошибкам калибровки. Уровни иерархии антенны-прототипа приведены в таблице 1.

В рамках моделирования необходимо определить уровень, на котором переход к следующему уровню иерархии не принесет существенного изменения характеристик по отношению к приложенным техническим и финансовым усилиям.

Таблица 1. Иерархия АФАР

Название	Изображение	Уро- вень	Кол-во изл-ей	Кол-во ППМ	Цифр. каналы
Печатный излучатель		5	1	-	15360
Подрешётка 4 уровня (Линейка)		4	12	1	1280
Подрешётка 3 уровня (МАР)		3	96	8	160
Подрешётка 2 уровня (МА)		2	384	32	40
Подрешётка 1 уровня (Секция)		1	3072	256	5
АФАР (Целиком)		0	15360	1280	1

На первом этапе работы необходимо исследовать характеристики антенны – прототипа. Сечения диаграммы направленности антенны приведены на рисунках 1 и 2. Характеристики антенны – прототипа приведены в таблице 2.

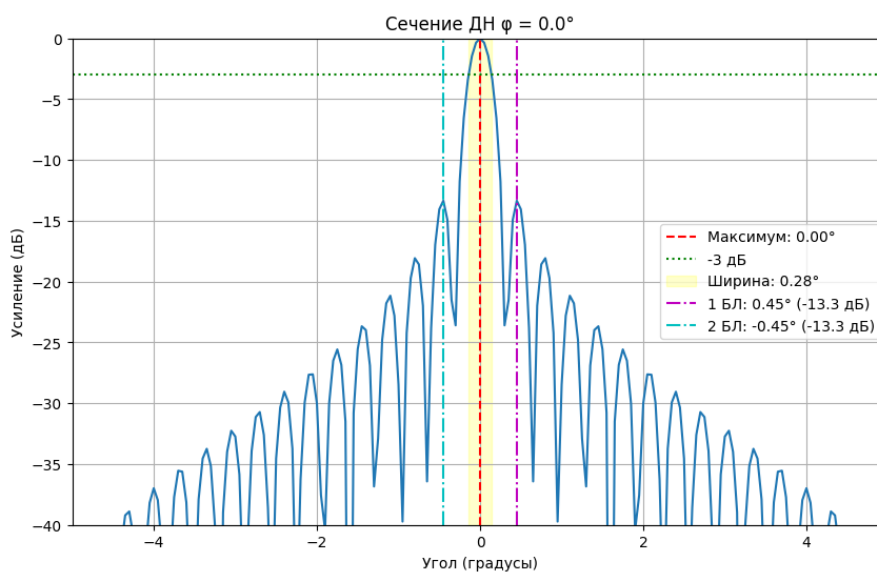
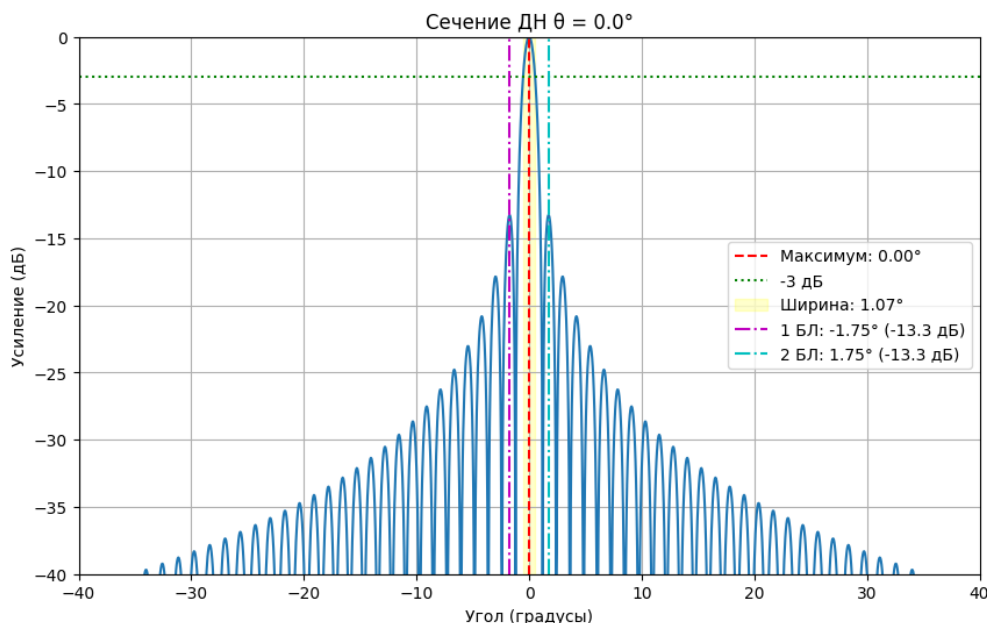


Рисунок 1. Диаграмма направленности антенны – прототипа в сечении  $\varphi=0^\circ$



**Рисунок 2.** Диаграмма направленности антенны – прототипа в сечении  $\theta=0^\circ$

**Таблица 2.** Характеристики диаграммы направленности антенны - прототипа

Название параметра	Сечение $\varphi=0^\circ$	Сечение $\theta=0^\circ$
Ширина диаграммы направленности по уровню минус 3 дБ, град.	0,28	1,07
Уровень боковых лепестков, дБ	-13,34	-13,28
Положение первого бокового лепестка, град.	0,45	-1,75
Положение второго бокового лепестка, град.	-0,45	1,75
КНД по сечению, дБ	30,57	38,63

Результаты моделирования, представленные на рисунках 1 и 2 и в таблице 3 совпадают с теорией антенн. Поэтому можно сделать вывод о работоспособности модели.

#### 4. Заключение

Проведено моделирование антенны – прототипа. Результаты моделирования соответствуют теории антенн и свидетельствуют о работоспособности модели.

Планируется моделирование характеристик набора цифровых активных фазированных антенных решеток, где цифровыми каналами будут выходы подрешеток соответствующего уровня иерархии антенны – прототипа. Моделирование будет производиться по методам, описанным в [8].

Так же планируется создание стенда для моделирования возможностей PCA, построенный на основе модулей программно-определяемого радио HackRF и URSP B210.

#### Список литературы

1. Павлов, С. В. Построение радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны для систем дистанционного зондирования Земли космического базирования: зарубежный опыт / С. В. Павлов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2025. – Т. 208, № 5. – С. 21-35. – EDN CNYTVP.
2. Павлов, С. В. Построение радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны для систем дистанционного зондирования Земли космического базирования: отечественный опыт / С.В. Павлов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2026. – Т. 210, № 1. – С. 21-28. – EDN MIJSTA.

3. Антенна передачи синхросигнала для реализации бистатистического режима съёмки радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования / П.А. Шмачилин, А.А. Василевский, С.В. Павлов, К.К. Башмаков // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. – 2025. – № 3(278). – С. 31-41. – DOI 10.36845/2073-8250-2025-278-3-31-41. – EDN XNCDXD.
4. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, А.В. Криштопов, А.И. Кудря. – Москва: Рекламно-издательский центр "Техносфера", 2019. – 482 с. – ISBN 978-5-94836-502-2. – EDN OPPIWE.
5. Павлов, С. В. Перспективы развития антенн РСА / С.В. Павлов // Гагаринские чтения - 2025: Сборник тезисов докладов международной молодёжной научной конференции, Москва, 15–18 апреля 2025 года. – Москва: ООО "Издательство "Перо", 2025. – С. 348-350. – EDN H1TCZC.
6. Павлов, С. В. Обзор программируемых логических интегральных схем / С.В. Павлов, М.А. Перминов // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. – 2025. – № 4(279). – С. 45-53. – DOI 10.36845/2073-8250-2025-279-4-43-53. – EDN NYE1UV.
7. Бурцев, Ю. В. Перспективы создания активных фазированных антенных решеток космического базирования для обзора земной поверхности / Ю.В. Бурцев, Ю.В. Колковский // Радиолокационное исследование природных сред: Материалы XXXIII Всероссийского симпозиума, посвященного 100-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора Клюева Николая Фомича, Санкт-Петербург, 19–20 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2024. – С. 31-42. – EDN OUMMUM
8. Шмачилин, П.А. Матричная диаграммообразующая схема цифровой антенной решётки / П.А. Шмачилин, Т.Ю. Шумилов // Труды МАИ. – 2019. – № 109. – С. 12. – DOI 10.34759/trd-2019-109-12. – EDN OSNWGN.