

УДК 621.396.674

doi: 10.53816/20753608\_2025\_4\_22

**РАСПРЕДЕЛЕННАЯ АКТИВНАЯ ФАЗИРОВАННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА  
С СИНТЕЗИРОВАННОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ АПЕРТУРОЙ  
НА БАЗЕ РОЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

**DISTRIBUTED ACTIVE PHASED ARRAY ANTENNA  
WITH SYNTHESIZED STOCHASTIC APERTURE BASED  
ON A SWARM OF SMALL SPACECRAFT**

*Академик РАРАН А.А. Рахманов<sup>1</sup>, М.Д. Бавижев<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>РАРАН, <sup>2</sup>НПП «РАДИЙ»*

*A.A. Rahmanov, M.D. Bavizhev*

В статье представлена концепция распределенной космической активной фазированной антенной решетки (АФАР) на базе роя малых космических аппаратов (МКА). Ключевое отличие — принцип стохастической синтезированной апертуры: каждый МКА оцифровывает  $I/Q$ -сигналы с привязкой времени и координат. Центральный кластер выполняет синхронизацию, калибровку, компенсацию фаз и формирование луча. Это открывает путь к глобальным, реконфигурируемым системам нового поколения, более гибким и отказоустойчивым, чем монолитные космические аппараты.

**Ключевые слова:** роевая система, малые спутники, когерентная система, синтез апертуры, радиоэлектронная борьба (РЭБ), оптическая связь, космическая группировка, фазированная антенная решетка (ФАР), CubeSat.

The article presents a distributed spaceborne AESA concept based on a swarm of small satellites. The key distinction is a stochastic synthetic aperture: each satellite digitizes I/Q signals with precise time and coordinate tagging. A central cluster performs synchronization, calibration, phase compensation and digital beamforming. This enables global, high-resilience, reconfigurable next-generation systems — far more flexible and fault-tolerant than monolithic spacecraft.

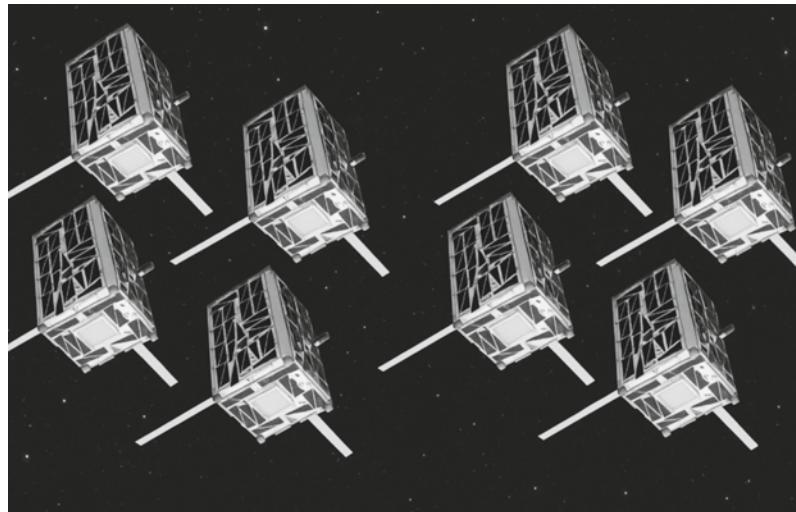
**Keywords:** swarm system, small satellites, coherent system, aperture synthesis, electronic warfare (EW), optical communication, satellite constellation, phased array antenna (PAA), CubeSat.

### **Введение**

Современные вызовы в области безопасности и мониторинга Земли требуют создания глобальных, высокоточных и оперативных систем наблюдения, связи и противодействия. Традиционные монолитные космические аппараты (КА), несмотря на свою мощь, обладают рядом системных недостатков: они обладают низкой от-

казоустойчивостью, имеют высокую стоимость разработки, запуска и эксплуатации, а их функциональность жестко заложена на этапе проектирования и не может быть кардинально изменена в процессе работы [1].

Параллельно с этим, бурное развитие технологий МКА, в частности платформ стандарта CubeSat, и миниатюризации компонентов открыло новые возможности для создания



*Рис. 1. Массив спутников стандарта CubeSat*

распределенных космических систем [2] (рис. 1). Концепция роя космических аппаратов, где множество относительно простых и недорогих спутников функционируют как единая система, позволяет преодолеть ограничения традиционных КА.

### **Критический анализ существующих решений**

Существующие системы космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (PCA) обладают фундаментальными ограничениями: жесткая конструкция ограничивает размер апертуры, сложные процедуры измерений диаграммы направленности в ближней зоне, ограниченное время непрерывной работы, высокая стоимость создания и низкая живучесть при выходе из строя отдельных подрешеток.

Проецирование в космос концепции воздушной активной фазированной антенной решетки (АФАР) на базе роя БПЛА [3, 4] позволяет раскрыть принципиально новые преимущества.

В отличие от традиционных PCA, предлагаемая архитектура стохастической синтезированной апертуры (CCA) на базе роя МКА обеспечивает принципиально новый уровень гибкости и живучести. Каждый массив спутников (МС) выполняет функции «летающего аналого-цифрового преобразователя (АЦП)/цифро-аналогового преобразователя (ЦАП)» с привязкой к времени и координатам, а формирование и управление

диаграммой направленности становится задачей наземного или космического центра управления.

Это позволяет значительно снизить требования к бортовому оборудованию, кардинально упростить проблему обеспечения когерентности системы и открывает путь к не имеющей аналогов гибкости реконфигурации решетки АФАР «на лету». Данный подход обеспечивает высокую отказоустойчивость (деградация характеристик при потере части элементов), масштабируемость (легкое наращивание количества элементов или создание разреженных антенных систем) и оперативную гибкость конфигурации решетки в реальном времени. Очевидно, что системы на базе роя малых спутников, развернутых в космическом пространстве, будут эффективны для решения задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), локации, целеуказания и радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

Цель данной работы — разработка концепции и комплексный анализ характеристик децентрализованной когерентной системы, построенной по принципу стохастической синтезированной апертуры на базе роя МКА для решения многоспектральных задач, исходя из ключевых преимуществ космического базирования.

### **Ключевые преимущества космического базирования**

Космическое пространство, в отличие от атмосферы, предоставляет уникальные условия: высокая стабильность условий распространения

электромагнитных волн, предсказуемость характеристик каналов связи и точность радиолокационных измерений, недостижимые в условиях земной атмосферы с ее турбулентностью и поглощением. Неограниченная энергетика и высокая прозрачность для оптических систем в космосе, создают уникальные условия для формирования стабильных группировок на базе МКА с сверхбольшими апертурами, в том числе из разнесенных на сотни километров ССА, объединенных в единую систему.

### Энергетика

Энергобаланс для перспективного МКА стандарта 12U CubeSat в расширенной конфигурации с эффективной площадью панелей примерно  $0,5 \text{ м}^2$ :

$$P_{\text{gen}} \approx 1400 \cdot 0,5 \cdot 0,3 \cdot 0,7 \approx 150 \text{ Вт},$$

где  $1400 \text{ Вт/м}^2$  — солнечная постоянная;  $0,3$  — КПД современных многопереходных солнечных элементов;  $0,7$  — коэффициент, учитывающий нахождение в тени.

Учитывая наличие бортовых аккумуляторных батарей и квазипериодический режим работы АФАР (кратковременные сеансы активной работы, чередующиеся с длительными периодами накопления энергии), средняя потребляемая мощность может быть снижена до технологически достижимых сегодня  $50\text{--}60$  Вт, при этом сохраняя возможность работы мощных приемо-передающей модулей (ППМ) в пиковые моменты.

### Связь

Для обеспечения когерентной работы роя необходима высокоскоростная связь между спутниками. Отсутствие атмосферных помех позволяет достигать дифракционно-ограниченного разрешения оптических систем [5] и исключает затухание радиосигналов, характерное для наземных и атмосферных линий связи (табл. 1).

Параметры оптической связи соответствуют перспективным разработкам, а не серийным образцам. Однако, для предлагаемой системы достаточно скорости серийных образцов  $2\text{--}2,5$  Гбит/с.

### Возможность сборки сверхбольших апертур

Разрешающую способность системы можно оценить как:

$$\theta \approx 1,22 \lambda/D.$$

Угловое разрешение тем выше, чем больше апертура, которая в космосе может достигать сотен километров. Для разреженной космической АФАР с апертурой 10 км угловое разрешение системы составит несколько мкрад.

Космическое базирование предоставляет широкий спектр ключевых преимуществ, включая неограниченный энергопотенциал от солнечных батарей, возможность использования оптических систем наблюдения высокого разрешения и высокоскоростных оптических каналов связи между аппаратами, а также высокую стабильность орбитальной группировки («космический штиль»), позволяющую формировать сверхбольшие когерентные апертуры.

### Обзор современных систем

Современный парк космических аппаратов для ДЗЗ, связи и РЭБ в основном представлен крупными дорогостоящими спутниками. Например, спутники серии WorldView компании Maxar обеспечивают разрешение до 0,3 м в панхроматическом режиме, но стоимость одного аппарата исчисляется сотнями миллионов долларов [6].

### Проекты распределенных космических систем

В последние годы набирают обороты проекты, исследующие возможности распределен-

Таблица 1

Параметры оптической связи между МКА (лабораторные испытания перспективных образцов)

Параметр	Значение
Длина волны	1550 нм
Мощность передатчика	1 Вт
Диаметр приемопередающей антенны	5 см
Дальность связи между МКА	10 км
Скорость передачи	>10 Гбит/с
Энергия на бит (рекорд)	100 пДж/бит

ных систем. Среди них можно выделить как научно-исследовательские, так и коммерческие проекты, демонстрирующие различные аспекты технологии распределенных систем.

Project SPACE HAUC (NASA): направлен на демонстрацию технологии формирования антенной решетки с синтезированной апертурой на группировке из 3–5 спутников CubeSat для связи в X-диапазоне [7].

OLFAR (Orbital Low Frequency Array): концепция размещения на лунной орбите роя из десятков малых спутников, несущих антенны для приема сверхдлинных радиоволн (0,1–30 МГц), что невозможно с поверхности Земли [8].

DARPA Blackjack: программа по созданию глобальной низкоорбитальной группировки из множества небольших КА с целью демонстрации превосходства такой архитектуры над традиционными дорогими КА в ряде военных приложений [9].

Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС): российская спутниковая система навигации, состоящая из 24 спутников на средней околоземной орбите (19100 км). Система демонстрирует принципы распределенного позиционирования и синхронизации, где точное определение координат достигается за счет совместной обработки сигналов от множества спутников [10]. ГЛОНАСС демонстрирует высочайшую точность синхронизации и позиционирования, необходимую для когерентной работы распределенных систем.

Starlink (SpaceX): крупнейшая коммерческая низкоорбитальная спутниковая группировка, насчитывающая несколько тысяч аппаратов. Starlink представляет практическую реализацию управления тысячами спутников и организации межспутниковых каналов связи. Система реализует принципы межспутниковой лазерной связи и сетевого управления большой распределенной системой, что представляет значительный интерес для разработки перспективных АФАР [11].

Проведенный анализ подтверждает, что технологические предпосылки для создания космической роевой системы сформировались. Космическая среда существенно облегчает преодоление традиционных барьеров за счет стабильности, доступности энергии и прозрачности для оптических систем. Существующие глобальные системы (ГЛОНАСС, Starlink) де-

монстрируют практическую реализуемость ключевых технологий управления большими группировками, в то время как научные проекты отрабатывают принципы формирования распределенных апертур.

### **Предлагаемая концепция и архитектура**

В основе предлагаемой архитектуры «стochasticной синтезированной апертуры» лежит перенос всей сложности обработки сигналов с борта МКА на наземный или орбитальный вычислительный комплекс. Каждый аппарат функционирует как «летающий АЦП/ЦАП» с прецизионной привязкой к единой шкале времени и координат, а вычислительный комплекс формирует синтезированную апертуру с динамической компенсацией фазовых ошибок на базе полученных данных.

#### *Общий вид системы*

Архитектура системы является трехуровневой.

Уровень 1. Аппаратный модуль (Отдельный МКА).

Уровень 2. Сетевая инфраструктура роя (лазерные межспутниковые каналы связи).

Уровень 3. Космический или наземный центр управления и обработки данных (ЦУОД).

#### *Аппаратная платформа: специализированный МКА*

Каждый аппарат роя включает следующие ключевые модули:

- модуль полезной нагрузки (аналоговый фронтенд (смесители, малошумящий усилитель (МШУ), усилитель мощности (УМ)), многоканальный приемо-передающий модуль (ППМ) S/X-диапазона, АЦП/ЦАП, оптоэлектронный блок, лазерный коммуникационный терминал);

- система точного позиционирования и навигации (GNSS-приемник, звездный датчик, система оптической взаимной метрики);

- система энергоснабжения.

#### *Сетевая инфраструктура*

Основой сетевой инфраструктуры является центральный вычислительный модуль системы

управления полетом, интеграции данных навигации и синхронизации времени [12].

Межспутниковая передача данных. Преимущества лазерных межспутниковых каналов связи (ЛМСС):

- высокая пропускная способность (более 10 Гбит/с);
- высокая направленность и защищенность от помех;
- отсутствие лицензирования частот;
- малое энергопотребление.

Предложена трехуровневая архитектура космической роевой системы, основанная на специализированных малых космических аппаратах, объединенных в высокоскоростную оптическую сеть. Архитектура реализует адаптивную АФАР с плавающей стохастической апертурой на базе роя МКА, каждый из которых несет на себе многоканальный ППМ.

### **Математическое моделирование системы**

Рассматривается радикальный подход к построению антенных систем, при котором элементы решетки — МС занимают произвольные позиции в пространстве, согласно случайному закону распределения, что исключает необходимость прецизионного позиционирования и управления группировкой. Система образует синтезированную апертуру с динамической компенсацией фазовых ошибок.

#### *Постановка задачи и исходные параметры*

За основу берется распределенная синтезированная апертура на базе роя из  $4 \times 4$  малых космических аппаратов, каждый из которых оснащен подрешеткой  $2 \times 2$  приемопередающих модулей X-диапазона ( $\lambda \approx 3$  см). Шаг супермассива составляет 13 м; положения центров МКА случайным образом отклоняются от узлов сетки (джиттер) в диапазоне 3–7 м. Геометрия системы определяется для каждого кадра с точностью  $\sigma_r \approx 3$  мм. Высота орбиты варьируется в диапазоне  $H = 300\text{--}500$  км (в расчетах принято  $H = 400$  км).

Исходя из цели работы предстоит построение строгой математической модели и получение численных оценок разрешающей способности и энергетических характеристик системы, а

также формулировка требований к аппаратным средствам и алгоритмам, обеспечивающим метрологическую устойчивость и фазовую когерентность в условиях стохастичности.

#### *Математическая модель и основные соотношения*

Влияние ошибок позиционирования на фазовую согласованность элементов системы характеризуется среднеквадратическим фазовым сдвигом [13]:

$$\sigma_\phi = \frac{2\pi\sigma_r}{\lambda}; \eta = \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma_\phi^2\right),$$

где  $\eta$  — коэффициент когерентности. Для  $\sigma_r = 3$  мм и  $\lambda = 3$  см получаем  $\sigma_\phi \approx 0,628$  рад и  $\eta \approx 0,821$ , что соответствует амплитудным потерям в главном лепестке  $\approx 0,86$  дБ.

Мгновенная (без синтеза апертуры) угловая ширина главного лепестка и ее проекция на поверхность Земли:

$$\Theta_{\text{inst}} \approx 0,886 \frac{\lambda}{D}; R_{\text{inst}} = H \Theta_{\text{inst}},$$

где  $D$  — эквивалентный размер супермассива. Для решетки  $4 \times 4$  с шагом 13 м  $D \approx 39$  м. При высоте орбиты  $H = 400$  км проекция разрешения  $R_{\text{inst}} \approx 270$  м.

Разрешение по дальности при использовании ЛЧМ-сигнала или широкополосного зондирования определяется полосой сигнала  $B$ :

$$R_{\text{range}} = \frac{c}{2B}.$$

Например, при  $B = 300, 500$  и  $1000$  МГц разрешение по дальности составляет 0,50; 0,30 и 0,15 м соответственно.

При синтезе апертуры вдоль траектории движения эффективная длина апертуры  $D_{\text{syn}}$  значительно превышает  $D$ , что позволяет получить азимутальное разрешение:

$$R_{\text{az,SAR}} = \frac{\lambda R_0}{2D_{\text{syn}}}; R \approx H.$$

Оптимальным в данном случае является режим *sliding-spotlight* с очень умеренным азимутальным сканированием [14]. По нашим оценкам реализация такого режима позволит эффективно

увеличить синтезируемую апертуру без удлинения когерентного интервала и выхода за пределы допустимого времени декорреляции сцены. При длительности кадра  $T_{\text{CPI}} = 0,5\text{--}0,6$  с и угле электронного сканирования всего  $0,02\text{--}0,04^\circ$  достигается эквивалентное время синтеза, обеспечивающее азимутальное разрешение порядка 1 м. Такой режим является оптимальным по энергетическим и временными параметрами модели: суммарный SAR-буст составляет  $\sim 64\text{--}65$  дБ при средней мощности одного ППМ около 1 Вт, что соответствует современным возможностям GaN-модулей.

#### *Результаты моделирования и их анализ*

На рис. 2 показана зависимость ширины главного лепестка (HPBW) от амплитуды джиттера

тера центров МКА для трех типов аподизации супермассива: равномерной, Тейлора (целевой уровень боковых лепестков  $PSL \approx -25$  дБ) и Кайзера ( $\approx -35$  дБ).

Анализ показывает, что увеличение джиттера от 3 до 7 м приводит к умеренному расширению HPBW (на доли процента). При этом использование более жестких окон (Тейлор, Кайзер) обеспечивает существенное подавление боковых лепестков при незначительном увеличении ширины главного лепестка.

В табл. 2 проанализировано влияние точности позиционирования фазовых центров на когерентность и разрешение системы. Результаты показывают, что переход от сантиметровых к миллиметровым ошибкам позиционирования является необходимым условием для реализации

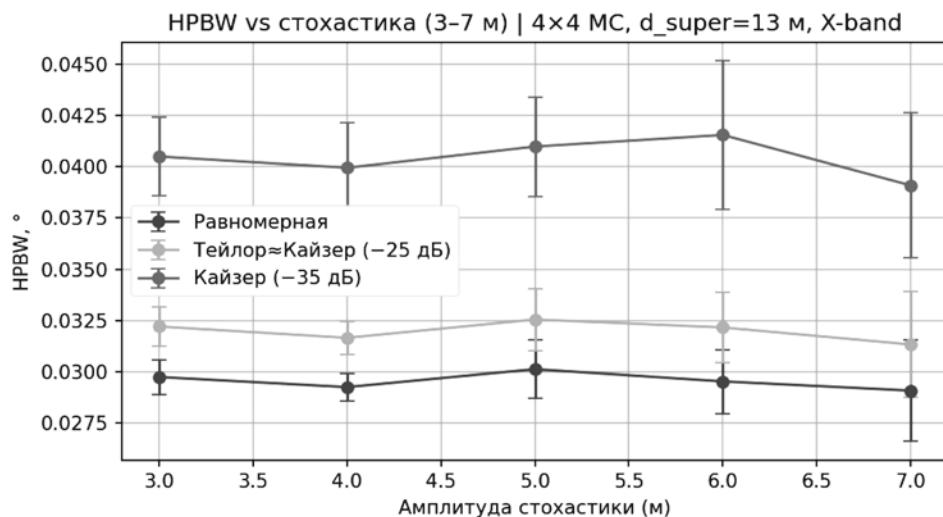


Рис. 2. Зависимость ширины главного лепестка от амплитуды джиттера при различных типах аподизации супермассива

Таблица 2

#### *Влияние точности позиционирования на когерентность и разрешение (X-диапазон, $\lambda = 3$ см, $H = 400$ км, $D = 39$ м)*

Параметр	Ед,	3 см	3 мм	Идеал
$\sigma_\phi = \frac{2\pi\sigma_r}{\lambda}$	рад	6,283	0,628	0
$\eta = e^{-\frac{1}{2}\sigma_\phi^2}$	—	0,0025	0,821	1,0
Расширение ДН $1/\sqrt{\eta}$	—	20,0	1,10	1,0
$\Theta^{\text{eff}}$	град	0,78	0,043	0,039
$R_{\text{eff}} = H\Theta_{\text{eff}}$	м	5400	300	272

ции полноценного режима когерентного синтеза апертуры.

На рис. 3 представлена зависимость азимутального разрешения на поверхности Земли от числа кадров сеанса в режиме SAR (логарифмическая шкала по оси  $N$ ). Показаны две кривые: идеальная когерентность (пунктир) и с учетом фазовых потерь при точности позиционирования  $\sigma_r = 3$  мм.

Из рисунка видно, что при идеальной когерентности увеличение числа кадров от  $N = 10$  до  $N = 10^4$  приводит к монотонному улучшению разрешения, что соответствует линейному росту синтезированной апертуры  $D_{\text{syn}} = V(NT_{\text{frame}})$ . В случае  $\sigma_r = 3$  мм (коэффициент когерентности  $\eta \approx 0,82$ ) наблюдается умеренное ухудшение

(масштаб  $\frac{1}{\sqrt{\eta}}$ ), но не влияющее на общую тенденцию.

В табл. 3 представлены энергетические параметры системы, включая полосу сигнала и выигрыш от когерентного накопления, которые используются для оценки дальности действия и отношения сигнал-шум.

Практический вывод. Для достижения субметрового азимутального разрешения необходимо либо обеспечить миллиметровую точность позиционирования фазовых центров (уровень  $\sigma_r \leq 3$  мм) и устойчивую фазовую привязку между кадрами, либо компенсировать остаточные фазовые ошибки программными алгоритмами.

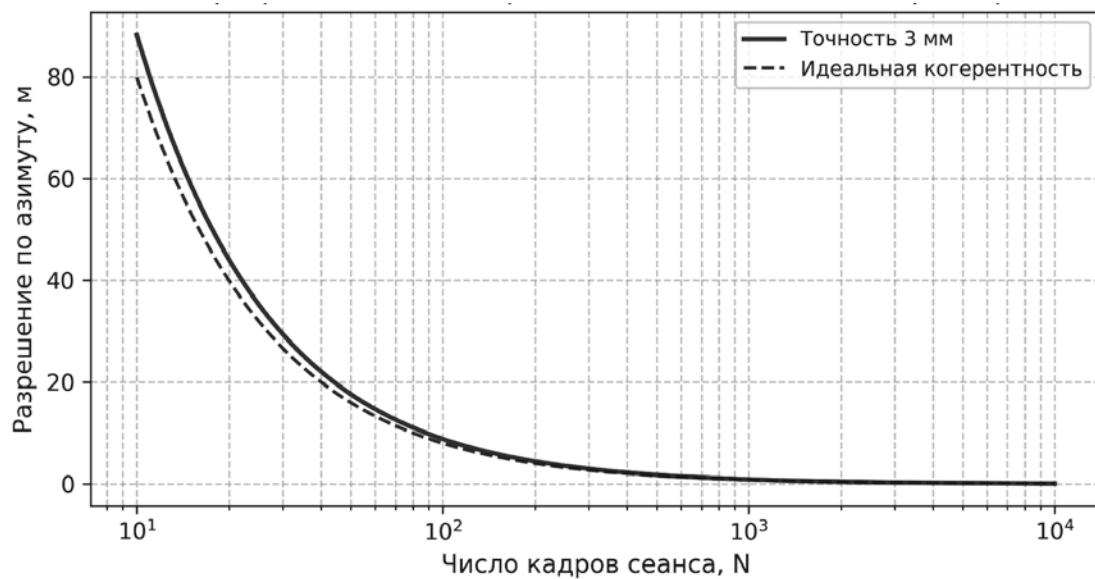


Рис. 3. Зависимость разрешения на поверхности Земли от числа кадров в режиме SAR

Таблица 3

**Энергетические характеристики распределенной АФАР и выигрыши когерентного накопления**

Параметр	Обозн.	Значение	Комментарий
Число МС / ППМ	$N_{\text{MS}} / N_{\text{el}}$	16/64	4×4 МКА, 2×2 ППМ
Шаг супермассива	$d_{\text{super}}$	13 м	—
Длина волны	$\lambda$	0,03 м	X-диапазон
Полоса сигнала	$B$	20–40 МГц	$R_{\text{range}} = \frac{c}{2B}$
Коэф. когерентности	$\eta$	0,82	при $\sigma_r = 3$ мм
Когерентное накопление	$N$	2000	выигрыш $\sim \eta N \approx +33$ дБ
С учетом sliding-spotlight		0,02–0,04°	дополнительно $\approx +3$ дБ
Мгновенное разрешение	$R_{\text{inst}}$	~270 м	$H = 400$ км, $D \approx 39$ м
SAR-азимут	$R_{\text{az,SAR}}$	~0,9 м	$D_{\text{syn-equiv}} \sim 7,5$ км

*Требования к аппаратным  
и программным средствам*

Метрология и навигация: требуется применение межспутниковой лазерной дальномерии и интерферометрии; относительное позиционирование должно обеспечивать точность  $\leq 3$  мм; стабильность геометрии системы на интервале 1 с — не хуже сантиметрового уровня; необходима компенсация термомеханических деформаций.

Синхронизация и время: целесообразно использование оптических межспутниковых линий связи (OISL) [15–17] для переноса времени с точностью на уровне пико- и субпикосекунд; стабильность частоты (девиация Аллана)  $\leq 10^{-12}$  на интервале 1 с; применение двустороннего переноса времени с учетом релятивистских поправок [15, 16, 18].

РЧ-тракт и преобразование сигналов: необходимы стандартные тракты X-диапазона (20–40 МГц), низкофазовые шумы (НЧО) и малошумящие гетеродины, высокоскоростные АЦП и ЦАП; реализация бортового формирования диаграммы направленности (beamforming) и алгоритмов синтезированной апертуры (SAR).

Связь и телеметрия: высокоскоростные OISL для обмена фазово-временной метаинформацией и кооперативной калибровки [16, 17].

Алгоритмы и программное обеспечение: алгоритмы автофокусировки (PGA, Map-Drift), компенсация доплеровских сдвигов и дрейфов опорных генераторов, адаптивная фазовая калибровка, применение аподизирующих функций (Тейлор, Кайзер), многокадровый SAR-синтез, методы подавления боковых лепестков.

*Анализ существующих решений и технологий*

Технологии оптической синхронизации и межспутниковых линий связи были успешно продемонстрированы в рамках проекта DSOC (NASA/JPL) [15] и в исследованиях по OISL [16, 17]. Концепции распределенных РСА и управления группировками космических аппаратов рассмотрены в работах [19, 20]. Пикосекундная фазовая синхронизация в спутниковых каналах продемонстрирована в [18]. Российские исследования в области распределенных АФАР и радиолокационных систем с

синтезированной апертурой представлены в публикациях [21–23].

*Выводы*

Проведенное математическое моделирование подтверждает, что при точности определения взаимного положения элементов системы  $\sigma_r \approx 3$  мм ( $\eta \approx 0,82$ ) и полосе зондирующего сигнала  $B \sim 20\text{--}40$  МГц распределенная система обеспечивает разрешение по дальности  $R_{\text{range}} \sim 7\text{--}10$  м и субметровое азимутальное разрешение  $R_{\text{az,SAR}}$  при времени синтеза около 0,5 с. Влияние стохастических отклонений положений МКА в диапазоне 3–7 м на ширину главного лепестка оказывается умеренным; из анализа следует критическая важность обеспечения миллиметровой точности позиционирования. Суммарный SAR-прирост составляет  $\sim 64\text{--}65$  дБ, что существенно для повышения дальности действия и точности системы. Учитывая успешные демонстрации технологий OISL/DSOC и методов точной синхронизации, реализация демонстрационной миссии представляется достижимой в обозримой перспективе. Дальнейшее развитие системы может включать увеличение размерности роя, создание гибридных опто-радиочастотных архитектур, применение более эффективных аподизирующих функций и внедрение квантовых методов переноса времени.

**Заключение**

Проведенное исследование и математическое моделирование распределенной стохастической синтезированной апертуры на базе роя малых космических аппаратов подтвердили принципиальную реализуемость данной концепции на современном уровне развития техники и технологий.

Анализ результатов моделирования показал, что при метрологической точности позиционирования фазовых центров на уровне 2–3 мм и применении высокостабильных систем синхронизации, основанных на оптических межспутниковых линиях (OISL) и переносе времени с пикосекундной точностью [15, 17, 18], распределенная система способна обеспечивать разрешение по дальности порядка 7–10 м и субметровое разрешение по азимуту.

Фазовые и энергетические характеристики, полученные в рамках моделирования, согласуются с оценками зарубежных и отечественных работ [19, 20, 23] и свидетельствуют о высокой устойчивости предложенной архитектуры к метрологическим и динамическим погрешностям.

Реализация прототипа распределенной когерентной системы возможна уже в среднесрочной перспективе при наличии интеграции аппаратных и программных решений, создаваемых в рамках целевой программы. Современные достижения в области бортовой цифровой обработки сигналов, лазерной связи и радиофотонных компонентов позволяют сформировать экспериментальную установку с использованием 16–32 малых КА, объединенных в единую распределенную antennу систему.

Ключевыми элементами такой системы являются:

- метрологический комплекс для измерения относительных координат с точностью до миллиметров;
- система синхронизации времени и частоты на базе оптических межспутниковых линий;
- унифицированная платформа бортовой обработки сигналов (beamforming, SAR, РТР, РЭБ);
- специализированные программные средства для адаптивного формирования диаграммы направленности, компенсации дрейфов и управления формацией;
- наземная инфраструктура для приема, хранения и совместной обработки данных.

Для перехода от лабораторных и демонстрационных решений к полномасштабной реализации необходимо разработать и утвердить целевую федеральную программу по созданию распределенных когерентных систем зондирования, связи и радиоэлектронной борьбы в космосе. Такая программа должна включать:

- разработку единых стандартов обмена фазо-временной метаинформацией между элементами распределенной системы;
- создание отечественных компонентной базы — лазерных источников, фотоприемников, АЦП/ЦАП и оптических модулей, совместимых с космическими условиями эксплуатации;
- разработку новых материалов для радиопрозрачных конструкций, легированных оптических волокон и термостабильных элементов антенн;

– формирование национального центра компетенций по распределенным когерентным системам и радиофотонным технологиям;

– разработку программного обеспечения для интеграции, моделирования и автоматизированного управления распределенными группировками КА.

Научная и технологическая новизна проекта заключается не только в создании отдельной экспериментальной системы, но и в формировании новой междисциплинарной отрасли — распределенной космической радиофотоники, объединяющей радиотехнические, оптические, квантовые и вычислительные технологии.

Реализация такой программы обеспечит переход от традиционных monoспутниковых РЛС и РТР-систем к масштабируемым адаптивным когерентным сетям, способным решать задачи зондирования, целеуказания, связи и радиоэлектронной борьбы в едином информационно-энергетическом контуре.

Таким образом, представленные результаты подтверждают возможность практической реализации концепции распределенной синтезированной апертуры с применением отечественных технологий и открывают путь к созданию нового класса космических когерентных систем.

В ближайшие годы целесообразно сосредоточить усилия на разработке демонстрационного прототипа, создании нормативно-технической базы и формировании консорциума предприятий для координации научных и производственных задач.

Авторы приглашают к сотрудничеству научные организации, предприятия и разработчиков программного и аппаратного обеспечения для объединения усилий в формировании новой отрасли — распределенных когерентных систем зондирования и радиофотонных технологий.

## Список источников

1. Blake L.V., Long M.W. Space-Based Radar Handbook. Artech House, 2023. 48 p.
2. Cappelletti C., Battistini S. CubeSat Handbook: From Mission Design to Operations. Academic Press, 2024. 36 p.
3. Бавижев М.Д., Рахманов А.А. Мобильная воздушная активная фазированная антенная

- решетка на базе роя БПЛА: концепция, моделирование и прототипирование // Научный Вестник ОПК России. 2025. № 4. С. 15–23.
4. Debnath S., Li Y., Ozdemir O., et al. UAV-mounted reconfigurable antenna array with in-flight mechanical and electronic beam scanning capability // Nature Communications. 2025. 44 p.
5. Kaushal H., Kaddoum G. Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017. Vol. 19, No 1. Pp. 57–96.
6. Maxar Technologies. WorldView Legion Spacecraft Specifications. 2024. 14 p.
7. NASA. SPACE HAUC: Spaceborne Heterogeneous Autonomous and Adaptive Ubiquitous Computing. 2023. 28 p.
8. Bentum M.J., et al. OLFAR: Orbital Low Frequency Array for radio astronomy // Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2011. Pp. 1–11,
9. DARPA. Blackjack Program Overview. 2024. 14 p.
10. ГЛОНАСС. Официальный сайт системы ГЛОНАСС // Роскосмос. 2024 (дата обращения: 24.05.2025).
11. SpaceX Starlink. Satellite Constellation Technical Overview // SpaceX. 2024. 42 p.
12. Holybro. Pixhawk 6 Product Page. 2024. 13 p.
13. Balanis C.A. Antenna Theory: Analysis and Design. Wiley, 2016. 114 p.
14. Wu, Q., Li, Z., Zhang, Y. et al. A Review of Spaceborne High-Resolution Spotlight/Sliding Spotlight Mode SAR Imaging. 2025. No 17(1), p. 38.
15. NASA/JPL. Deep Space Optical Communications (DSOC): Mission overview. 2023. 16 p.
16. Velasco C. et al. Optical inter-satellite links for navigation constellations // Proc. SPIE. 2024. 21 p.
17. DLR. CubeISL Demonstrator: Optical inter-satellite link for small satellites. DLR, 2024. 24 p.
18. Guo X. et al. Picosecond-level time and phase synchronization for satellite links // Satellite Navigation. 2025. 142 p.
19. Renga A. et al. Distributed Synthetic Aperture Radar on Small Satellites: Concepts and Architectures // Acta Astronautica. 2023.
20. Sarno S. et al. Formation control for distributed SAR constellations // CEAS Space Journal. 2020.
21. Петренко В.С. Оценка влияния фазовых ошибок в космических РЛС с синтезированной апертурой // Радиотехника и электроника. 2023.
22. Горячев И.В. Распределенные фазированные антенные решетки для групповых спутников // Материалы Московского авиационного института. 2022.
23. Каплун А.А. Методы синтеза апертуры в многоапертурных космических системах // ИРЭ РАН, препринт. 2021.