

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. Рахманов¹, М.Д. Бавижев²

¹РАРАН, ²НПП «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

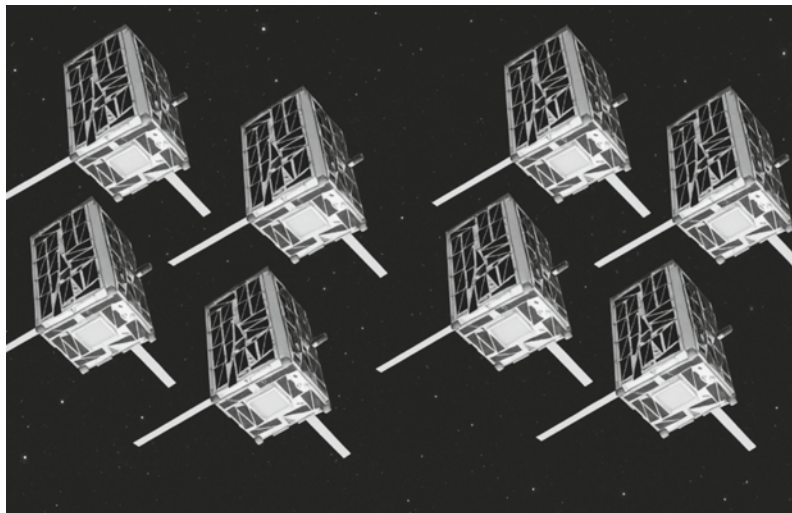


Рис. 1. Массив спутников стандарта CubeSat

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 (РСА) 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 РСА, предлагаемая архитектура стохастической синтезированной апертуры (ССА) 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 $0,5 \text{ м}^2$:

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

где 1400 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 $50\text{--}60 \text{ Вт}$, при этом сохраняя возможность работы мощных приемопередающих 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 $2\text{--}2,5 \text{ Гбит/с}$.

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 Махак обеспечивают разрешение до $0,3 \text{ м}$ 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 дорогами 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 «стохастической 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, малощумящий 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 компенсации фазовых ошибок.

Постановка задачи и исходные параметры

За основу берется распределенная синтезированная апертура на базе роя из 4×4 малых космических аппаратов, каждый из которых оснащен подрешеткой 2×2 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 $H = 300$ –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 η — 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 4×4 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_{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 $T_{\text{ср}} = 0,5\text{--}0,6$ 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 временным параметрам 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 $\text{PSL} \approx -25$ дБ) и Кайзера (≈ -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 реализа-

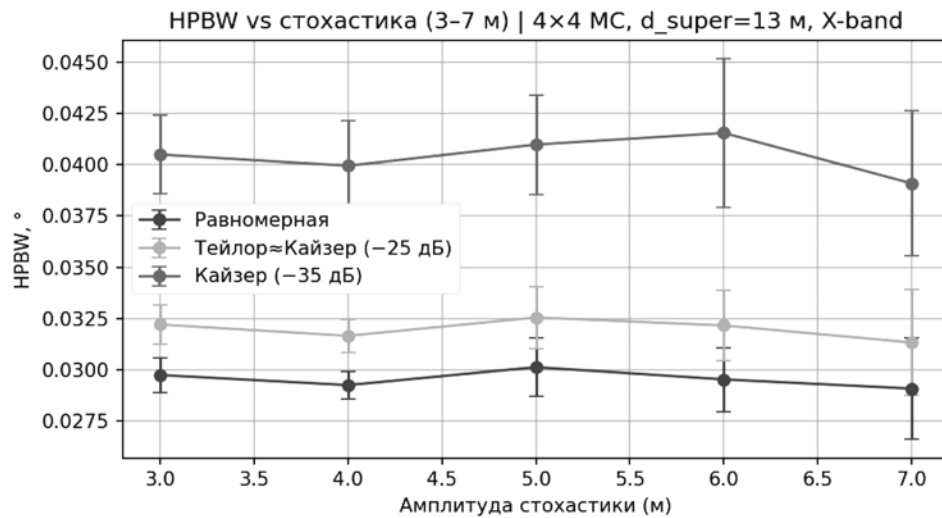


Рис. 2. Зависимость ширины главного лепестка от амплитуды джиттера при различных типах аподизации супермассива

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
$\sigma_\varphi = \frac{2\pi\sigma_r}{\lambda}$	рад	6,283	0,628	0
$\eta = e^{-\frac{1}{2}\sigma_\varphi^2}$	–	0,0025	0,821	1,0
Расширение ДН $1/\sqrt{\eta}$	–	20,0	1,10	1,0
Θ^{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.

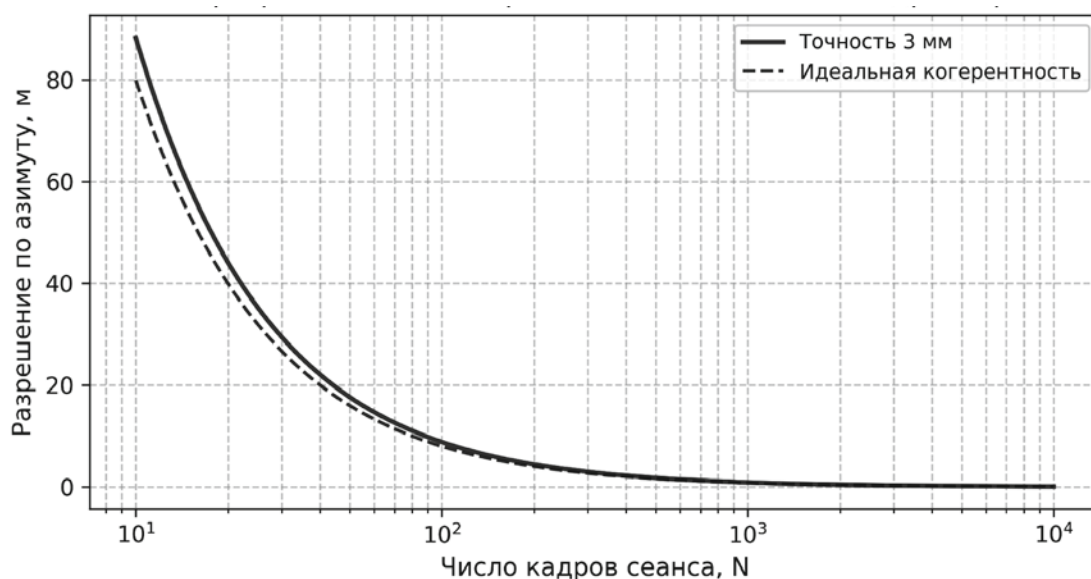


Рис. 3. Зависимость разрешения на поверхности Земли от числа кадров в режиме SAR

Таблица 3

Энергетические характеристики распределенной АФАР и выигрыш 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_{super}	13 м	—
Длина волны	λ	0,03 м	Х-диапазон
Полоса сигнала	B	20–40 МГц	$R_{\text{range}} = \frac{c}{2B}$
Коэф. когерентности	η	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_{inst}	~ 270 м	$H = 400$ км, $D \approx 39$ м
SAR-азимут	$R_{\text{az,SAR}}$	$\sim 0,9$ м	$D_{\text{syn-equiv}} \sim 7,5$ км

*Требования к аппаратным
и программным средствам*

Метрология и навигация: требуется применение межспутниковой лазерной дальнометрии и интерферометрии; относительное позиционирование должно обеспечивать точность ≤ 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 PCA 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 антенную 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 моноспутниковых 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.