

Научная статья / Original Article

УДК 621.396.96

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188115>

EDN: <https://www.elibrary.ru/USTAYH>

АКТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ РАДИОЛОКАЦИИ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Г.Ю. Степанов✉, В.А. Ненашев

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ georgy.nettov@yandex.ru

Цитирование: Степанов Г.Ю., Ненашев В.А. Актуальные аспекты радиолокации с синтезированной апертурой // Труды МАИ: электрон. журнал. № 147. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188115>

Аннотация. В данной статье собраны и проанализированы актуальные аспекты бортовой радиолокации с синтезированной апертурой. Цель работы заключается в подробном исследовании состояния этой области на данный момент времени и перспектив её развития. Для сбора необходимой информации был осуществлён поиск соответствующих источников в научных базах данных за последние несколько лет, с последующим сравнением результатов поиска и их оценкой. Особое внимание уделено инновациям в радиолокации с синтезированной апертурой. Показано, что малогабаритные РЛС с синтезированной апертурой, базирующиеся на малых летательных аппаратах, увеличивают возможности дистанционного зондирования Земли, за счёт различных вариаций применения и бюджетных решений. Цифровое формирование луча повышает приспособляемость к различным ситуациям в управлении диаграммой направленности, многолучевом режиме и увеличении динамического диапазона. Методы искусственного интеллекта и машинного обучения упрощают и улучшают обработку данных радиолокации с синтезированной апертурой. Акцент

сделан на проблемах, связанных с компенсацией движения платформы, трудоёмкой бортовой и наземной обработке большого объема данных. Отдельно рассмотрена роль имитационного моделирования как необходимого инструмента для тестирования алгоритмов, калибровки систем и создания данных для обучения моделей искусственного интеллекта. Выявлена зависимость этих направлений друг от друга, которая показывает, что каждое усиливает возможности другого, что ведет к развитию технологии и повышению её эффективности в задачах различного типа. Статья подчеркивает необходимость совершенствования систем радиолокации с синтезированной апертурой, а также разработке устройств для бортовой обработки данных за счёт искусственного интеллекта и машинного обучения.

Ключевые слова: бортовая радиолокация; синтезированная апертура; дистанционное зондирование Земли; малый летательный аппарат; цифровое формирование луча; искусственный интеллект; машинное обучение; обработка данных; имитационное моделирование.

CURRENT ASPECTS OF SYNTHETIC APERTURE RADAR

G.Y. Stepanov✉, V.A. Nenashev

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,

Saint Petersburg, Russia

✉ georgy.nettov@yandex.ru

Citation: Stepanov G.Y., Nenashev V.A. Current aspects of synthetic aperture radar // Trudy MAI. 2026. No. 147. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188115>

Abstract. This article summarizes and analyzes current aspects of airborne synthetic aperture radar. The objective of the work is to thoroughly examine the current state of this field and its development prospects. To gather the necessary information, a search of relevant sources in scientific databases over the past several years was conducted, followed by a comparison and evaluation of the search results. Particular attention is paid to innovations in synthetic aperture radar. It is shown that compact synthetic aperture radars based on small aircraft increase the capabilities of Earth remote sensing due to

various application variations and cost-effective solutions. Digital beamforming improves adaptability to various situations in beam pattern control, multipath mode, and increasing the dynamic range. Artificial intelligence and machine learning methods simplify and improve the processing of synthetic aperture radar data. Emphasis is placed on problems associated with platform motion compensation and labor-intensive onboard and ground processing of large volumes of data. The role of simulation modeling as a necessary tool for testing algorithms, calibrating systems, and generating data for training artificial intelligence models is examined separately. The interdependence of these areas is revealed, demonstrating that each enhances the capabilities of the other, leading to the development of technology and its increased effectiveness in various tasks. The article emphasizes the need to improve synthetic aperture radar systems, as well as the development of devices for onboard data processing using artificial intelligence and machine learning.

Keywords: airborne radar; synthetic aperture; Earth remote sensing; small aircraft; digital beamforming; artificial intelligence; machine learning; data processing; simulation.

Введение

Радиолокационное синтезирование апертуры (РСА) является перспективной технологией в области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которая позволяет получать радиолокационные изображения (РЛИ) поверхности высокого разрешения вне зависимости от времени суток и погодных условий [1, 2]. Суть метода заключается в синтезе антенной апертуры, которая значительно превышает габариты реальной антенны, благодаря синхронному накоплению сигналов. Эти сигналы регистрируются во время движения платформы-носителя радара с РСА [3]. Современные бортовые РЛС могут достигать высокого разрешения, что близко по качеству к аэрофотосъёмке [2, 4].

В настоящее время можно заметить значительный интерес к области радиолокационного синтезирования апертуры, что объясняется обилием специальных задач и постоянно растущими требованиями к радиолокационным станциям (РЛС). К растущим требованиям следует отнести: увеличение разрешения РЛИ и расширение функционала систем. Например,

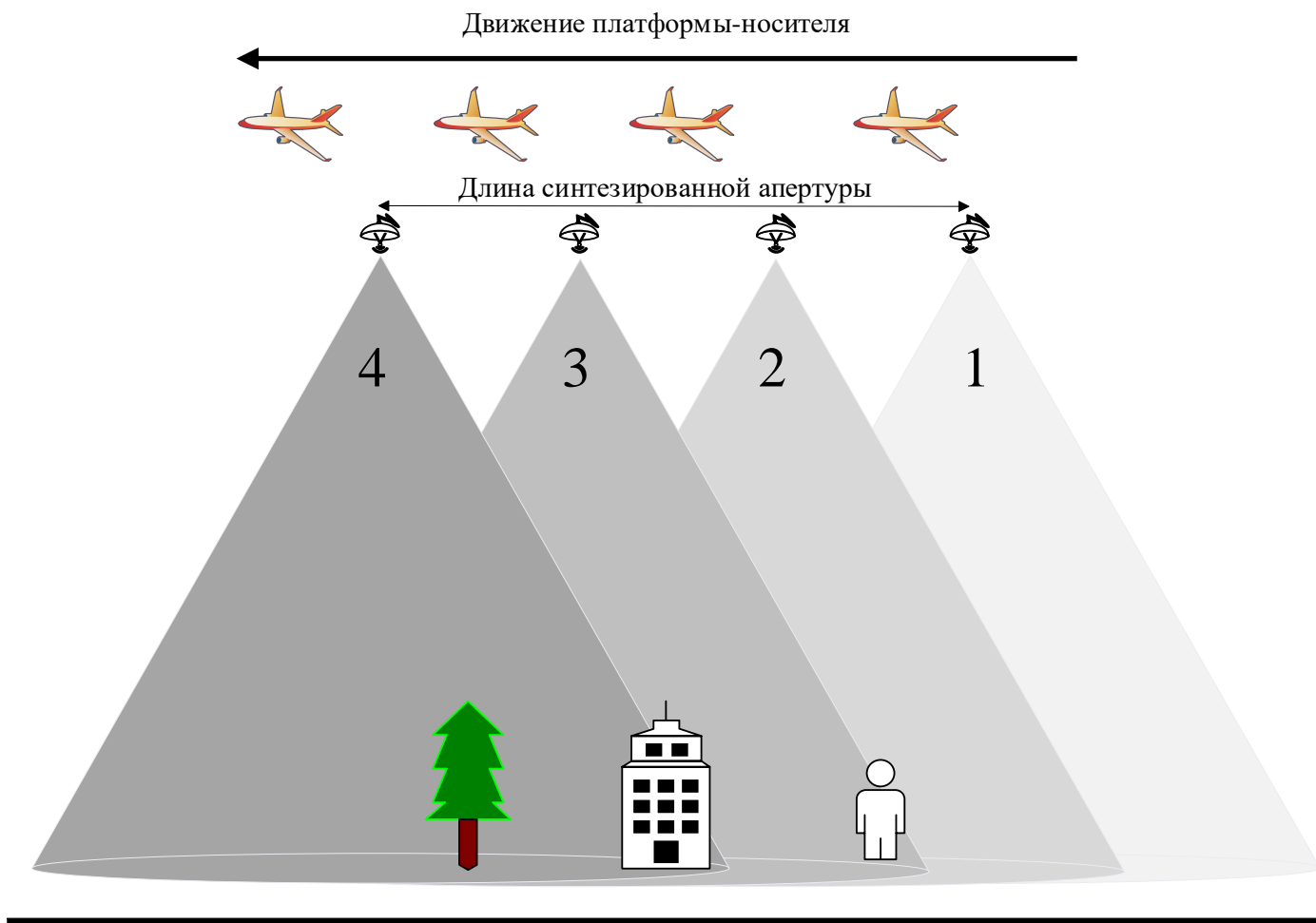
многопозиционное наблюдение, за счёт которого реализуется технология обнаружения и опознавания протяжённых объектов в пространстве [5]. Значительно выделяется применение малогабаритных бортовых РЛС на малых летальных аппаратах (МЛА) для различных задач, таких как: контроль состояния посевов, прогнозирование урожайности, экологический контроль, а также мониторинг наземных объектов [2].

Актуальность данной работы объясняется потребностью в сборе и анализе последних и новейших достижений в области радиолокационного синтеза апертуры. Помимо этого, необходимо выявить актуальные проблемы и дальнейшие направления развития. Улучшение цифровых методов обработки сигналов, внедрение систем с искусственным интеллектом (ИИ) и машинным обучением (МО) являются важными направлениями и позволят повысить эффективность и автономность бортовых РЛС с РСА [6].

Целью исследования является обзор и анализ текущего состояния и последующего развития бортовой радиолокации с синтезированной апертурой. Он подразумевает обзор современных систем и методов обработки данных с их областью применения.

Эволюция и современные возможности РСА

РСА является современной технологией, и она позволяет получать изображения земной поверхности высокого разрешения, которые можно сравнить с оптическими снимками, независимо от времени суток и погодных условий [7–9]. Принцип действия РСА базируется на формировании виртуальной антенной апертуры, которая значительно превышает физические размеры реальной антенны, за счёт синхронной обработки отраженных от поверхности сигналов. Эти сигналы фиксируются во время движения платформы-носителя РСА [3, 8, 10] (рис. 1). Такой эффект возможен за счёт применения сдвига доплеровской частоты, возникающей при относительном движении носителя РЛС по отношению к наблюдаемой поверхности, что позволяет значительно увеличить разрешение [11].



Поверхность Земли

Рисунок 1 – Упрощённая концептуальная схема принципа работы бортовой РЛС с РСА

С развитием технологий РСА были созданы системы, которые помимо обнаружения объектов, могли получать видимое изображение протяженных объектов в пространстве посредством многопозиционного наблюдения [12]. Современные аэрокосмические РЛС с планарными фазированными антенными решетками уже достигли дециметрового разрешения [4], а некоторые РСА-системы гарантируют субметровое разрешение [11, 13].

Актуальные тенденции и технологические инновации

Развитие технологий, появление новых методов обработки данных и расширение областей применения поспособствовало значительным изменениям в области радиолокации с синтезированной апертурой.

Разработка малогабаритных РСА до 10 кг, для установки на МЛА, является основополагающим направлением развития в этой области [2, 14]. Таким системам свойственна малая мощность излучения, низкое энергопотребление и

работа со сверхширокополосными линейно частотно модулированными (ЛЧМ)-сигналами [2]. За счёт применения РСА на МЛА открывается множество возможностей ДЗЗ, таких как: экологический контроль, картографирование, мониторинг наземных объектов [15–17]. На данный момент существуют многоканальные W-диапазонные РСА-системы для мультироторных МЛА, способные работать в режиме реального времени [18]. Однако, несмотря на явные преимущества, есть и проблемы, а именно необходимость точного определения траектории полета для компенсации движения, что особенно актуально для легких МЛА, подверженных влиянию ветра и иных внешних факторов [15, 17, 19].

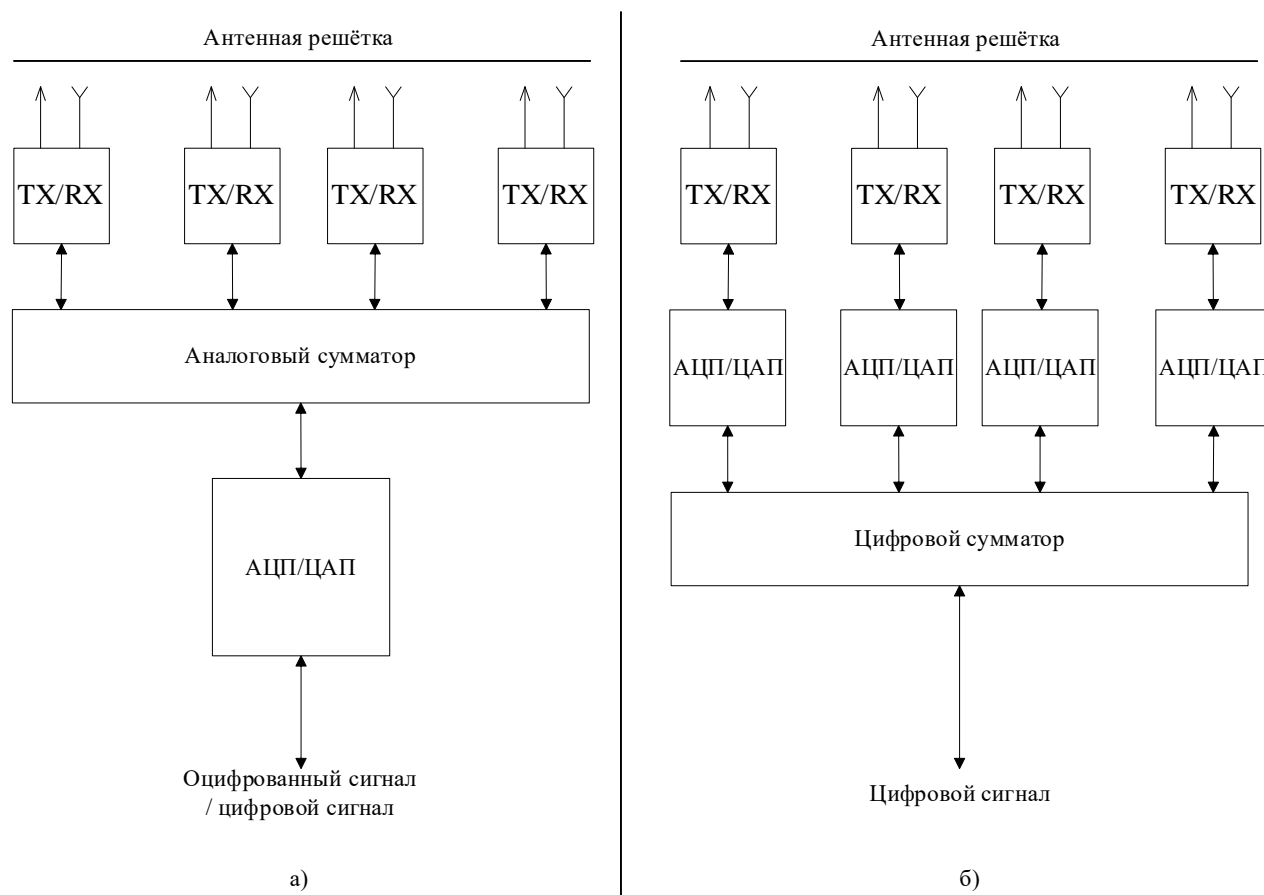
Таблица 1

Сравнительные характеристики малогабаритных РСА для МЛА.

Параметр	Значение	Описание
Масса РСА	от <1 кг до 10 кг	Стандарт для МЛА-платформ [2]
Разрешение	Дециметровое, субметровое	Различается в зависимости от платформы и режима [4, 11, 13]
Частотный диапазон	X-диапазон, Ku-диапазон, W-диапазон	Зависит от назначения и требуемого проникновения [18]
Тип носителя	Мультироторные МЛА, самолетные МЛА	Легкие и компактные платформы [15–17]
Задачи	Экологический контроль, картографирование, мониторинг объектов	Широкий спектр применений [2]
Особенности	Малая мощность, низкое энергопотребление, ЛЧМ-сигналы, многоканальность	Характерно для компактных систем [2, 18]

Постепенная замена аналоговых антенных решёток на цифровые позволила значительно повысить функциональные возможности радиолокационных систем. За счёт ЦФЛ можно по-разному регулировать алгоритмы работы и формировать многолучевую диаграмму направленности в цифровом виде [20, 21]. Это повышает эффективность всей системы, так как в один момент времени формируются нескольких независимых лучей [22]. Поскольку сигнал принимается с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и передаётся с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) до сумматора, это исключает взаимное влияние между элементами антенной решётки, позволяя конструкции с ЦФЛ максимизировать динамический диапазон системы за счет оцифровки

сигнала [3] (рисунок 2). Проблемой таких систем является необходимость тщательной калибровки. Это обусловлено тем, что даже небольшие ошибки регулировки амплитудно-фазовых частотных характеристик (АФЧХ) могут привести к деградации чувствительности и подавления неоднозначностей [22, 23].



TX - передатчик, RX- приёмник

Рисунок 2 - Сравнение аналогового (а) и цифрового (б) формирования луча

В настоящее время объемы РСА-данных сильно возросли. ИИ и МО служат незаменимыми инструментами для их эффективной обработки [24]. Методы глубокого обучения активно применяются для решения задач, связанных с классификацией поверхностей, обнаружением и распознаванием объектов, подавлением спекл-шумов и объединением РСА-оптических данных [25, 26]. Они автоматизируют процесс анализа РСА-изображений, повышая точность и скорость обработки [27, 28]. Развитие глубоких свёрточных нейронных сетей открыло возможность точной сегментации наземных объектов в РСА-изображениях [29–31]. Тем не менее, очень важной проблемой остается дефицит размеченных данных для обучения таких моделей [32].

Применение ИИ/МО в обработке РСА-данных.

Задача	Примеры методов ИИ и МО	Цель
Классификация поверхностей	Сверточные нейронные сети, рекуррентные нейронные сети	Автоматическое распознавание типов земной поверхности (леса, водные объекты, городские зоны) [25, 27]
Обнаружение и распознавание объектов	YOLO, Faster R-CNN, SSD	Автоматическое выявление и идентификация судов, транспортных средств, зданий [25, 28]
Сегментация изображений	U-Net, DeepLab, FCN	Точное выделение границ объектов и различных регионов на РСА-изображениях [29–31]
Подавление спекл-шумов	Генеративно-состязательные сети, автокодировщики	Улучшение качества изображения, снижение шумов без потери детализации [25]
Инверсия параметров	Регрессионные модели на основе нейронных сетей	Извлечение физических параметров объектов (влажность почвы, биомасса) [26]
Слияние данных	Глубокие нейронные сети	Комбинация РСА-данных с оптическими, лидар для создания более информативных изображений [25]

Постоянное стремление к улучшению разрешения изображения является приоритетом для РСА. Достижение субметрового разрешения, а в перспективе и сантиметрового, обеспечивается за счет синтезирования апертуры и последовательной пространственно-временной обработки сигналов [6, 33]. Но нельзя сказать, что среди актуальных РСА систем не применяются метровые, декаметровые или километровые разрешения РЛИ (рисунок 3).

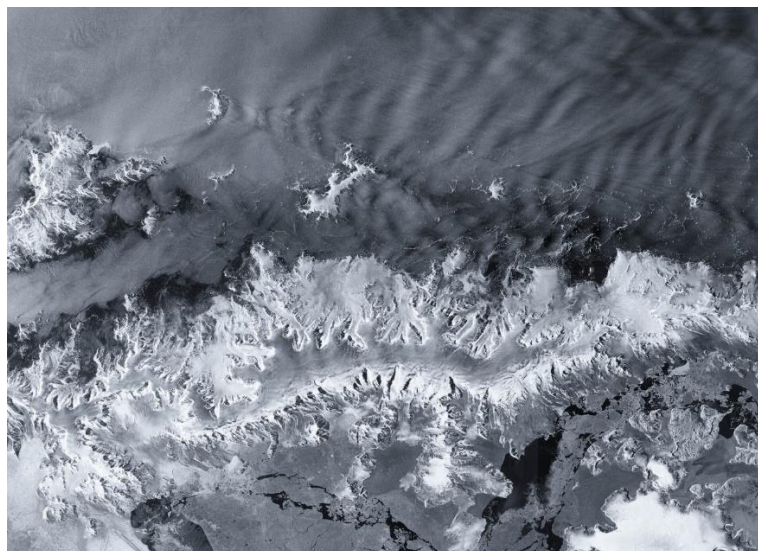


Рисунок 3 – РСА-изображение метрового разрешения [34]

Новейшие аэрокосмические радары могут достигать разрешения 0.16 м по дальности и 0.1667 м по азимуту [18].

Вызовы и проблемы

Одной из основных причин фазовых искажений сигнала является нестабильность движения платформы-носителя РСА. Как упоминалось ранее, это связано с воздействием внешних факторов, таких как ветер, турбулентность и т.д. [8]. Такие искажения приводят к потерям качества РЛИ, вплоть до его полного разрушения, так как они могут достигать сотен градусов [8]. К точности систем навигации предъявляются строгие требования, поскольку это необходимо для обеспечения синфазной обработки сигналов и погрешность должна быть порядка 5 мм [8]. За счёт алгоритмов автофокусировки фазовые ошибки можно устранять. К таким алгоритмам относится метод фазового градиента, способный компенсировать различные погрешности траектории [8, 18]. Для лёгких конструкций МЛА-систем, которые подвержены непредсказуемым движениям, это особенно важно. Из-за этого возникает потребность в точном знании положения антенны и ориентации платформы-носителя [19].

Возвращаясь к увеличивающимся объёмам данных, которые генерируются современными РСА-системами, можно сделать вывод о значительных вычислительных нагрузках [24, 35, 36]. У каналов связи ограничена пропускная способность, а бортовое хранение данных не бесконечно. Передача всего объёма необработанных “сырых” данных на наземные станции становится неэффективным решением [35]. Обработка данных на борту платформы-носителя может решить эту проблему за счёт применения высокопроизводительных вычислений на базе графических процессоров (англ. GPU) [15, 35, 37]. Основные алгоритмы формирования РСА-изображений, такие как Дальность-Допплер, Omega-k и ЛЧМ-фильтрация – ресурсоёмкие, поэтому их реализация на борту первостепенна [35].

Имитационное моделирование – инструмент для анализа процессов формирования РЛИ в РСА, а также для исследования влияния различных источников ошибок и искажений. С его помощью можно оценить геометрические

искажения изображений и разработать методы их коррекции [38–40]. Помимо этого, имитационное моделирование позволяет:

- проверять и улучшать новые алгоритмы обработки до их реального применения на борту, что позволяет снизить риски и затраты на разработку;
- оценивать производительность системы при различных сценариях и условиях окружающей среды, что важно для адаптации параметров радара;
- проводить калибровку систем, имитируя отклики от известных наземных объектов, что необходимо для обеспечения точности измерений;
- обучать и проверять алгоритмы ИИ и МО, создавая искусственные наборы данных, когда реальные данные ограничены или труднодоступны, что позволяет ускорить процесс разработки и отладки моделей.

Результаты исследования

Анализ актуальной научной литературы даёт чёткое понимание, что улучшение пространственного разрешения РСА-изображений является одним из основных направлений развития радиолокации с синтезированной апертурой. Новейшие системы достигают дециметрового и субметрового разрешения [18, 41], а в некоторых случаях даже сантиметрового [42, 43]. Это возможно благодаря сложным алгоритмам синтеза апертуры и последовательной пространственно-временной обработке сигналов, в результате чего, получаются детализированные РЛИ. Такие РЛИ решают тяжёлые задачи мониторинга и анализа [44]. Однако, все эти технологические прорывы не могут разрешить весь список проблем, требующих дальнейших исследований и разработок.

Появление малогабаритных РСА, установленных на МЛА, значительно расширяет возможности получения детализированных данных с низкой высоты [2, 14]. Но нельзя забывать, что из-за малой массы и подверженности МЛА внешним факторам, выдвигаются жесткие требования к компенсации движения. Применение ЦФЛ может частично решить это, обеспечив более вариативное управление лучом и адаптивную обработку сигналов, чтобы уменьшить количество искажений, вызванных нестабильностью платформы [23]. ЦФЛ, имея возможность быстрого изменения диаграммы направленности, повышает эффективность сканирования, что критически важно для маневренных МЛА.

Сводка ключевых результатов, преимуществ и проблем в радиолокации с синтезированной апертурой.

Ключевой результат	Основные преимущества	Основные проблемы
Малогобаритные РСА на МЛА	Вариативность применения, экономическая эффективность, расширение областей ДЗЗ	Компенсация движения платформы, обеспечение стабильности, точность позиционирования
ЦФЛ	Вариативность управления, многолучевой режим, повышение эффективности, максимальный динамический диапазон	Необходимость высокоточной калибровки, сложность реализации
ИИ и МО в обработке данных РСА	Автоматизация обработки, повышение точности и скорости анализа, решение сложных задач (классификация, сегментация)	Дефицит размеченных данных, вопросы адекватности моделей, вычислительные ресурсы
Повышение разрешающей способности	Субметровое и сантиметровое разрешение, получение детализированных изображений	Сложность алгоритмов обработки, требовательность к аппаратным ресурсам
Высокопроизводительная обработка данных	Бортовая обработка, использование GPU и специализированных ускорителей	Ограниченная пропускная способность каналов связи, большие объемы генерируемых данных, вычислительные нагрузки
Имитационное моделирование	Тестирование алгоритмов, калибровка систем, изучение физических явлений, генерация искусственных данных	Сложность моделирования реальных условий, требовательность к вычислительным ресурсам

На фоне огромных объёмов генерируемых РСА данных, которые продолжают расти, особенно с учетом ЦФЛ и высоких разрешений РЛИ, традиционные методы обработки становятся слишком ресурсоемкими. Применение ИИ и МО позволяет сделать обработку этих данных значительно эффективней и автоматизировать сам процесс [25, 26]. Методы глубокого обучения увеличивают скорость анализа и извлекают более детальную информацию из РСА-изображений. Такой вывод можно сделать исходя из высокоточных результатов выполнения задач классификации, сегментации и обнаружения объектов [27, 28]. Обработка данных с помощью GPU на борту платформы-носителя стало необходимостью для реализации ИИ и МО алгоритмов, в частности, для систем на МЛА, где каналы связи и бортовое хранение имеют строгие ограничения [35, 36].

Связать между собой все аспекты разработки РСА позволяет имитационное моделирование, за счёт которого тестируются новые архитектуры ЦФЛ,

оценивается влияние нестабильности МЛА на качество РЛИ, генерируются искусственные данные для обучения ИИ и МО моделей при ограниченности реальных. А разработка новых алгоритмов обработки с последующей отладкой до их реального применения значительно снижает риски, затраты и время на разработку, обеспечивая ускоренное внедрение новшеств [44-49].

Перспективы и направления дальнейших исследований

В результате углубления в область радиолокации с синтезированной апертурой и выявления её проблем, можно обозначить определённые направления для дальнейших исследований:

1. Для достижения миллиметровой точности позиционирования необходимо изучить возможность разработки автономных и более эффективных систем компенсации движения для МЛА с РСА. Такие системы должны работать в реальном времени и объединять высокоточную навигацию с адаптивными алгоритмами автофокусировки, основанными на ИИ и МО [50–52];

2. Для минимизации задержек и снижения требований к каналам связи необходимо конструирование аппаратных платформ под конкретные задачи (например, интегральных схем специального назначения (англ. ASIC) или оптимизированных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС)), которые, в силу своего специального назначения, смогут реализовывать сложные нейронные сети и алгоритмы обработки РСА-данных на борту платформы-носителя соответственно [36]. В итоге это должно ускорить получение полезной информации;

3. Для повышения надёжности систем ДЗЗ и информативности данных извлекаемых из них необходимо изучить возможность реализации с последующей разработкой новых алгоритмов глубокого обучения для объединения РСА-данных с данными других сенсоров (оптических, лидар, гиперспектральных) [25]. Такое решение должно позволить преодолеть ограничения каждого отдельного типа сенсоров;

4. Для повышения реалистичности искусственных РСА-изображений необходимо ощутимое развитие имитационного моделирования, которое должно

привести к возможности генерации больших и разнообразных наборов данных для ИИ и МО [48, 49];

5. Для улучшения разрешающей способности и устойчивости к помехам необходимо развитие квантовых радаров и сверхширокополосных систем РСА [3, 53–55]. В данной работе им уделялось немного внимания, но это направление представляет собой не менее значимую долгосрочную перспективу в области радиолокации с синтезированной апертурой.

Актуальные и развивающиеся области РСА можно представить в виде диаграммы, на которой будет видна их взаимосвязь друг с другом (рисунок 4).

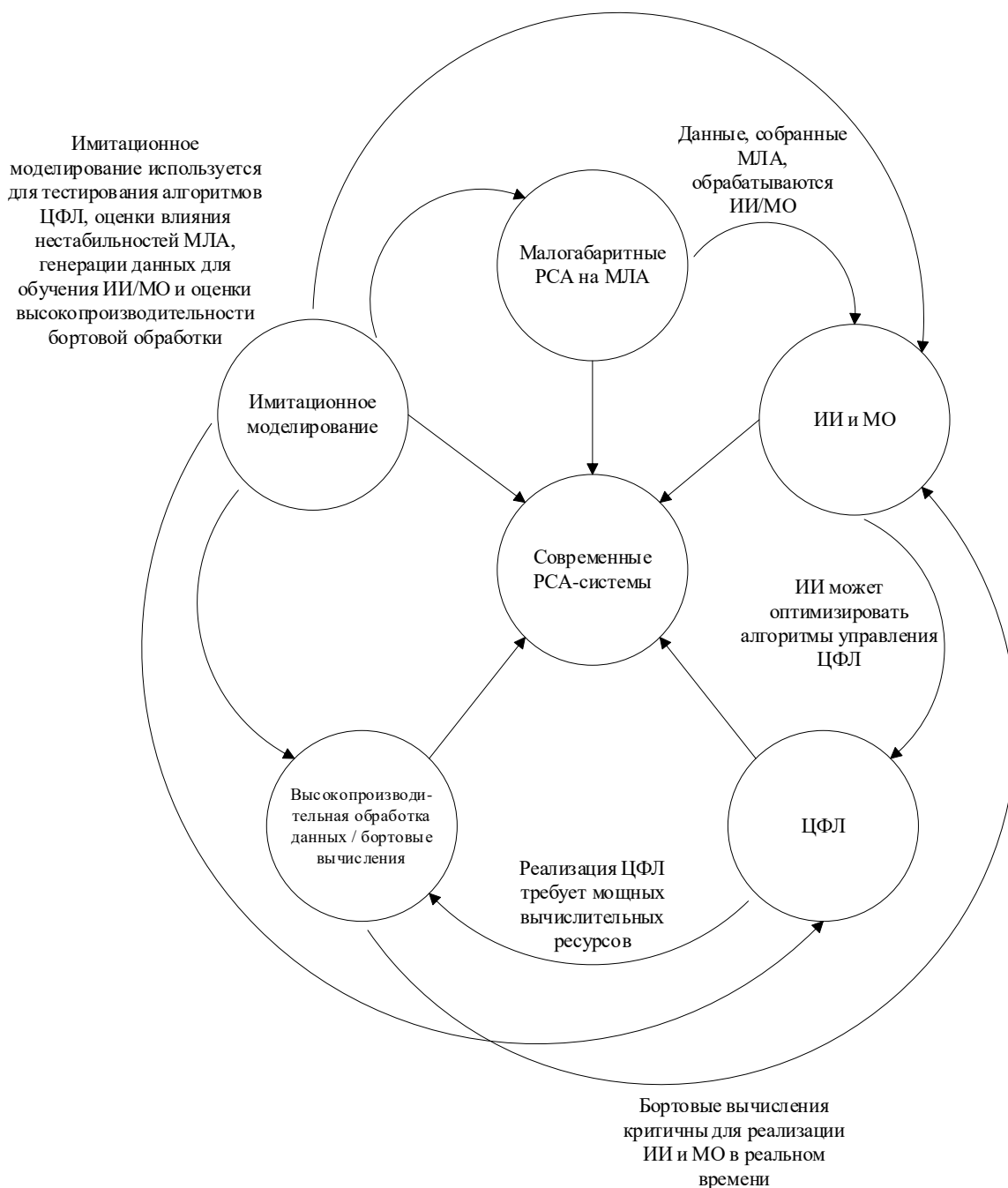


Рисунок 4 - Синергия ключевых технологических направлений в радиолокации с синтезированной апертурой.

Заключение

Глубокий анализ и систематизация наиболее актуальных аспектов радиолокации с синтезированной апертурой позволил выявить основные направления развития и проблемы данной области. На основе этой информации можно оценить её текущее состояние и сделать вывод о значительной ценности этой технологии.

Стоит отметить, что некоторые фундаментальные аспекты РСА или узкоспециализированные применения могли быть рассмотрены в меньшей степени, так как обзор сосредоточен на наиболее востребованных и обсуждаемых тенденциях за последние годы. Хотя в настоящей работе и применялись релевантные источники, этот факт не может гарантировать абсолютную полноту охвата всех существующих публикаций в такой обширной области.

В последующих исследованиях и разработках имеет смысл сфокусироваться на преодолении текущих проблем за счёт объединения передовых технологий.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Moreira A., Krieger G. Spaceborne synthetic aperture radar (SAR) systems: state of the art and future developments // 33rd European Microwave Conference Proceedings, Vol.1, 2003. P.101-104. DOI: 10.1109/EUMC.2003.1262228.
2. Устинов А., Саджид А., Заливин А. О применении малогабаритных РЛС в задачах дистанционного зондирования земли // Молодёжь, наука, образование: актуальные вопросы, достижения и инновации: Сборник статей II Международной научно-практической конференции. -Пенза: МЦНС "Наука и Просвещение". -2021, с.26-29.
3. Vouras P., Mishra K.V., Artusio-Glimpse A., Pinilla S., Xenaki A., Griffith D.W., Egiazarian K. An Overview of Advances in Signal Processing Techniques for Classical and

Quantum Wideband Synthetic Apertures // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol.17, №2, 2023. P.317-369. DOI:10.1109/JSTSP.2023.3262443.

4. Жила С., Колесников Д. Метод статического синтеза апертуры в задачах дистанционного зондирования и неразрушающего контроля // Авиационно-космическая техника и технология, №3(179), Харьков, 2022. С. 75-83. DOI: 10.32620/akkt.2022.3.08.

5. Борисенко А.В., Горячкин О.В., Долгополов В.Н., Женгуров Б.Г. Радиолокатор с синтезированной апертурой, паразитирующий на сигналах телевизионного вещания // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение, Т13, №2, 2014. С. 16-24. DOI: 10.18287/1998-6629-2014-0-2(44)-16-24

6. Алешкин А.П., Владимиров В.В., Невзоров В.И., Савочкин П.В. Метод повышения разрешающей способности и точности радиолокационных угловых измерений на основе последовательной пространственно-временной обработки принимаемых сигналов // Информационно-управляющие системы. 2020. № 2. С. 37-45. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-2-37-45.

7. Gassot O. SAR imaging of an asteroid's regolith: simulation and data processing // Instrumentation and Methods for Astrophysic. Université Grenoble Alpes, 2020.

8. Великанова Е.П., Гельцер А.А., Эрдынеев Ж.Т., Панокин Н.В. Анализ требований к точностным характеристикам инерциальной системы навигации в радаре с синтезированной апертурой антенны // Гироскопия и навигация. 2016. 24(4), с. 47-58. DOI: 10.17285/0869-7035.2016.24.4.047-058.

9. Ashry M. M., Mashaly A. S., Sheta B. Proposed SAR range focusing algorithm based on simulation analysis and SDR implementation // Arabian Journal of Geosciences 16, 476, 2023. DOI: 10.1007/s12517-023-11569-w.

10. Homemade synthetic aperture radar, 2015. [Электронный ресурс] URL: <https://hforsten.com/homemade-synthetic-aperture-radar.html> (дата обращения: 15.01.2026).

11. Villano M., Ustalli N., Dell'Amore L., Jeon S.-Y., Krieger G., Moreira A., NewSpace SAR: Disruptive Concepts for Cost-Effective Earth Observation Missions //

IEEE Radar Conference, Florence, Italy, 2020, P. 1-5, DOI: 10.1109/RadarConf2043947.2020.9266694.

12. Борисенков А., Горячкин О., Долгополов В., Женгуров Б., Радиолокатор с синтезированной апертурой, паразитирующий на сигналах телевизионного вещания // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета), №2 (44), 2014, С. 16-24.

13. Караев В. Ю., Панфилова М. А., Митник Л. М., Рябкова М. С., Титченко Ю. А., Мешков Е. М., Андреева З. В., Волгутов Р. В., Особенности радиолокационного зондирования ледяного покрова при малых углах падения на примере Охотского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. №7. С. 187–202. DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-7-187-202.

14. Дмитриев А.В., Жарков Д.С., Ярцев И.М., Половинкина А.С. Макет малогабаритной программно-определяемой РЛС с синтезированием апертуры антенны на мультикоптере // Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова. Воронеж: ВГУ, 2019. С. 164-180.

15. Svedin J., Bernland A., Gustafsson A., Claar E., Luong J. Small UAV-based SAR system using low-cost radar, position, and attitude sensors with onboard imaging capability // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. 2021;13(6). P. 602-613. DOI: 10.1017/S1759078721000416.

16. Stecz W., Gromada K. UAV Mission Planning with SAR Application // Sensors. 2020. № 4 (20). P. 1080. DOI: 10.3390/s20041080.

17. Dill S., Schreiber E., Engel M., Heinzl A., Peichl M. A drone carried multichannel Synthetic Aperture Radar for advanced buried object detection // IEEE Radar Conference, Boston, MA, USA, 2019. P. 1-6. DOI: 10.1109/RADAR.2019.8835814.

18. Kim S., Jeon S.-Y., Kim J., Lee U.-M., Shin S., Choi Y., Ka M.-H. Multichannel W-Band SAR System on a Multirotor UAV Platform with Real-Time Data Transmission Capabilities // IEEE Access, vol.8, 9160919, 2020. P. 144413-144431. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3014700.

19. Miccinesi L., Beni A., Bigazzi L., Pieraccini M. Synthetic Aperture Radar Aboard an Unmanned Aerial System for Detecting Foreign Object Debris on Airport Runways // IEEE Access, vol. 12, 2024. P. 106735-106743. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3437653.
20. Rincon R., Fatoyinbo L., Osmanoglu B., Lee S.K. Development of Next Generation Digital Beamforming Synthetic Aperture Radar architectures // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016. P. 2109-2111, DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729544.
21. Задорожный В. Способ построения масштабируемой системы цифрового диаграммообразования для цифровых антенных решеток // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №12. С. 22-28.
22. Younis M., Almeida F. Q. D., Villano M., Huber S., Krieger G., Moreira A. Digital Beamforming for Spaceborne Reflector-Based Synthetic Aperture Radar, Part 2: Ultrawide-swath imaging mode // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, vol. 10, no. 4, 2022. P. 10-31. DOI: 10.1109/MGRS.2022.3200871.
23. Huber S., Younis M., Krieger G., Moreira A., Error Analysis for Digital Beamforming Synthetic Aperture Radars: A Comparison of Phased Array and Array-Fed Reflector Systems // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 59, no. 8, 2021. P. 6314-6322. DOI: 10.1109/TGRS.2020.3029680.
24. Liao M., Dong J., Li M., Ao M., Zhang L., Shi X. Radar Remote Sensing for Potential Landslides Detection and Deformation Monitoring // Natl. Remote Sens. Bull. 2021, 25. P. 332-341. DOI: 10.11834/jrs.20210162.
25. Zhu X.X., Montazeri S., Ali M., Hua Y., Wang Y., Mou L. Deep Learning Meets SAR: Concepts, models, pitfalls, and perspectives // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, № 4 (9), 2021. P. 143-172. DOI: 10.1109/MGRS.2020.3046356.
26. Колесников А. Анализ методов и средств искусственного интеллекта для анализа и интерпретации данных активного дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), № 3 (27), 2022. С. 74-94.
27. Huang Z., Dumitru C.O., Pan Z., Lei B., Datcu M. Classification of Large-Scale High-Resolution SAR Images with Deep Transfer Learning // IEEE Geoscience and

Remote Sensing Letters, vol. 18, no. 1, 2021. P. 107-111. DOI: 10.1109/LGRS.2020.2965558.

28. Zhang T., Zeng T., Zhang X. Synthetic Aperture Radar (SAR) Meets Deep Learning // Remote Sens, 15, P. 303. DOI: 10.3390/rs15020303.

29. Li D., Liu J., Liu F., Zhang W., Zhang A., Gao W. A Dual-Fusion Semantic Segmentation Framework with Gan for SAR Images // IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia, 2022. P. 991-994. DOI: 10.1109/IGARSS46834.2022.9884931.

30. Wang C., Pei J., Liu X., Huang Y., Yang J. A deep deformable residual learning network for SAR image segmentation // IEEE Radar Conference, Atlanta, GA, USA, 2021. P. 1-5. DOI: 10.1109/RadarConf2147009.2021.9455217.

31. Mengyu G., Qiulei D. Heterogeneous Feature Distillation Network for SAR Image Semantic Segmentation // arXiv (Cornell University). 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2210.08988.

32. Wang P., Zheng H., Hu Z., Xu A., Zheng M., Yang L. PCM-SAR: Physics-Driven Contrastive Mutual Learning for SAR Classification // IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Nantes, France, 2025, P. 1-6. DOI: 10.1109/ICME59968.2025.11209959.

33. Доросинский Л., Иванов С. Сравнительный анализ классических методов и методов машинного обучения при решении задач классификации радиолокационных изображений // Ural Radio Engineering Journal. 2022;6(3). С. 310–323. DOI: 10.15826/urej.2022.6.3.005.

34. Antarctic Peninsula by Sentinel-1D, 26.11.2025 esa.int [Электронный ресурс] URL: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2025/11/Antarctic_Peninsula_by_Sentinel-1d (дата обращения: 27.01.2026).

35. Romano D., Mele V., Lapegna M. The Challenge of Onboard SAR Processing: A GPU Opportunity // Computational Science – ICCS 2020. ICCS 2020. Lecture Notes in Computer Science [], vol 12139. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-50420-5_4.

36. García L.P., Furano G., Ghiglione M., Zancan V., Imbembo E., Ilioudis C., Clemente C., Trucco P. Advancements in Onboard Processing of Synthetic Aperture Radar

(SAR) Data: Enhancing Efficiency and Real-Time Capabilities // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 17, 2024. P. 16625-16645. DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3406155.

37. Bernardi M.S., Africa P.C., de Falco C., Formaggia L., Menafoglio A., Vantini S. On the Use of Interferometric Synthetic Aperture Radar Data for Monitoring and Forecasting Natural Hazards // Math Geosci 53, 2021. P. 1781–1812. DOI: 10.1007/s11004-021-09948-8.

38. Cantalloube H. M. J. SAR image post-processing for acquisition trajectory change // EUSAR 2022; 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Leipzig, Germany, 2022. P. 1-6.

39. Oralbekova O., Tyulepberdinova A., Gaziz G., Adamova D., Sholpanbaev B. The use of radar technologies in the hydraulic engineering in seismic zones // Journal of Applied Engineering Science, 19(4), 2021. P.1040 – 1048. DOI:10.5937/jaes0-30937.

40. Yang W., Guo J., Chen J., Liu W., Deng J., Wang Y. A Novel Channel Inconsistency Estimation Method for Azimuth Multichannel SAR Based on Maximum Normalized Image Sharpness // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, 2022. P. 1-16. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3219818.

41. Zhu L., Suomalainen J., Liu J., Hyypä J., Kaartinen H., Haggrén H. A Review: Remote Sensing Sensors. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.71049.

42. Newstadt G. E. Adaptive Sensing Techniques for Dynamic Target Tracking and Detection with Applications to Synthetic Aperture Radars // University of Michigan, 2013.

43. Alaqeel A. Phenomenological Study of Radar Scattering at High Millimeter-Wave Frequencies in Support of Autonomous Vehicles // University of Michigan, 2022.

44. Cruz H., Véstias M., Monteiro J., Neto H., Duarte R.P. A Review of Synthetic-Aperture Radar Image Formation Algorithms and Implementations: A Computational Perspective // Remote Sens. 2022, 14, P. 1258. DOI: 10.3390/rs14051258.

45. Franceschetti G., Guida R., Iodice A., Riccio D., Ruello G. Efficient Simulation of hybrid stripmap/spotlight SAR raw signals from extended scenes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, no. 11, 2004. P.2385-2396. DOI: 10.1109/TGRS.2004.834763.

46. Khwaja S. Fast Raw Data Generation of Realistic Environments for a SAR System Simulator. *Signal and Image processing // Université Rennes 1*, 2008.
47. Boyoğlu C.S., Balz T., Sultanbekova A. Assessing Looting Holes by Using SAR Simulation. *Int. Arch. Photogramm // Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVIII-1-2024*, 2024. P. 31–36. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-31-2024.
48. Chang Y.-L., Chiang C.-Y., Chen K.-S. SAR Image Simulation with Application to Target Recognition // *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 119, 2011. P. 35-57. DOI: 10.2528/PIER11061507.
49. Blackledge J. Perspective Chapter: Simulation and Analysis of Synthetic Aperture Radar Images // *Digital Image Processing - Latest Advances and Applications IntechOpen*, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.1002781.
50. Lee H., Jung C.-S., Kim K.-W. Feature Preserving Autofocus Algorithm for Phase Error Correction of SAR Images // *Sensors* 2021, 21. P. 2370. DOI: 10.3390/s21072370.
51. Chen W., Zhang L., Xing X., Wen X., Zhang Q. Sub-Nyquist SAR Imaging and Error Correction Via an Optimization-Based Algorithm // *Sensors*, 24, 2024. P. 2840. DOI: 10.3390/s24092840.
52. Zhang Z.-Y., Pappas O., Rizaev I.G., Achim A. Sparse Regularization with a Non-Convex Penalty for SAR Imaging and Autofocusing // *Remote Sens.*, 14, 2022. P. 2190. DOI: 10.3390/rs14092190.
53. Slepyan G., Vlasenko S., Mogilevtsev D., Boag A. Quantum Radars and Lidars: Concepts, realizations, and perspectives // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 64, no. 1, 2022. P. 16-26. DOI: 10.1109/MAP.2021.3089994.
54. Waller E.H., Keil A., Friederich F. Quantum range-migration-algorithm for synthetic aperture radar applications // *Sci Rep* 13, 11436 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-38611-x.
55. Karsa A., Fletcher A., Spedalieri G., Pirandola S. Quantum illumination and quantum radar: A brief overview // *Reports on Progress in Physics*, vol. 87, no. 9, 2024. P. 094001. DOI: 10.1088/1361-6633/ad6279.

References

1. Moreira A., Krieger G. Spaceborne synthetic aperture radar (SAR) systems: state of the art and future developments. 33rd European Microwave Conference Proceedings, 2003. P.101-104 Vol.1, DOI: 10.1109/EUMC.2003.1262228.
2. Ustinov A., Sadzhid A., Zalivin A. O primeneniі malogabaritnykh RLS v zadachkh distantsionnogo zondirovaniya Zemli, Sbornik statei, Penza, 2021, pp. 26-29.
3. Vouras P., Mishra K.V., Artusio-Glimpse A., Pinilla S., Xenaki A., Griffith D.W., Egiazarian K. An Overview of Advances in Signal Processing Techniques for Classical and Quantum Wideband Synthetic Apertures. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol.17, №2, 2023. P.317-369. DOI:10.1109/JSTSP.2023.3262443.
4. Zhila S., Kolesnikov D. Aerospace technic and technology, Kharkiv, 2022, no. 3, pp. 75-83. DOI: 10.32620/akkt.2022.3.08.
5. Borisenkov A.V., Goryachkin O.V., Dolgopolov V.N., Zhengurov B.G. SAR which parasitize the TV signals, VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2014, Vol. 13, N. 2. P. 16-24. DOI: 10.18287/1998-6629-2014-0-2(44)-16-24.
6. Aleshkin A., Vladimirov V., Nevzorov V., Savochkin P. Informatsionno-upravlyayushchie sistemy, 2020, no. 3, pp. 37-45. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-2-37-45.
7. Gassot O. SAR imaging of an asteroid's regolith: simulation and data processing. Instrumentation and Methods for Astrophysic. Université Grenoble Alpes, 2020.
8. Velikanova E.P., Gel'tser A.A., Erdyneev Zh.T., Panokin N.V. Analysis of the accuracy requirements for the inertial navigation system in synthetic aperture radars. Giroskopiya i Navigatsiya. 2016, 24(4), p. 47-58. DOI: 10.17285/0869-7035.2016.24.4.047-058.
9. Ashry M. M., Mashaly A. S., Sheta B. Proposed SAR range focusing algorithm based on simulation analysis and SDR implementation. Arabian Journal of Geosciences 16, 476, 2023. DOI: 10.1007/s12517-023-11569-w.
10. Homemade synthetic aperture radar, 2015. [Electronic resource] URL: <https://hforsten.com/homemade-synthetic-aperture-radar.html> (access date: 15.01.2026).

11. Villano M., Ustalli N., Dell'Amore L., Jeon S.-Y., Krieger G., Moreira A., NewSpace SAR: Disruptive Concepts for Cost-Effective Earth Observation Missions. IEEE Radar Conference, Florence, Italy, 2020, P. 1-5, DOI: 10.1109/RadarConf2043947.2020.9266694.
12. Borisenkov A., Goryachkin O., Dolgoplov V., Zhengurov B. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta, 2014, no. 2, pp. 16-24.
13. Karaev V., Panfilova M., Mitnik L., Ryabkova M., Titchenko Y., Meshkov E., Andreeva Z., Volgutov R. Features of radar probing of ice cover at small incidence angles by the example of the Okhotsk Sea. Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosm. 2020, 17, 187–202. DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-7-187-202.
14. Dmitriev A., Zharkov D., Yartsev I., Po;ovinkina A. Sbornik trudov XXV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchenoi 160-letiyu so dnya rozhdeniya A.S. Popova, Voronezh, 2019, pp. 164-180.
15. Svedin J., Bernland A., Gustafsson A., Claar E., Luong J. Small UAV-based SAR system using low-cost radar, position, and attitude sensors with onboard imaging capability. International Journal of Microwave and Wireless Technologies. 2021;13(6). P. 602-613. DOI: 10.1017/S1759078721000416.
16. Stecz W., Gromada K. UAV Mission Planning with SAR Application. Sensors. 2020. № 4 (20). P. 1080. DOI: 10.3390/s20041080.
17. Dill S., Schreiber E., Engel M., Heinzl A., Peichl M. A drone carried multichannel Synthetic Aperture Radar for advanced buried object detection. IEEE Radar Conference, Boston, MA, USA, 2019. P. 1-6. DOI: 10.1109/RADAR.2019.8835814.
18. Kim S., Jeon S.-Y., Kim J., Lee U.-M., Shin S., Choi Y., Ka M.-H. Multichannel W-Band SAR System on a Multirotor UAV Platform with Real-Time Data Transmission Capabilities. IEEE Access, vol.8, 9160919, 2020. P.144413-144431. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3014700.
19. Miccinesi L., Beni A., Bigazzi L., Pieraccini M. Synthetic Aperture Radar Aboard an Unmanned Aerial System for Detecting Foreign Object Debris on Airport Runways. IEEE Access, vol. 12, 2024. P. 106735-106743. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3437653.

20. Rincon R., Fatoyinbo L., Osmanoglu B., Lee S.K. Development of Next Generation Digital Beamforming Synthetic Aperture Radar architectures. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016. P. 2109-2111, DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729544.
21. Zadorozhnyy V. A method to build a scalable digital beamformer for digital antenna arrays. T-Comm, vol. 17, no.12, 20203. P. 22-28.
22. Younis M., Almeida F.Q.D., Villano M., Huber S., Krieger G., Moreira A. Digital Beamforming for Spaceborne Reflector-Based Synthetic Aperture Radar, Part 2: Ultrawide-swath imaging mode. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, vol. 10, no. 4, 2022. P. 10-31. DOI: 10.1109/MGRS.2022.3200871.
23. Huber S., Younis M., Krieger G., Moreira A., Error Analysis for Digital Beamforming Synthetic Aperture Radars: A Comparison of Phased Array and Array-Fed Reflector Systems. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 59, no. 8, 2021. P. 6314-6322. DOI: 10.1109/TGRS.2020.3029680.
24. Liao M., Dong J., Li M., Ao M., Zhang L., Shi X. Radar Remote Sensing for Potential Landslides Detection and Deformation Monitoring. Natl. Remote Sens. Bull. 2021, 25. P. 332–341. DOI: 10.11834/jrs.20210162.
25. Zhu X.X., Montazeri S., Ali M., Hua Y., Wang Y., Mou L. Deep Learning Meets SAR: Concepts, models, pitfalls, and perspectives. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, № 4 (9), 2021. P. 143-172. DOI: 10.1109/MGRS.2020.3046356.
26. Kolesnikov A. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosystem I tekhnologii, vol. 27, no. 3, 2022, pp. 74-94.
27. Huang Z., Dumitru C.O., Pan Z., Lei B., Datcu M. Classification of Large-Scale High-Resolution SAR Images with Deep Transfer Learning. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 18, no. 1, 2021. P. 107-111. DOI: 10.1109/LGRS.2020.2965558.
28. Zhang T., Zeng T., Zhang X. Synthetic Aperture Radar (SAR) Meets Deep Learning. Remote Sens, 15, P. 303. DOI: 10.3390/rs15020303.
29. Li D., Liu J., Liu F., Zhang W., Zhang A., Gao W. A Dual-Fusion Semantic Segmentation Framework with Gan for SAR Images. IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia, 2022. P. 991-994. DOI: 10.1109/IGARSS46834.2022.9884931.

30. Wang C., Pei J., Liu X., Huang Y., Yang J. A deep deformable residual learning network for SAR image segmentation. IEEE Radar Conference, Atlanta, GA, USA, 2021. P. 1-5. DOI: 10.1109/RadarConf2147009.2021.9455217.
31. Mengyu G., Qiulei D. Heterogeneous Feature Distillation Network for SAR Image Semantic Segmentation. arXiv (Cornell University). 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2210.08988.
32. Wang P., Zheng H., Hu Z., Xu A., Zheng M., Yang L. PCM-SAR: Physics-Driven Contrastive Mutual Learning for SAR Classification. IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Nantes, France, 2025, P. 1-6. DOI: 10.1109/ICME59968.2025.11209959.
33. Dorosinskiy L., Ivanov S. Comparative analysis of classical methods and machine learning methods in solving problems of radar image classification. Ural Radio Engineering Journal. 2022;6(3). P. 310–323. DOI: 10.15826/urej.2022.6.3.005.
34. Antarctic Peninsula by Sentinel-1D, 26.11.2025 esa.int [Electronic resource] URL:
https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2025/11/Antarctic_Peninsula_by_Sentinel-1d (date of access: 27.01.2026).
35. Romano D., Mele V., Lapegna M. The Challenge of Onboard SAR Processing: A GPU Opportunity. Computational Science – ICCS 2020. ICCS 2020. Lecture Notes in Computer Science (), vol 12139. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-50420-5_4.
36. García L.P., Furano G., Ghiglione M., Zancan V., Imbembo E., Ilioudis C., Clemente C., Trucco P. Advancements in Onboard Processing of Synthetic Aperture Radar (SAR) Data: Enhancing Efficiency and Real-Time Capabilities. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 17, 2024. P. 16625-16645. DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3406155.
37. Bernardi M.S., Africa P.C., de Falco C., Formaggia L., Menafoglio A., Vantini S. On the Use of Interferometric Synthetic Aperture Radar Data for Monitoring and Forecasting Natural Hazards. Math Geosci 53, 2021. P. 1781–1812. DOI: 10.1007/s11004-021-09948-8.

38. Cantalloube H. M. J. SAR image post-processing for acquisition trajectory change. EUSAR 2022; 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Leipzig, Germany, 2022. P. 1-6.
39. Oralbekova O., Tyulepberdinova A., Gaziz G., Adamova D., Sholpanbaev B. THE USE OF RADAR TECHNOLOGIES IN THE HYDRAULIC ENGINEERING IN SEISMIC ZONES. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(4), 2021. P.1040 – 1048. DOI:10.5937/jaes0-30937.
40. Yang W., Guo J., Chen J., Liu W., Deng J., Wang Y. A Novel Channel Inconsistency Estimation Method for Azimuth Multichannel SAR Based on Maximum Normalized Image Sharpness. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, 2022. P. 1-16. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3219818.
41. Zhu L., Suomalainen J., Liu J., Hyyppä J., Kaartinen H., Haggrén H. A Review: Remote Sensing Sensors. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.71049.
42. Newstadt G. E. Adaptive Sensing Techniques for Dynamic Target Tracking and Detection with Applications to Synthetic Aperture Radars. University of Michigan, 2013.
43. Alaqeel A. Phenomenological Study of Radar Scattering at High Millimeter-Wave Frequencies in Support of Autonomous Vehicles. University of Michigan, 2022.
44. Cruz H., Véstias M., Monteiro J., Neto H., Duarte R.P. A Review of Synthetic-Aperture Radar Image Formation Algorithms and Implementations: A Computational Perspective. *Remote Sens.* 2022, 14, P. 1258. DOI: 10.3390/rs14051258.
45. Franceschetti G., Guida R., Iodice A., Riccio D., Ruello G. Efficient Simulation of hybrid stripmap/spotlight SAR raw signals from extended scenes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 11, 2004. P.2385-2396. DOI: 10.1109/TGRS.2004.834763.
46. Khwaja S. Fast Raw Data Generation of Realistic Environments for a SAR System Simulator. *Signal and Image processing*. Université Rennes 1, 2008.
47. Boyoğlu C.S., Balz T., Sultanbekova A. Assessing Looting Holes by Using SAR Simulation. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-1-2024, 2024. P. 31–36. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-31-2024.

48. Chang Y.-L., Chiang C.-Y., Chen K.-S. SAR Image Simulation with Application to Target Recognition. Progress in Electromagnetics Research, Vol. 119, 2011. P. 35-57. DOI: 10.2528/PIER11061507.
49. Blackledge J. Perspective Chapter: Simulation and Analysis of Synthetic Aperture Radar Images. Digital Image Processing. Latest Advances and Applications IntechOpen, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.1002781.
50. Lee H., Jung C.-S., Kim K.-W. Feature Preserving Autofocus Algorithm for Phase Error Correction of SAR Images. Sensors 2021, 21. P. 2370. DOI: 10.3390/s21072370.
51. Chen W., Zhang L., Xing X., Wen X., Zhang Q. Sub-Nyquist SAR Imaging and Error Correction Via an Optimization-Based Algorithm. Sensors, 24, 2024. P. 2840. DOI: 10.3390/s24092840.
52. Zhang Z.-Y., Pappas O., Rizaev I.G., Achim A. Sparse Regularization with a Non-Convex Penalty for SAR Imaging and Autofocusing. Remote Sens., 14, 2022. P. 2190. DOI: 10.3390/rs14092190.
53. Slepian G., Vlasenko S., Mogilevtsev D., Boag A. Quantum Radars and Lidars: Concepts, realizations, and perspectives. IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 64, no. 1, 2022. P. 16-26. DOI: 10.1109/MAP.2021.3089994.
54. Waller E.H., Keil A., Friederich F. Quantum range-migration-algorithm for synthetic aperture radar applications. Sci Rep 13, 11436 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-38611-x.
55. Karsa A., Fletcher A., Spedalieri G., Pirandola S. Quantum illumination and quantum radar: A brief overview. Reports on Progress in Physics, vol. 87, no. 9, 2024. P. 094001. DOI: 10.1088/1361-6633/ad6279.

Информация об авторах

Георгий Юрьевич Степанов, аспирант кафедры №23 конструирования и технологий электронных и лазерных средств, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического

приборостроения» (ГУАП), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация;
e-mail: georgy.nettov@yandex.ru

Вадим Александрович Ненашев, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры №23 конструирования и технологий электронных и лазерных средств (ГУАП), заведующий лабораторией машинного обучения Инженерной школы ГУАП, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: nenashev.va@yandex.ru

Information about the authors

Georgii Y. Stepanov, post-graduate student, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russian Federation;
e-mail: georgy.nettov@yandex.ru

Vadim A. Nenashev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department No. 23 of Design and Technology of Electronic and Laser Devices (SUAI), Head of the Machine Learning Laboratory of the SUAI School of Engineering, St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: nenashev.va@yandex.ru

Получено 10 февраля 2026 ● Принято к публикации 10 апреля 2026 ● Опубликовано 30 апреля 2026
Received 10 February 2026 ● Accepted 10 April 2026 ● Published 30 April 2026
