

Хижин Владислав Игоревич, студент 4 курса направления «Радиотехника»,
Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Леонов Николай Владимирович, студент 4 курса направления
«Радиотехника», Национальный исследовательский университет «МЭИ», г.
Москва

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ

Аннотация

Статья посвящена сравнительному анализу методов картографирования местности. Рассматриваются классические подходы (оптическая съёмка, лидар, обычная радиолокация) и современные методы на основе радиоизображений (активные и пассивные). Выявлены преимущества радиометодов в условиях облачности, тумана и ночной темноты. Описана физическая основа радиоизображений, включая спекл-шум и его математическую модель. Проанализированы адаптированные для радиоизображений методы технического зрения: фильтрация, детекторы границ, сегментация и нейросетевые подходы. Представлены результаты современных исследований 2024–2026 гг. в области сверхвысокого разрешения, генеративных моделей и слияния данных.

Annotation

The article is devoted to a comparative analysis of terrain mapping methods. Classical approaches (optical imaging, lidar, conventional radar) and modern radioimage-based methods (active and passive) are reviewed. Advantages of radio methods under cloudy, foggy and night conditions are identified. The physical basis of radio images, including speckle noise and its mathematical model, is described. Computer vision methods

adapted for radio images — filtering, edge detection, segmentation and neural network approaches — are analyzed. The results of recent studies from 2024–2026 in super-resolution, generative models and data fusion are presented.

Ключевые слова: радиоизображения, картографирование, спекл-шум, синтезированная апертура, техническое зрение, нейронные сети, слияние данных.

Keywords: radio images, mapping, speckle noise, synthetic aperture, computer vision, neural networks, data fusion.

Введение

Карты местности необходимы строителям, военным, геологам и спасателям. Обычно их создают по спутниковым или аэрофотоснимкам. Однако оптика не видит сквозь облака, туман, густой лес или ночную темноту. В этих условиях на помощь приходят радиоволны, которые проходят сквозь большинство препятствий. Ещё более перспективен пассивный приём сигналов Wi-Fi, телевышек или спутников Starlink, позволяющий получать карты вообще без собственного передатчика.

Цель статьи — провести сравнительный анализ методов картографирования, выявить преимущества радиоизображений и определить задачи для

последующих публикаций. В статье рассматриваются классические методы, физическая основа радиоизображений, адаптированные методы технического зрения и современные исследования 2024–2026 гг.

1.1. Классические методы картографирования

1.1.1. Оптическая съёмка

Оптическая съёмка — самый распространённый метод. Спутники Sentinel-2, Landsat или дроны делают снимки местности, которые затем склеиваются в карту. Плюсы: низкая стоимость оборудования, привычное для интерпретации изображение, высокое разрешение (до 0,3 м на пиксель). Минусы: полная зависимость от погоды и освещения, невозможность видеть сквозь препятствия. Облака делают снимок бесполезным.

1.1.2. Лазерное сканирование (лидар)

Лидар измеряет время возвращения лазерных импульсов и строит трёхмерное облако точек. Плюсы: высокая точность по высоте (ошибка 5–20 см), работа в темноте, частичное проникновение сквозь листву. Минусы: высокая стоимость оборудования, плохая работа в дождь и туман, невозможность видеть сквозь грунт или крыши.

1.1.3. Обычная радиолокация

Обычный радар посылает импульс и принимает эхо. Плюсы: всепогодность, работа в темноте. Минусы: очень низкое разрешение (десятки метров), сильные шумы, непригодность для детального картографирования. Ключевое ограничение связано с физикой: чтобы получить со спутника разрешение 10 м при длине волны 5 см, потребовалась бы антенна длиной 4250 м — более 47 футбольных полей [1]. Именно поэтому используют синтезированную апертуру.

1.2. Физическая основа радиоизображений

1.2.1. Что такое радиоизображение

Радиоизображение — это распределение интенсивности радиосигнала, отражённого или излученного участками местности. Яркость точки зависит не от цвета, а от радиофизических свойств: влажности, шероховатости, наличия металла. Математически:

$$I(x, y) = \sigma^0(x, y) \cdot P(x, y) + n(x, y)$$

где $\sigma^0(x, y)$ — удельная эффективная поверхность рассеяния (УЭПР). Присутствует мультипликативный спекл-шум, подчиняющийся распределению Рэлея.

1.2.2. Активное и пассивное радиоизображение

Активный метод (радар с синтезированной апертурой — РСА) даёт полный контроль над сигналом и высокое разрешение, но требует мощного передатчика и дорогого оборудования. Пассивный метод принимает сигналы внешних источников (телевышки, Starlink, 5G), обеспечивая скрытность и низкое энергопотребление. Минусы пассивного метода — низкое разрешение и зависимость от наличия источников.

1.2.3. Ключевые параметры радиосигнала

Длина волны: чем длиннее, тем глубже проникновение, но хуже разрешение. Поляризация (HH, HV, VV) помогает различать типы поверхности. Полоса частот определяет разрешение по дальности. Для разрешения 1 м нужна полоса 150 МГц.

1.2.4. Спекл-шум и его модель

Спекл-шум возникает из-за интерференции сигналов от множества мелких отражателей в одном пикселе. Амплитуда распределена по Рэлею, интенсивность — экспоненциально. В отличие от аддитивного шума в оптике, спекл умножается на сигнал, поэтому изображения логарифмируют.

1.3. Методы обработки радиоизображений с помощью технического зрения

1.3.1. Главная проблема — спекл-шум

Обычные фильтры (медианный, гауссиан) размывают границы объектов на радиоизображениях. Нужны адаптивные методы, учитывающие мультипликативную природу шума.

1.3.2. Фильтрация спекл-шума

Фильтр Ли — один из первых и самых известных. Он вычисляет локальные среднее и дисперсию: в однородных областях сильно усредняет, на границах почти не трогает центральный пиксель. Более современный метод — SRAD (Speckle Reducing Anisotropic Diffusion) — использует направленную диффузию, сохраняя мелкие детали. BM3D для SAR применяет логарифмирование, затем стандартный BM3D, затем экспоненцирование — даёт высокое качество, но медленно.

1.3.3. Детекторы границ

ROA (Ratio of Averages) вместо разности средних использует их отношение, что устойчивее к мультипликативному шуму. Детектор на основе коэффициента вариации ($CV = \text{std}/\text{mean}$) позволяет выделять участки с разными типами растительности.

1.3.4. Сегментация и классификация

Вода даёт низкое отражение (чёрная), город — высокое (яркие пятна), лес — средне-высокое с текстурной рябью. Используют пороговую сегментацию, K-средних и нейросетевые методы.

1.3.5. Нейросетевые методы

U-Net — классика для сегментации радиоизображений (наводнения, пожары, застройка). Mask R-CNN выделяет контуры отдельных объектов (здания, корабли). pix2pix и диффузионные модели переводят радиоизображения в оптический вид (инверсия). Ограничение: для обучения нужны размеченные пары.

1.3.6. Слияние данных (fusion)

SAR + оптика: радио даёт всепогодность, оптика — разрешение и цвет. SAR + лидар: лидар даёт точную высоту. Методы слияния бывают на уровне пикселей, признаков или решений.

1.4. Обзор современных исследований (2024–2026)

1.4.1. Сверхвысокое разрешение

Обзор 2026 года показывает, что нейросети обеспечивают трёхмерную PCA-визуализацию с беспрецедентным качеством [2]. В работе SARMAE создан первый миллионный датасет PCA-снимков и самообучаемый кодировщик, показавший лучшее качество на задачах сегментации и классификации на конференции CVPR 2026 [3].

1.4.2. Сегментация и картографирование

Обзор 2025 года демонстрирует эволюцию от примитивной классификации пикселей до современных U-Net, выдающих готовые карты местности [4]. Работа SAR2HEIGHT (2026) восстанавливает высоту рельефа по единственному PCA-снимку с ошибкой на 12–31% ниже за счёт комбинации физической модели и U-Net с вниманием [5].

1.4.3. Генеративные и физико-информированные модели

Обзор 2025 года прослеживает эволюцию от GAN до диффузионных моделей и трансформеров для перевода SAR → оптический с почти фотографическим качеством [6]. Физико-информированные нейросети, объединяющие глубокое обучение с уравнениями распространения волн, названы главным трендом в обработке снимков дистанционного зондирования [7].

1.4.4. Пассивное радио и 5G

В 2025 году предложен метод пассивного картографирования каналов по Wi-Fi, строящий карту помещения точнее триангуляции [8]. Сигналы 5G с широкой полосой исследуются как для активного, так и для пассивного радарного зондирования [9].

1.4.5. Слияние данных

Сеть SMAF-Net переводит РСА-снимок в псевдооптический вид и совмещает с ошибкой всего 2,26 пикселя [10]. Сеть MRLF с механизмами внимания берёт от радио структурную информацию, от оптики — спектральную [11]. Для удаления облаков нейросети используют радиоизображения как подсказку, достигая PSNR = 31 дБ и SSIM = 0,92 [12].

Таблица 1. Сравнительный анализ методов картографирования

| Метод | Разрешение | Точность по высоте | Всепогодность | Проникновение | Стоимость | Основное применение |
|-------------------|-------------------|--------------------|---------------|---------------|--------------|--|
| Оптическая съёмка | 0,3–1 м | средняя (1–5 м) | низкая | нет | низкая | сельское хозяйство, градостроительство |
| Лидар | 0,1–0,5 м | высокая (5–20 см) | средняя | частично | высокая | точные ЦМР, лесное хозяйство |
| Обычный радар | десятки м | не измеряет | высокая | слабое | низкая | обнаружение крупных объектов |
| РСА (активное) | 1–10 м (до 0,3 м) | средняя (1–10 м) | высокая | частично | высокая | картографирование в любую погоду |
| Пассивное радио | метры–десятки м | низкая | высокая | нет | очень низкая | городское картографирование, скрытное зондирование |

Заключение

В статье проведён сравнительный анализ методов картографирования. Основные выводы:

1. Оптические методы дают высокое разрешение, но бесполезны при облаках, тумане или ночью.
2. Лидар обеспечивает лучшую точность по высоте, но дорог и плохо работает в дождь и туман.

3. Обычная радиолокация всепогодна, но её разрешение слишком низкое для детального картографирования.
4. Радиоизображения (активные и пассивные) обладают уникальной способностью проникать сквозь облака, туман, листву и даже грунт, что делает их незаменимыми в сложных условиях.
5. Главная проблема радиоизображений — мультипликативный спекл-шум, требующий адаптированных методов обработки (фильтры Ли, SRAD, детекторы ROA).
6. Современные нейросетевые подходы (U-Net, трансформеры, диффузионные модели, физико-информированные сети) успешно решают задачи повышения разрешения, сегментации, восстановления рельефа и перевода в оптический вид.
7. Сравнение методов показывает, что радиоподходы выигрывают в сложных условиях, но проигрывают в качестве картинки. В следующих публикациях планируется улучшить это качество с помощью алгоритмов технического зрения.

Литература

1. NASA Earthdata. Synthetic Aperture Radar (SAR). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/earth-observation-data-basics/sar> (дата обращения: 14.04.2026).
2. Zhang H., Wang Y., Li J. et al. Three-dimensional SAR imaging with super-resolution: a review of deep learning approaches // Journal of Radars. 2026. Vol. 15, No. 2. DOI: 10.12000/JR25163.
3. Chen L., Zhao M., Liu S. et al. SARMAE: a million-scale SAR dataset and masked autoencoder for self-supervised representation learning // arXiv preprint. 2025. arXiv:2512.16635v2.

4. Moreira A., Bamler R., Liao M. Semantic segmentation of SAR images: from pixelwise classifiers to deep convolutional networks // Remote Sensing Handbook. Elsevier, 2025. Ch. 15. P. 345–372.
5. Zhu X., Montazeri S., Gernhardt S. SAR2HEIGHT: single-image height reconstruction by combining physics-based layover removal and attention-enhanced U-Net // EGU General Assembly 2026. Vienna, 2026. Abstract EGU26-8644.
6. Kumar A., Singh P., Raj A. Evolution of generative models for SAR-to-optical image translation: from GANs to diffusion transformers // TechRxiv preprint. 2025. DOI: 10.36227/techrxiv.176287415.57044116/v1.
7. Kashyap R., Boufounos P. Physics-informed neural networks for inverse scattering in SAR // HAL open science. 2025. hal-05414824.
8. Zhou C., Wu Y., Wang Q. Passive channel charting with Wi-Fi: a dimensionality reduction approach // IEEE Transactions on Mobile Computing. 2025. Vol. 24, No. 11. P. 4321–4335.
9. Chen X. Opportunities and challenges of 5G-based radar sensing: active and passive modes. Wireless Communications Blog. 2025. URL: <https://wirelesscom.blog.csdn.net/article/details/149473376> (дата обращения: 14.04.2026).
10. Li W., Sun H., Zhang L. SMAF-Net: a spatial-adaptive fusion network for SAR-optical image registration // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2025. Vol. 128. Article 103874.
11. Zhang Y., Liu J., Wang H. MRLF: multimodal representation learning with attention for SAR-optical fusion // DOAJ (Remote Sensing). 2026. Vol. 18, No. 4. Article 5cf9c56758394d1ba53ca8cdd092639e.
12. Wang T., Li X., Chen Y. Cloud removal from optical imagery using SAR guidance: a diffusion-based approach // arXiv preprint. 2025. arXiv:2506.17885.

Literature

1. NASA Earthdata. Synthetic Aperture Radar (SAR). [Electronic resource]. URL: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/earth-observation-data-basics/sar> (accessed: 14.04.2026).
2. Zhang H., Wang Y., Li J. et al. Three-dimensional SAR imaging with super-resolution: a review of deep learning approaches // Journal of Radars. 2026. Vol. 15, No. 2. DOI: 10.12000/JR25163.
3. Chen L., Zhao M., Liu S. et al. SARMAE: a million-scale SAR dataset and masked autoencoder for self-supervised representation learning // arXiv preprint. 2025. arXiv:2512.16635v2.
4. Moreira A., Bamler R., Liao M. Semantic segmentation of SAR images: from pixelwise classifiers to deep convolutional networks // Remote Sensing Handbook. Elsevier, 2025. Ch. 15. P. 345–372.
5. Zhu X., Montazeri S., Gernhardt S. SAR2HEIGHT: single-image height reconstruction by combining physics-based layover removal and attention-enhanced U-Net // EGU General Assembly 2026. Vienna, 2026. Abstract EGU26-8644.
6. Kumar A., Singh P., Raj A. Evolution of generative models for SAR-to-optical image translation: from GANs to diffusion transformers // TechRxiv preprint. 2025. DOI: 10.36227/techrxiv.176287415.57044116/v1.
7. Kashyap R., Boufounos P. Physics-informed neural networks for inverse scattering in SAR // HAL open science. 2025. hal-05414824.
8. Zhou C., Wu Y., Wang Q. Passive channel charting with Wi-Fi: a dimensionality reduction approach // IEEE Transactions on Mobile Computing. 2025. Vol. 24, No. 11. P. 4321–4335.
9. Chen X. Opportunities and challenges of 5G-based radar sensing: active and passive modes. Wireless Communications Blog. 2025.

URL: <https://wirelesscom.blog.csdn.net/article/details/149473376> (accessed: 14.04.2026).

10. Li W., Sun H., Zhang L. SMAF-Net: a spatial-adaptive fusion network for SAR-optical image registration // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2025. Vol. 128. Article 103874.
11. Zhang Y., Liu J., Wang H. MRLF: multimodal representation learning with attention for SAR-optical fusion // DOAJ (Remote Sensing). 2026. Vol. 18, No. 4. Article 5cf9c56758394d1ba53ca8cdd092639e.
12. Wang T., Li X., Chen Y. Cloud removal from optical imagery using SAR guidance: a diffusion-based approach // arXiv preprint. 2025. arXiv:2506.17885.