

Сравнительный анализ когерентности радиолокационных данных С-диапазона спутников Fucheng-1 и Sentinel-1A на основе стандартной интерферометрии и корреляции субизображений

Д. У¹, М. В. Зимин^{1,2}, П. Г. Илюшина¹, А. А. Медведев^{2,3}

¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия
E-mail: ziminmv@mail.ru*

² *Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия
E-mail: map@igras.ru*

³ *Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Ереван, 0025, Армения
E-mail: andrey.medvedev@cens.am*

Выполнен сравнительный анализ когерентности радиолокационных данных С-диапазона спутников Fucheng-1 и Sentinel-1A с использованием двух подходов: метода оценки стандартной интерферометрической когерентности и метода идентификации когерентных рассеивателей на основе корреляционных свойств субизображений, включающего в себя метод однократных субизображений и метод временной когерентности субизображений. Исследование проведено для территории Тульской области, содержащей городскую застройку, сельскохозяйственные угодья, карьеры, лесные массивы и заболоченные участки. В качестве исходных данных использованы серии изображений Sentinel-1A и Fucheng-1, полученные в апреле – мае 2024 г., а также цифровая модель рельефа ALOS (*англ.* Advanced Land Observing Satellite) World 3D. Сравнение выполнялось с учётом геометрии съёмки, интерферометрической базы, метеорологических условий и характера подстилающей поверхности. Показано, что данные Fucheng-1 за счёт более высокого пространственного разрешения и меньших значений интерферометрической базы позволяют выделять более плотную сеть высококогерентных точек, особенно на устойчивых объектах городской среды, в карьерах и на элементах сельскохозяйственной инфраструктуры. Для данных Sentinel-1A распределение таких точек более разрежено, но сохраняет сходную пространственную структуру. Полученные результаты подтверждают значительный прикладной потенциал данных нового радиолокационного спутника высокого пространственного разрешения Fucheng-1.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, когерентность, Sentinel-1A, Fucheng-1, С-диапазон, субизображения, устойчивые рассеиватели, дифференциальная интерферометрия, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 11.06.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-103-118

Введение

Спутниковая радиолокационная интерферометрия InSAR (*англ.* Interferometric Synthetic Aperture Radar) — один из наиболее эффективных методов дистанционного зондирования Земли для изучения деформаций земной поверхности, мониторинга инфраструктуры и анализа динамики природных процессов. Она используется для широкого круга тематических задач (Ho Tong Minh et al., 2020). Метод основан на анализе фазовой информации радиолокационного сигнала, полученного при многократной съёмке одной и той же территории синтезированной апертурой радиолокационной системы (Bamler, Hartl, 1998; Ferretti et al., 2007). Одним из ключевых параметров, определяющих качество интерферометрических измерений, является когерентность, характеризующая степень корреляции комплексных значений отражённого радиолокационного сигнала между двумя изображениями (Денисов и др., 2018).

Высокие значения когерентности свидетельствуют о стабильности рассеяния радиолокационного сигнала и позволяют выполнять достоверный анализ деформаций поверхности.

Напротив, низкая когерентность приводит к увеличению шума и снижению точности интерферометрических измерений (Сосновский и др., 2019).

Традиционно, когерентность определяется на основе интерферометрической обработки пары радиолокационных изображений, полученных в разные моменты времени. Такой подход широко применяется в методах дифференциальной интерферометрии DInSAR (*англ.* Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar) и считается стандартным инструментом при обработке радиолокационных изображений (Ferretti et al., 2007; Rosen et al., 2000). Однако когерентность, рассчитываемая данным методом, может быть чувствительна к временным изменениям рассеивающих свойств поверхности и различиям интерферометрической базы при выполнении космической съёмки (Ding et al., 2008).

В последние годы активно развиваются альтернативные подходы к выделению устойчивых рассеивателей радиолокационного сигнала. Один из таких методов — выделение когерентных рассеивателей на основе корреляционных свойств субизображений радиолокационных данных (*англ.* Identification of coherent scatters based on sub-look synthetic aperture radar image correlation properties), сформированных из спектра одного комплексного радиолокационного изображения. Данный метод позволяет выделять когерентные рассеиватели даже при ограниченном количестве исходных изображений (Iglesias et al., 2015; Sanjuan-Ferrer et al., 2015).

Цель настоящего исследования заключается в анализе когерентности сигнала Fucheng-1 и Sentinel-1A для типичного района средней полосы России, а также в оценке возможностей и применимости данных двух спутников для выделения когерентных рассеивателей при разных типах подстилающей поверхности.

В исследовании были использованы два метода, различающиеся по своим техническим характеристикам:

- оценка стандартной интерферометрической когерентности;
- идентификация когерентных рассеивателей на основе корреляционных свойств субизображений радиолокационных данных.

Район исследования — территория Тульской области близ города Венёв, посёлка Метростроевский и соседних населённых пунктов (*рис. 1*). Городская и сельская застройка характеризуется высокой плотностью и относительной стабильностью поверхности. Такие элементы застройки и инфраструктуры, как крыши зданий и дорожное покрытие, обладают высокой отражательной способностью в радиолокационном диапазоне, обеспечивая высокую когерентность сигналов. В связи с этим урбанизированные территории представляют собой перспективную область для сравнительного анализа радиолокационных данных в задачах оценки значений когерентности радиолокационного сигнала (Wang et al., 2024).

На территории исследования присутствуют обширные сельскохозяйственные земли, включающие пашни, луга и ирригационные системы. Основная особенность сельскохозяйственных угодий состоит в их высокой сезонной изменчивости, обусловленной факторами роста культур, осадков и орошения. Из-за динамики растительного покрова когерентность сигналов может существенно колебаться, что создаёт вызовы для стабильности временных рядов радиолокационных данных и интерферометрической обработки. Таким образом, сельскохозяйственные территории представляются ключевым полигоном для оценки способности спутников сохранять когерентность в динамично изменяющихся условиях поверхности.

Исторически восток Тульской области характеризовался активным недропользованием с расположением множества карьеров, горных выработок, терриконов, а также транспортной инфраструктурой. Интенсивная добыча полезных ископаемых приводит к значительным изменениям поверхности в короткие временные промежутки, что влияет на когерентность сигналов. Данный тип поверхности позволяет оценить интерферометрическую стабильность спутников в условиях активных геодинамических процессов, а также их применимость для мониторинга техногенных деформаций, включая проседание грунта и обрушения на горнодобывающих участках.

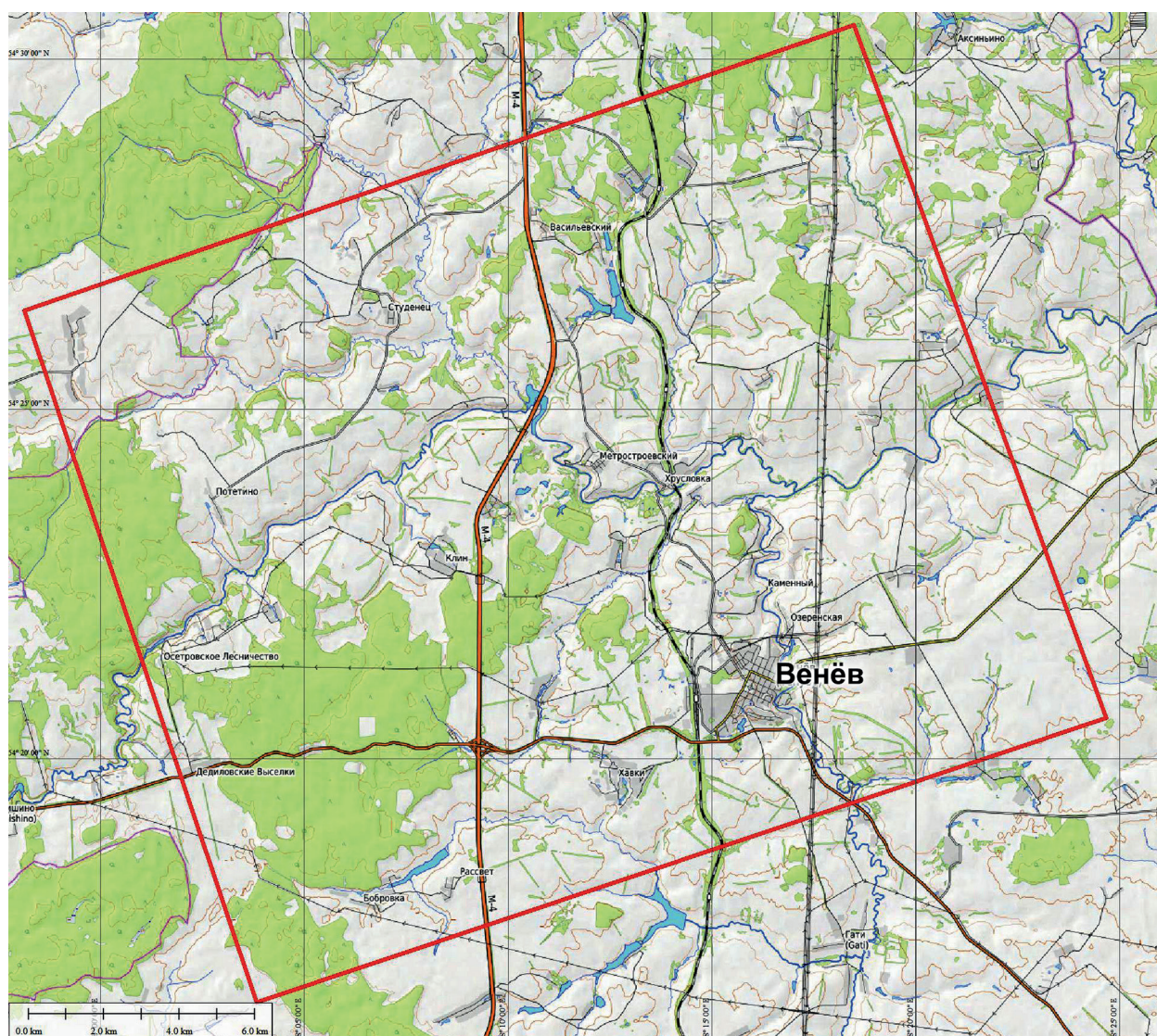


Рис. 1. Район исследования. Красным полигоном показана территория, на которую есть покрытие снимками Sentinel-1A и Fucheng-1

Часть исследуемого района покрыта лесами и заболоченными речными поймами. Лесные массивы, вследствие наличия древесного полога, характеризуются низкой когерентностью, а водоёмы и заболоченные территории, из-за высокой интенсивности рассеяния сигналов, могут вносить значительные помехи в интерферометрические измерения. Эти факторы следует учитывать как возможные источники ошибок и шумов при обработке данных.

Материалы и методы

Космический аппарат Fucheng-1 — первый малый радиолокационный спутник массой 300 кг в С-диапазоне спутниковой группировки «Мяньян» (англ. Mianyang Constellation), который был запущен 7 июня 2023 г. Спутник обладает интерферометрическими возможностями и способен обеспечивать мониторинг оседаний поверхности с миллиметровой точностью (https://space.skyrocket.de/doc_sdat/fucheng-1.htm). Полученные результаты продемонстрировали высокую пространственную согласованность с архивными данными Sentinel-1A, однако средние коэффициенты когерентности у китайского спутника оказались заметно выше при аналогичной временной базе. Радиолокационные данные со спутника уже применяются

для решения различных задач мониторинга деформации поверхности, фиксации локальных оползней, включая вызванных добычей полезных ископаемых (Feng et al., 2024; Ge et al., 2026; Tang et al., 2026). Показатели когерентности и точности определения параметров орбиты Fucheng-1 продемонстрировали отличные результаты в условиях сложного рельефа (Han et al., 2025).

Спутники серии Sentinel-1, благодаря широкому покрытию, универсальности применения и открытому доступу к данным, считаются одними из наиболее востребованных источников информации для радиолокационных исследований. По этой причине в исследовании данные Sentinel-1A выбраны для сравнительного анализа с данными Fucheng-1. Спутник Sentinel-1A обладает высокой точностью орбитальных параметров, с отклонением не более 5 см, благодаря использованию вспомогательных орбитальных данных (<https://sentinels.copernicus.eu/copernicus/sentinel-1>). В свою очередь, Fucheng-1, на котором установлены приёмники GPS (*англ.* Global Positioning System) и BDS (*англ.* BeiDou Navigation Satellite System), обеспечивает орбитальную точность на уровне 5–8 см. Спутник Fucheng-1 снимает с периодичностью 11 дней, что позволяет выполнять широкомасштабный мониторинг одной и той же территории с высокой частотой съёмки. Полоса захвата его изображений составляет 25 км, а пространственное разрешение — $1,25 \times 1,67$ м. Космический аппарат Sentinel-1A снимает с периодичностью 12 дней и выступает важным источником данных для интерферометрического анализа (*табл. 1*). Для повышения точности анализа в качестве дополнительной информации была использована цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 30 м, полученная спутником ALOS (*англ.* Advanced Land Observing Satellite), ALOS World 3D (Bettiol et al., 2021; Caglar et al., 2018).

Таблица 1. Характеристики радиолокаторов Sentinel-1A, Fucheng-1

Характеристика	Sentinel-1A	Fucheng-1
Масса спутника	2280 кг (средний спутник)	300 кг (мини-спутник)
Диапазон частот	C	C
Даты съёмки	22 апреля, 4 мая, 16 мая, 28 мая 2024 г.	16 апреля, 27 апреля, 19 мая, 30 мая 2024 г.
Режим съёмки	TOPS	Stripmap
Поляризация	VV	VV
Размер пикселя по азимуту	13,94 м	1,67 м
Размер пикселя по дальности	9,32 м	1,25 м
Полоса захвата	250 км	25 км
Пространственная база	49~230 м	8~30 м
Период повторного визита	12 дней	11 дней
Точность орбиты	Лучше 5 см	5–8 см
Направление орбиты	Восходящее	Нисходящее
Количество снимков	4	4

Примечание: V (*англ.* Vertical) — вертикальная поляризация.

Для исследования выбраны четыре изображения Fucheng-1 и четыре изображения Sentinel-1A, все они были получены в одном временном диапазоне — с 16 апреля по 30 мая 2024 г. Данные получены в весенний период, когда местность довольно сильно меняется — в конце апреля влагосодержание почвы высокое после периода снеготаяния, в конце мая оно снижается, при этом активно развивается растительный покров (*рис. 2*). Именно такие изменчивые условия позволяют в полной мере оценить влияние параметров окружающей среды на интерферометрическую когерентность.



Рис. 2. Фрагменты космических снимков на район исследования (посёлок Метростроевский): снимок Sentinel-2 в натуральной цветопередаче от 15.04.2024 (слева) и снимок PlanetScope SuperDove в натуральной цветопередаче от 28.05.2024 (справа)

Согласно данным с метеостанции Елькино (ближайшей к району исследования) в течение апреля – мая 2024 г. не наблюдалось перехода температуры через 0°C . При этом условия увлажнённости территории в течение месяца сильно менялись (табл. 2). В середине и конце апреля отмечается, что поверхность почвы влажная. В середине мая увлажнённость сохраняется, а в конце мая почва сухая. Анализ этой таблицы показывает, что условия в момент выполнения съёмки двумя радиолокаторами в близкие даты были схожими, и состояние местности не должно оказывать существенного влияния на сравнительный анализ двух наборов данных.

Таблица 2. Даты радиолокационной съёмки и характеристика метеоусловий

Fucheng-1		Sentinel-1A	
Дата съёмки	Характеристика метеоусловий	Дата съёмки	Характеристика метеоусловий
16.04.2024	Положительная температура ($10\text{--}12^{\circ}\text{C}$), без осадков в день съёмки и накануне, поверхность почвы влажная	22.04.2024	Положительная температура ($10\text{--}15^{\circ}\text{C}$), без осадков в день съёмки и накануне, поверхность почвы сырая (вода застаивается на поверхности)
19.05.2024	Положительная температура ($15\text{--}18^{\circ}\text{C}$), без осадков в день съёмки и накануне, поверхность почвы влажная	16.05.2024	Положительная температура ($15\text{--}18^{\circ}\text{C}$), без осадков в день съёмки и накануне, поверхность почвы влажная
30.05.2024	Высокая положительная температура ($24\text{--}27^{\circ}\text{C}$), без осадков в день съёмки и накануне, сухая почва	28.05.2024	Высокая положительная температура ($20\text{--}25^{\circ}\text{C}$), без осадков в день съёмки и накануне, сухая почва

Расчёт когерентности выполнялся двумя методами. Первый метод включал формирование интерферограмм и расчёт интерферометрической когерентности в программном обеспечении SARscape на основе InSAR-обработки. Второй метод заключался в идентификации когерентных рассеивателей на основе корреляционных свойств субизображений (англ. Identification of coherent scatters based on sub-look SAR image correlation properties) в программной среде Matlab. Расчёт когерентности выполняется по формуле (Akiki et al., 2024):

$$\gamma = \frac{|E[u_1 u_2^*]|}{\sqrt{E[|u_1|^2] E[|u_2|^2]}},$$

где u_1 и u_2 — отражённый сигнал первого и второго снимков; u_2^* — комплексно-сопряжённое значение u_2 ; $E[\cdot]$ — оператор математического ожидания; значение γ лежит между 0 и 1.

Следует отметить, что метод субизображений принципиально отличается от классического метода постоянных рассеивателей PS (*англ.* Persistent Scatterer). Метод PS в основном опирается на длинные временные ряды изображений (десятки снимков) и оценивает, являются ли амплитуда и фаза цели стабильными во времени. Метод субизображений (*англ.* sublooks), напротив, разделяет спектр одного и того же радиолокационного изображения на несколько субизображений, что эквивалентно наблюдению одной и той же цели под немного различающимися углами наблюдения или в разных диапазонах спектра, с целью определения согласованности её рассеивающих характеристик (Sanjuan-Ferrer et al., 2015). Данный подход позволяет работать с ограниченным числом изображений, что особенно важно при анализе данных новых радиолокаторов, таких как на космическом аппарате Fucheng-1.

Метод основан на разбиении исходного комплексного радиолокационного изображения SLC (*англ.* Single Look Complex Image) на несколько субизображений, соответствующих различным углам наблюдения (*рис. 3*). Для каждого пикселя рассчитывается коэффициент взаимной корреляции между субизображениями (Sanjuan-Ferrer et al., 2015). Устойчивые (когерентные) рассеиватели демонстрируют высокую взаимную корреляцию, тогда как распределённые или шумовые рассеиватели характеризуются низкими значениями корреляции.

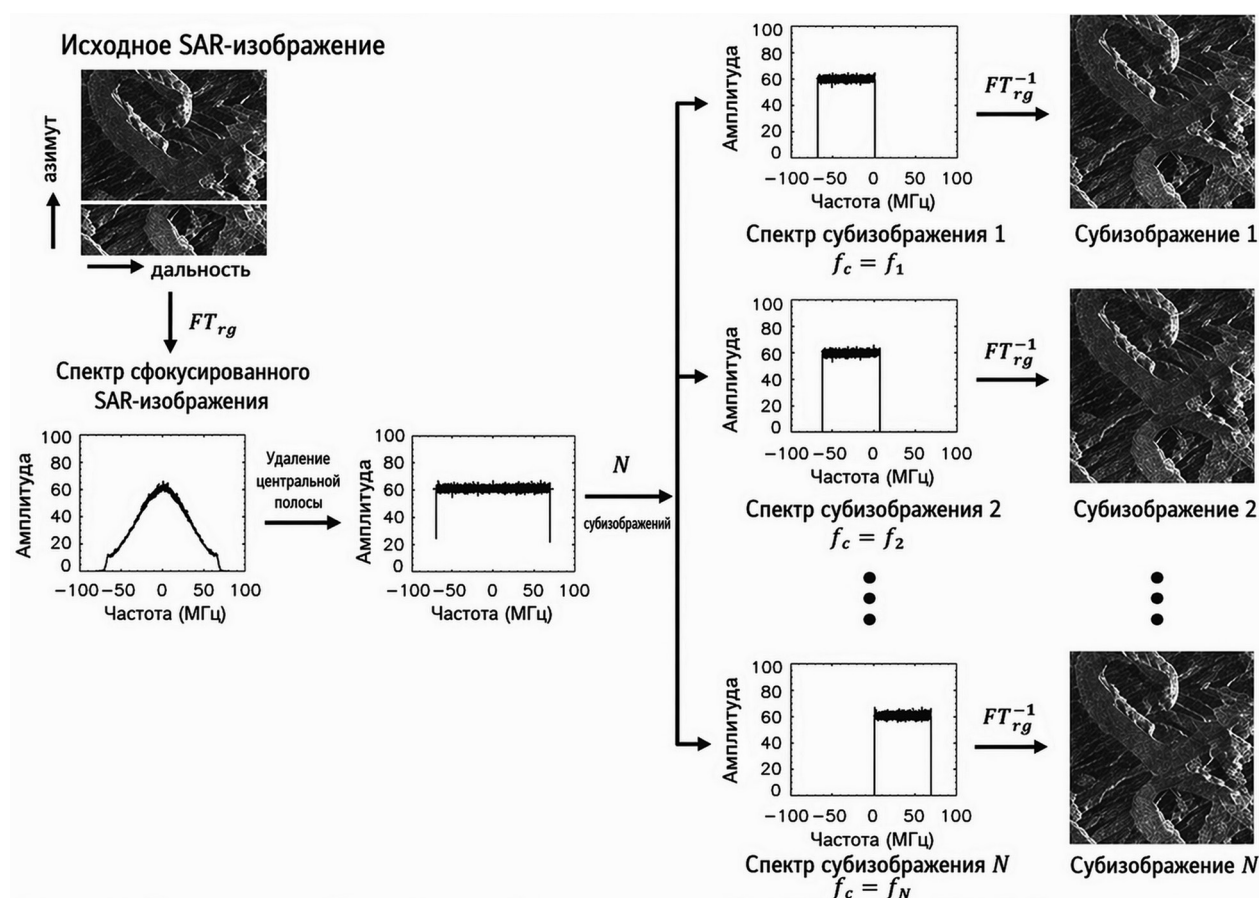


Рис. 3. Общий принцип выделения субизображений по работе (Sanjuan-Ferrer et al., 2015)

В настоящем исследовании исходное SLC-изображение сначала преобразовывалось вдоль азимутального направления с использованием быстрого преобразования Фурье для получения азимутального спектра. Затем полный спектр в области азимутальных частот делился на два субспектра равной ширины. Для обеспечения единой частотной базы двух субизображений оба субспектра модулировались к одной и той же центральной частоте. После этого к каждому субспектру применялась оконная функция Хэмминга, а затем выполнялось обратное быстрое преобразование Фурье, в результате чего формировались два субизображения. Далее рассчитывалась когерентность между ними. Шумовая фильтрация при расчёте когерентности не выполнялась, чтобы избежать изменения исходных когерентных характеристик. Поскольку исследование не направлено на оценку деформаций, коррекция атмосферной задержки также не проводилась. Данные Fucheng-1 и Sentinel-1A обрабатывались по единой схеме, что обеспечивало согласованность оценки характеристик данных двух спутников. Процедура пространственной привязки данных выполнялась в программном обеспечении SARscape. В ходе этого процесса целевые объекты были переведены из радарной геометрии наклонной дальности в географическую систему координат WGS84. Данная геометрическая коррекция реализована на основе обратной модели преобразования Рейндж – Доплера (*англ.* Range–Doppler) с использованием цифровой модели рельефа ALOS World 3D для точной компенсации искажений, вызванных рельефом.

Результаты

Сравнение геометрии съёмки на основе метаданных

Для сравнения интерферометрических возможностей двух спутников в одном и том же регионе анализировалось значение интерферометрической базы. На *рис. 4* представлено распределение их пространственной базы. Диапазон пространственной базы для изображений Fucheng-1 составляет от 30 до 90 м, в то время как у Sentinel-1A этот диапазон от 10 до 150 м, причём у некоторых интерферометрических пар вертикальная база превышает 100 м. Из представленных данных видно, что интерферометрическая база у Fucheng-1 в целом меньше, чем у Sentinel-1A. Это, в свою очередь, снижает вероятность уменьшения когерентности из-за геометрических факторов, обеспечивая более надёжные интерферометрические измерения.

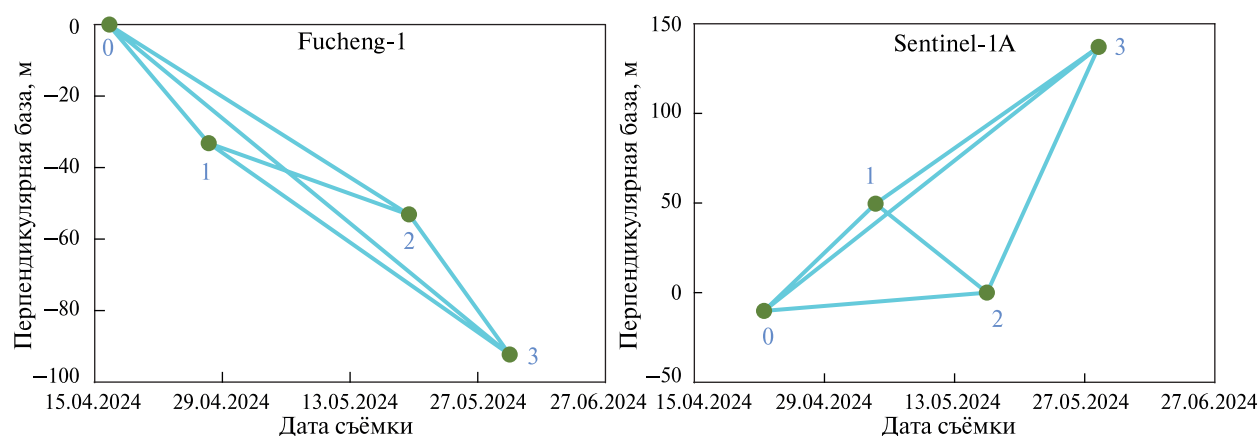


Рис. 4. Перпендикулярная база Fucheng-1 и Sentinel-1A

Сравнение результатов расчёта когерентности

На *рис. 5* и *6* представлено распределение когерентности, рассчитанной в результате обработки интерферометрических пар Sentinel-1A и Fucheng-1 методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии. Согласно полученным результатам, по данным Fucheng-1

30 % территории исследования характеризуются значениями когерентности выше 0,6, из них 7 % площади приходится на районы с когерентностью выше 0,8 для пары изображений 16.04–19.05.2024. Для результатов, полученных по данным Sentinel-1A на схожий период (22.04 и 16.05.2024), доля (в %) площади ниже: для участков со значениями когерентности, превышающими 0,6, составляет 9 %, а со значениями выше 0,8 — 7 %. Анализ распределения когерентности показывает, что при обработке методом дифференциальной двухпроходной интерферометрии данные Fucheng-1 позволяют получить более устойчивый сигнал, таким образом предоставляя возможность оценки смещений поверхности большей по площади территории относительно данных Sentinel-1A.

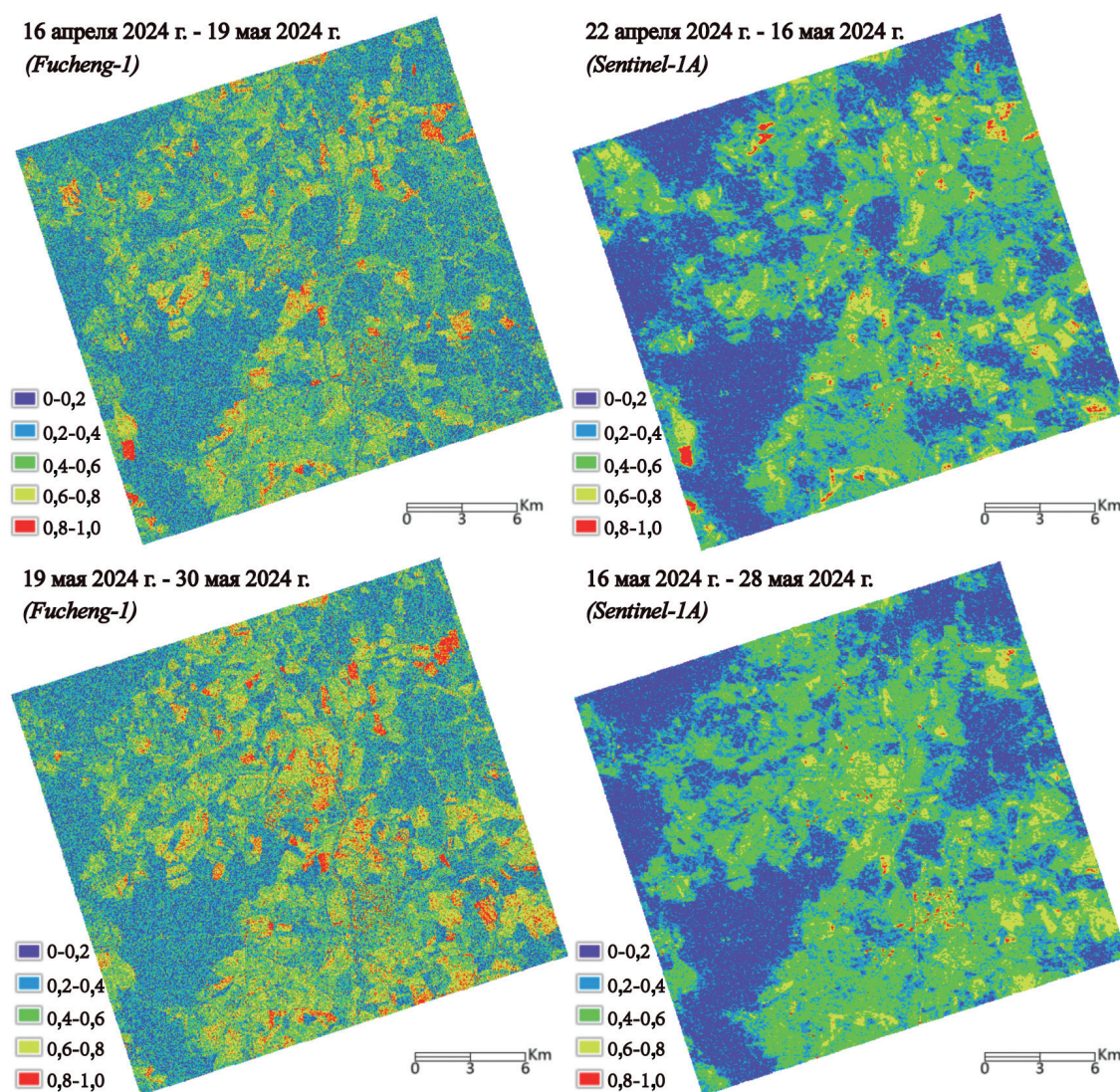


Рис. 5. Распределение когерентности для различных временных интервалов

Расчёт когерентности по второму методу — идентификации когерентных рассеивателей на основе корреляционных свойств субизображений — показал, что выделенные высококогерентные точки существенно различаются для данных Fucheng-1 и Sentinel-1A. Полученные точки напрямую отражают стабильность интерферометрических возможностей спутниковых данных в разных условиях наблюдения. На распределение и количество высококогерентных точек влияют такие факторы, как разрешение датчика, точность орбиты, временная база, длина волны и геометрия съёмки. По выделенным высококогерентным точкам в одном и том же регионе, полученным из данных различных спутников, можно оценить пригодность

и надёжность радиолокаторов для анализа интерферометрических радиолокационных измерений. Для предварительного исследования стабильности рассеяния разных типов земной поверхности в условиях однократного наблюдения в работе сначала применялся метод одиночных субизображений для выделения кандидатов в высококогерентные точки. Поскольку значения когерентности одиночных субизображений находятся в диапазоне 0–1, в качестве эмпирического промежуточного порога было выбрано значение 0,5, чтобы снизить помехи от слабокоррелированных точек при визуализации их пространственного распределения. Данный порог использовался исключительно для демонстрации пространственных особенностей высококогерентных точек при однократном наблюдении. Для дальнейшего повышения стабильности идентификации высококогерентных точек последующий количественный анализ выполнялся на основе метода временной когерентности субизображений TSC (*англ.* Temporal Sublook Coherence) (Iglesias et al., 2015).

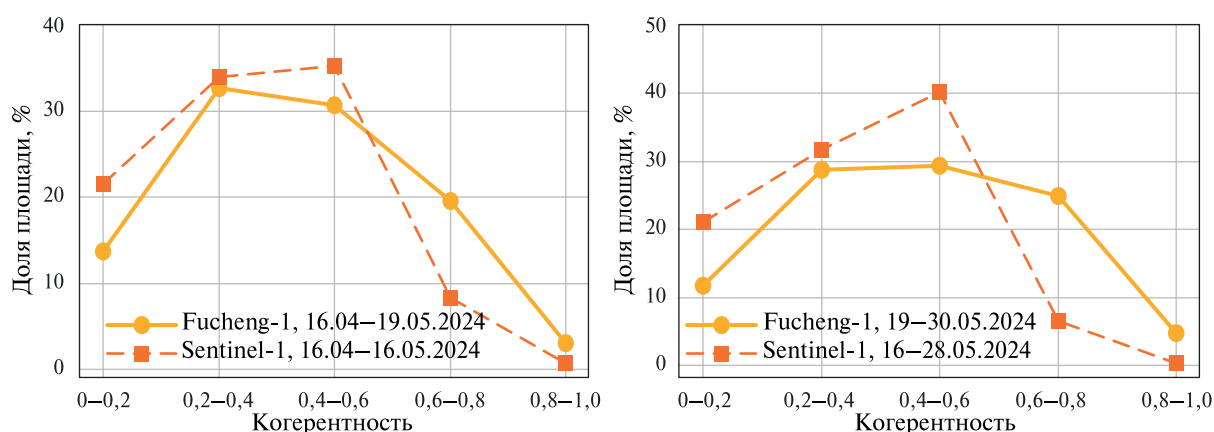


Рис. 6. Статистика когерентности двух групп интерферометрических пар

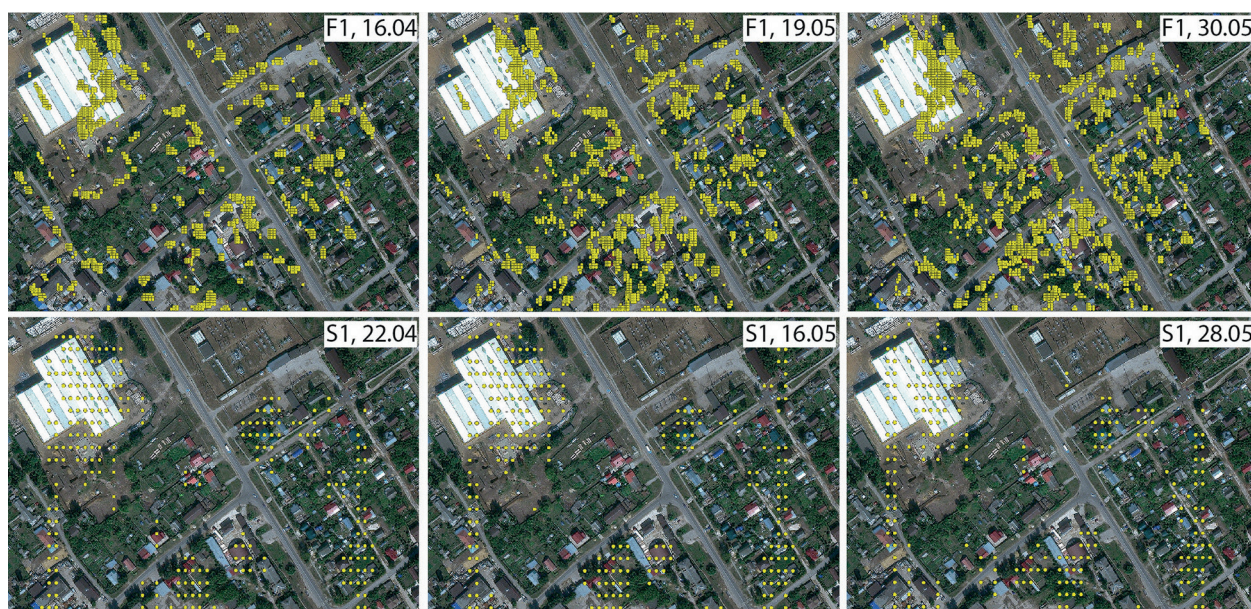


Рис. 7. Высококогерентные целевые точки, определённые на основе значений когерентности субизображений (в городских и сельских районах). F1 — Fucheng-1, S1 — Sentinel-1A (и далее на рис. 8–10)

В городских и сельских районах (рис. 7) данные Fucheng-1 демонстрируют высокую когерентность в субизображениях — распределение высококогерентных точек более плотное, особенно на крышах зданий и других устойчивых конструкциях. По данным Sentinel-1A

высококогерентных точек выделяется меньше, при этом они также соответствуют более крупным по площади объектам. В целом можно отметить, что общая картина распределения точек по данным Fucheng-1 и Sentinel-1A совпадает — высококогерентные точки отсутствуют на участках, покрытых древесной растительностью, а также там, где наблюдается смена типа поверхности.

При анализе состояния карьера (рис. 8) данные Fucheng-1 в целом демонстрируют высокую когерентность, особенно на стабильных поверхностях внутри горнодобывающего участка (например, дороги, рабочие зоны карьера), где высококогерентные точки распределены более плотно. Данные Sentinel-1A показывают значительно более разреженное распределение высококогерентных точек, особенно внутри карьера. Лишь в отдельных зонах (возможно, на обнажённых скальных породах или стабильных конструкциях) наблюдается относительно высокая когерентность, однако её пространственное распределение фрагментировано.

На сельскохозяйственных полях (рис. 9) быстрые изменения их поверхности (такие как рост сельскохозяйственных культур, вспашка, орошение) приводят к значительным колебаниям когерентности в данных обоих спутников. Данные Fucheng-1 позволяют выделить более плотные высококогерентные точки. Это обеспечивает преимущество при мониторинге рельефа сельскохозяйственных земель и анализе аграрной инфраструктуры (например, дренажных систем, межполосных валов). Данные Sentinel-1A в определённые моменты позволяют выделять достаточное количество высококогерентных точек в отдельных сельскохозяйственных районах.

Чтобы учесть возможное влияние случайного шума на когерентность одиночных субизображений, в настоящем исследовании дополнительно привлекался метод временной когерентности субизображений TSC (Iglesias et al., 2015). В частности, для каждого SLC-изображения формировались два субизображения, после чего во временной области рассчитывался нормированный комплексный коэффициент корреляции между двумя последовательностями субизображений, что позволяло получить усреднённую по времени карту TSC. По сравнению с методом одиночных субизображений, метод TSC использует мультитременные данные для более стабильной идентификации высококогерентных точек с характеристиками устойчивого рассеяния. Согласно исследованию, порог $TSC = 0,82$ позволяет строго отбирать пиксели с высокой временной стабильностью и спектральной корреляцией (Iglesias et al., 2015). Поэтому в качестве базового порога для визуализации результатов метода TSC было принято значение $TSC \geq 0,82$ (см. рис. 10 и табл. 3). Кроме того, для анализа чувствительности были дополнительно установлены значения 0,70; 0,75; 0,80 и 0,85 с целью проверки влияния выбора порога на плотность точек для различных типов земной поверхности (табл. 3).

Для дальнейшей оценки надёжности кандидатов в высококогерентные точки, выделенных методом TSC, введён индекс дисперсии амплитуды для идентификации потенциальных ложноположительных точек; при этом меньшее значение индекса указывает на более высокую стабильность амплитуды и фазы целевой точки. Значение индекса дисперсии амплитуды менее 0,25 часто используется в качестве критерия отбора высококачественных пикселей (Ferretti et al., 2001), поэтому в настоящем исследовании также был принят этот порог. Статистические результаты показывают, что доля потенциальных ложноположительных точек для данных Fucheng-1 в городских и сельских районах, в районе карьера и в области сельскохозяйственных угодий составила 1,2; 3,2 и 14,6 % соответственно, что ниже аналогичных показателей для Sentinel-1A — 9,5; 12,8 и 16,7 %. Это свидетельствует о том, что при базовом пороге $TSC \geq 0,82$ спутник Fucheng-1 не только обеспечивает более высокую плотность точек, но и демонстрирует относительно лучшую надёжность данных.

Результаты анализа чувствительности к пороговым значениям показывают, что при повышении порога TSC с 0,70 до 0,85 плотность высококогерентных точек для данных Fucheng-1 и Sentinel-1A на всех трёх типах поверхности демонстрирует тенденцию к снижению; это свидетельствует о том, что более высокий порог предъявляет более строгие требования к стабильности точек.

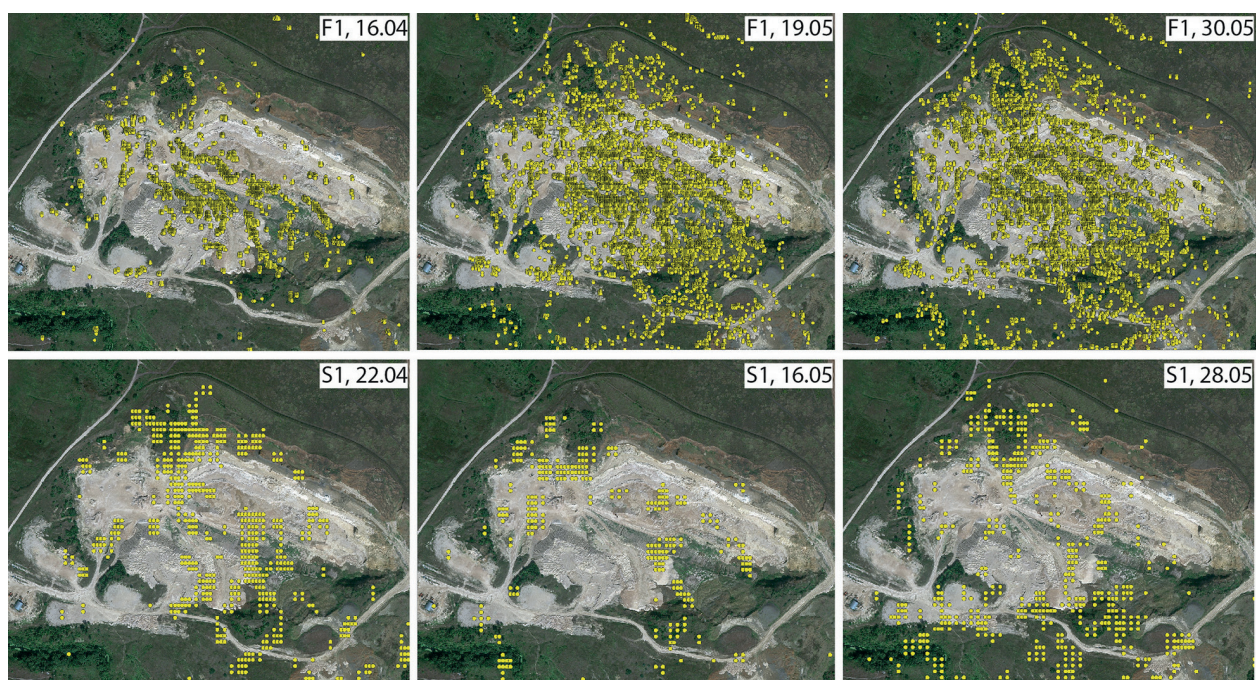


Рис. 8. Высококогерентные целевые точки, определённые на основе значений когерентности субизображений (в районе карьера)

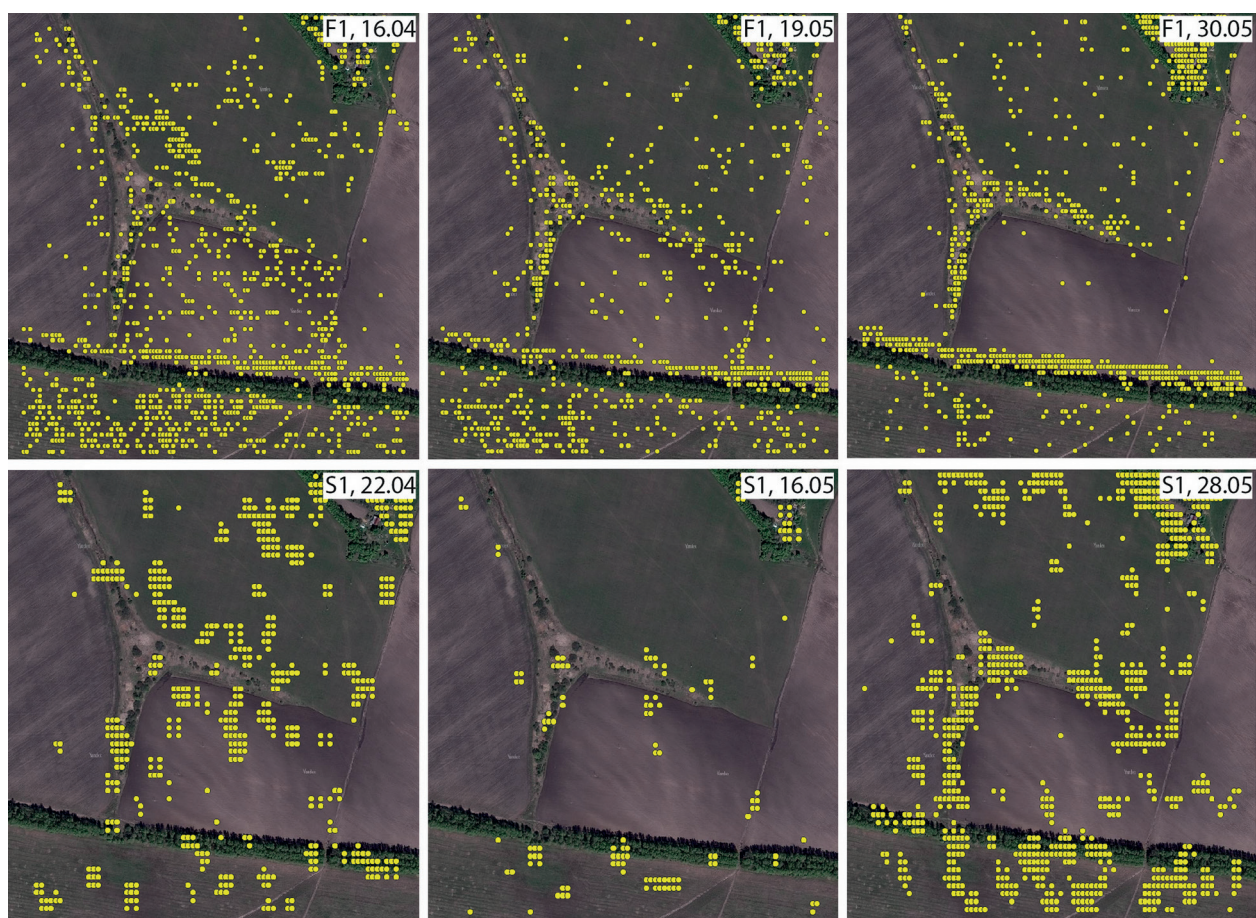


Рис. 9. Высококогерентные целевые точки, определённые на основе значений когерентности субизображений (сельскохозяйственные угодья)

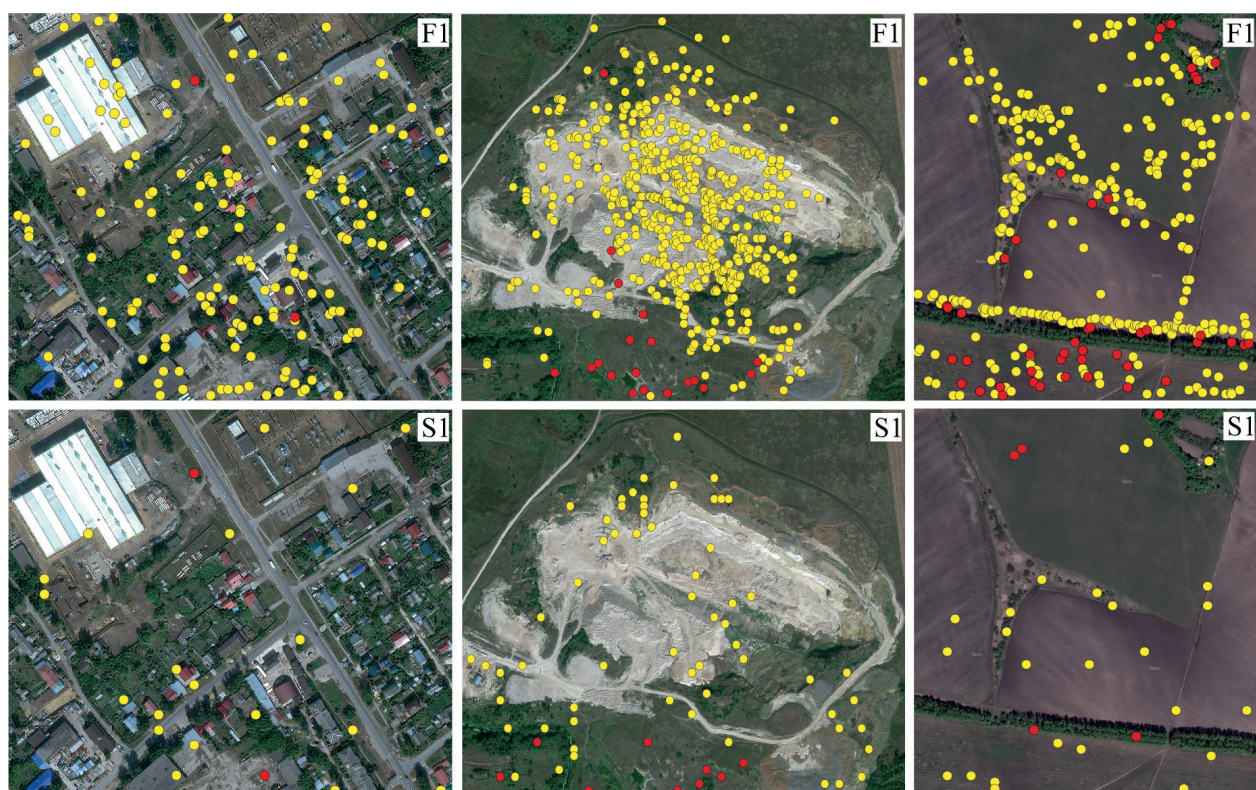


Рис. 10. Высококогерентные целевые точки, определённые методом TSC (красным цветом выделены потенциальные ложноположительные точки)

Таблица 3. Плотность высококогерентных точек для различных типов земной поверхности при разных порогах метода TSC

Тип земной поверхности	Порог когерентности	Плотность точек Fucheng-1	Плотность точек Sentinel-1A
Городские и сельские районы	0,70	3392,92	305,97
	0,75	2203,01	210,78
	0,80	1244,30	135,99
	0,82	1101,51	129,25
	0,85	1026,71	122,45
Карьеры	0,70	2206,41	224,36
	0,75	1474,36	155,13
	0,80	846,15	102,56
	0,82	726,92	78,20
	0,85	669,23	61,55
Сельскохозяйственные угодья	0,70	1250,00	194,64
	0,75	1046,42	125,00
	0,80	614,28	91,07
	0,82	483,90	50,00
	0,85	292,86	41,07

Тем не менее при любых пороговых условиях плотность точек Fucheng-1 значительно выше, чем у Sentinel-1A, и это относительное преимущество остаётся устойчивым для всех типов земной поверхности. Например, при TSC = 0,82 плотность точек Fucheng-1 в городских и сельских районах, в области карьера и сельскохозяйственных угодий составила

1101,51; 726,92 и 483,90 точек на километр квадратный соответственно, что примерно в 8,52; 9,30 и 9,68 раза выше показателей Sentinel-1A. Даже при более строгом условии $TSC = 0,85$ плотность точек Fucheng-1 превышает показатели Sentinel-1A примерно в 8,39; 10,87 и 7,13 раза соответственно. Данный результат указывает на то, что хотя абсолютная плотность точек снижается с увеличением порога, вывод о способности данных Fucheng-1 обеспечивать более высокую плотность высококогерентных точек по сравнению с Sentinel-1A не зависит от выбора конкретного порога и обладает хорошей стабильностью.

Заключение

В работе на основе двух методов оценки когерентности проведено сравнение данных С-диапазона спутников Fucheng-1 и Sentinel-1A. Исследование показывает, что метод корреляционного анализа субизображений позволяет более эффективно выделять устойчивые рассеиватели при ограниченном количестве исходных изображений. В то же время традиционный подход, основанный на интерферометрической обработке, остаётся надёжным инструментом для оценки качества данных. Анализ различных типов подстилающей поверхности показал, что наибольшие значения когерентности наблюдаются для городской застройки и на территории карьеров, тогда как сельскохозяйственные угодья характеризуются значительными временными изменениями рассеяния.

Исследование подтвердило, что данные, получаемые со спутника Fucheng-1, могут эффективно дополнять существующие спутниковые миссии для регионального мониторинга деформаций земной поверхности с высоким разрешением. Данные с Fucheng-1 обладают рядом преимуществ перед Sentinel-1A, так как имеют более высокое пространственное разрешение, позволяя лучше различать детали деформаций, включая максимально обнаруживаемый градиент деформации и лучшую когерентность изображений, а также более короткие вертикальные базовые линии, которые улучшают качество интерферометрических данных. Полученные результаты продемонстрировали высокую пространственную согласованность с данными Sentinel-1A, однако средние коэффициенты когерентности у китайского спутника оказались заметно выше при аналогичной временной базе. Полученные результаты подтверждают значительный прикладной потенциал данных нового радиолокационного спутника высокого пространственного разрешения Fucheng-1.

Исследование выполнено в рамках госзадания Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова «Цифровые технологии и методы картографии, геоинформатики и дистанционного зондирования в географических исследованиях» и в рамках госзадания Института географии РАН «Разработка методов геоинформационного анализа, картографирования и дистанционного мониторинга компонентов природной среды и антропогенных объектов (FMWS-2024-0009)». Данные и программное обеспечение предоставлены Центром коллективного пользования «Геопортал МГУ».

Литература

1. Денисов П. В., Захаров А. И., Мартыанов А. С., Трошко К. А. Исследование интерферометрической когерентности в зависимости от интервала между радарными съёмками на примере данных Х-диапазона // Современ. проблемы дистанц. зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: материалы 2-й Всероссийской науч. конф. по проблемам радиофизики и дистанц. зондирования сред, проводимой в рамках 8-х Всероссийских Армандовских чтений: сб. ст. Муром, 2018. С. 246–251.
2. Сосновский А. В., Коберниченко В. Г., Виноградова Н. С. Проблема оценки качества методов расчета карт когерентности при интерферометрической обработке радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли // Сб. тр. ИТНТ-2019. Самара: Новая техника, 2019. Т. 2. С. 514–521.
3. Akiki R., Anger J., de Franchis C. et al. A brief evaluation of InSAR phase denoising and coherence estimation with Phi-Net // Image Processing On Line. 2024. V. 14. P. 205–216. DOI: 10.5201/ipol.2024.549.

4. *Bamler R., Hartl P.* Synthetic aperture radar interferometry // *Inverse Problems*. 1998. V. 14. No. 4. P. R1–R54. DOI: 10.1088/0266-5611/14/4/001.
5. *Bettiol G. M., Ferreira M. E., Motta L. P. et al.* Conformity of the NASADEM_HGT and ALOS AW3D30 DEM with the altitude from the Brazilian geodetic reference stations: A case study from Brazilian Cerrado // *Sensors*. 2021. V. 21. No. 9. Article 2935. DOI: 10.3390/s21092935.
6. *Caglar B., Becek K., Mekik C., Ozendi M.* On the vertical accuracy of the ALOS world 3D-30m digital elevation model // *Remote Sensing Letters*. 2018. V. 9. No. 6. P. 607–615. DOI: 10.1080/2150704X.2018.1453174.
7. *Ding X., Li Z., Zhu J. et al.* Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation // *Sensors*. 2008. V. 8. No. 9. P. 5426–5448. DOI: 10.3390/s8095426.
8. *Feng S., Dai K., Sun T. et al.* Mini-satellite Fucheng 1 SAR: Interferometry to monitor mining-induced subsidence and comparative analysis with Sentinel-1 // *Remote Sensing*. 2024. V. 16. No. 18. Article 3457. DOI: 10.3390/rs16183457.
9. *Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2001. V. 39. No. 1. P. 8–20. DOI: 10.1109/36.898661.
10. *Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F., Massonnet D.* InSAR principles: Guidelines for SAR interferometry processing and interpretation. Noordwijk: European Space Agency, 2007. 250 p.
11. *Ge Z., Wang Y., Wu W. et al.* Preliminary application of Chinese high-resolution small SAR satellites in large-scale monitoring of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project // *Advances in Space Research*. 2026. V. 77. No. 3. P. 3119–3140. DOI: 10.1016/j.asr.2025.11.055.
12. *Han Y., Dai K., Deng J. et al.* Fucheng-1 high-resolution Chinese interferometric SAR: First DInSAR result for landslides monitoring // *Measurement*. 2025. V. 247. Article 116876. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.116876.
13. *Ho Tong Minh D., Hanssen R., Rocca F.* Radar interferometry: 20 years of development in time series techniques and future perspectives // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 9. Article 1364. DOI: 10.3390/rs12091364.
14. *Iglesias R., Mallorqui J. J., Monells D. et al.* PSI deformation map retrieval by means of temporal sublook coherence on reduced sets of SAR images // *Remote Sensing*. 2015. V. 7. No. 1. P. 530–563. DOI: 10.3390/rs70100530.
15. *Rosen P. A., Hensley S., Joughin I. R. et al.* Synthetic aperture radar interferometry // *Proc. IEEE*. 2000. V. 88. No. 3. P. 333–382. DOI: 10.1109/5.838084.
16. *Sanjuan-Ferrer M. J., Hajnsek I., Papathanassiou K. P. et al.* A new detection algorithm for coherent scatterers in SAR data // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53. No. 11. P. 6293–6307. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2438173.
17. *Tang G., Dai K., Yang F. et al.* Time series analysis of Fucheng-1 interferometric SAR for potential landslide monitoring and synergistic evaluation with Sentinel-1 and ALOS-2 // *Remote Sensing*. 2026. V. 18. No. 2. Article 304. DOI: 10.3390/rs18020304.
18. *Wang S., Chen Z., Zhang G. et al.* Overview and analysis of ground subsidence along China's urban subway network based on synthetic aperture radar interferometry // *Remote Sensing*. 2024. V. 16. No. 9. Article 1548. DOI: 10.3390/rs16091548.

Comparative analysis of coherence of C-band radar data of Fucheng-1 and Sentinel-1A based on standard interferometry and sub-look image correlation

D. Wu¹, M. V. Zimin^{1,2}, P. G. Ilyushina¹, A. A. Medvedev^{2,3}

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
E-mail: ziminmv@mail.ru

² Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia
E-mail: a.a.medvedeff@gmail.com

³ Center for Ecological-Noosphere Studies NAS RA, Yerevan 0025, Armenia
E-mail: andrey.medvedev@cens.am

In this work, a comparative analysis of the coherence of C-band radar data from the Fucheng-1 and Sentinel-1A satellites was performed using two approaches: the standard interferometric coherence estimation method and the method of identifying coherent scatterers based on the correlation properties of sub-look SAR images, which includes the single sub-look method and the temporal sub-look coherence method. The study was carried out for an area in Tula Region, Russia, that includes urban development, agricultural land, quarries, forested areas and wetland floodplains. The analysis is based on Sentinel-1 and Fucheng-1 image series acquired in April and May 2024, together with an ALOS (Advanced Land Observing Satellite) World 3D digital elevation model. The comparison takes into account acquisition geometry, perpendicular baseline, meteorological conditions and land-cover variability. The results show that Fucheng-1 data, owing to higher spatial resolution and generally smaller interferometric baselines, make it possible to identify a denser network of highly coherent points, especially on stable urban objects, quarry surfaces and elements of agricultural infrastructure. Sentinel-1 data provides a sparser distribution of such points, while preserving a similar spatial pattern. The obtained results confirm the significant application potential of data from the Fucheng-1 new high spatial resolution radar satellite.

Keywords: radar interferometry, coherence, Sentinel-1A, Fucheng-1, C-band, sub-look synthetic aperture radar image, coherent scatterers, differential interferometry, remote sensing

Accepted: 11.06.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-103-118

References

1. Denisov P. V., Zakharov A. I., Martyanov A. S., Troshko K. A., Study of interferometric coherence depending on the interval between radar acquisitions using X-band data as an example, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya, radiolokatsii, rasprostraneniya i difraktsii voln: materialy 2-i Vserossiyskoi nauchnoi konferentsii po problemam radiofiziki i distantsionnogo zondirovaniya sred, provodimoi v ramkah 8-kh Vserossiiskikh Armandovskikh chtenii: sbornik statei* (Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction: Proc. 2nd All-Russian Scientific Conf. on Problems of Radiophysics and Remote Sensing of Environments, held within the framework of the 8th All-Russian Armandov Readings: collection of articles), Murom, 2018, pp. 246–251 (in Russian).
2. Sosnovskiy A. V., Kobernichenko V. G., Vinogradova N. S., The problem of assessing the quality of coherence map calculation methods in interferometric processing of Earth remote sensing radar data, *Sbornik trudov ITNT-2019* (Collection of works ITNT-2019), Samara: Novaya tekhnika, 2019, V. 2, pp. 514–521 (in Russian).
3. Akiki R., Anger J., de Franchis C. et al., A brief evaluation of InSAR phase denoising and coherence estimation with Phi-Net, *Image Processing On Line*, 2024, V. 14, pp. 205–216, DOI: 10.5201/ipol.2024.549.
4. Bamler R., Hartl P., Synthetic aperture radar interferometry, *Inverse Problems*, 1998, V. 14, No. 4, pp. R1–R54, DOI: 10.1088/0266-5611/14/4/001.
5. Bettiol G. M., Ferreira M. E., Motta L. P. et al., Conformity of the NASADEM_HGT and ALOS AW3D30 DEM with the altitude from the Brazilian geodetic reference stations: A case study from Brazilian Cerrado, *Sensors*, 2021, V. 21, No. 9, Article 2935, DOI: 10.3390/s21092935.

6. Caglar B., Becek K., Mekik C., Ozendi M., On the vertical accuracy of the ALOS world 3D-30m digital elevation model, *Remote Sensing Letters*, 2018, V. 9, No. 6, pp. 607–615, DOI: 10.1080/2150704X.2018.1453174.
7. Ding X., Li Z., Zhu J. et al., Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation, *Sensors*, 2008, V. 8, No. 9, pp. 5426–5448, DOI: 10.3390/s8095426.
8. Feng S., Dai K., Sun T. et al., Mini-satellite Fucheng 1 SAR: Interferometry to monitor mining-induced subsidence and comparative analysis with Sentinel-1, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, No. 18, Article 3457, DOI: 10.3390/rs16183457.
9. Ferretti A., Prati C., Rocca F., Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, V. 39, No. 1, pp. 8–20, DOI: 10.1109/36.898661.
10. Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F., Massonnet D., *InSAR principles: Guidelines for SAR interferometry processing and interpretation*, Noordwijk: European Space Agency, 2007, 250 p.
11. Ge Z., Wang Y., Wu W. et al., Preliminary application of Chinese high-resolution small SAR satellites in large-scale monitoring of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project, *Advances in Space Research*, 2026, V. 77, No. 3, pp. 3119–3140, DOI: 10.1016/j.asr.2025.11.055.
12. Han Y., Dai K., Deng J. et al., Fucheng-1 high-resolution Chinese interferometric SAR: First DInSAR result for landslides monitoring, *Measurement*, 2025, V. 247, Article 116876, DOI: 10.1016/j.measurement.2025.116876.
13. Ho Tong Minh D., Hanssen R., Rocca F., Radar interferometry: 20 years of development in time series techniques and future perspectives, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 9, Article 1364, DOI: 10.3390/rs12091364.
14. Iglesias R., Mallorqui J.J., Monells D. et al., PSI deformation map retrieval by means of temporal sublook coherence on reduced sets of SAR images, *Remote Sensing*, 2015, V. 7, No. 1, pp. 530–563, DOI: 10.3390/rs70100530.
15. Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R. et al., Synthetic aperture radar interferometry, *Proc. IEEE*, 2000, V. 88, No. 3, pp. 333–382, DOI: 10.1109/5.838084.
16. Sanjuan-Ferrer M., Hajnsek I., Papathanassiou K. P. et al., A new detection algorithm for coherent scatterers in SAR data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, No. 53, No. 11, pp. 6293–6307, DOI: 10.1109/TGRS.2015.2438173.
17. Tang G., Dai K., Yang F. et al., Time series analysis of Fucheng-1 interferometric SAR for potential landslide monitoring and synergistic evaluation with Sentinel-1 and ALOS-2, *Remote Sensing*, 2026, V. 18, No. 2, Article 304, DOI: 10.3390/rs18020304.
18. Wang S., Chen Z., Zhang G. et al., Overview and analysis of ground subsidence along China's urban subway network based on synthetic aperture radar interferometry, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, No. 9, Article 1548, DOI: 10.3390/rs16091548.