

Методика радиолокационной поляриметрической интерферометрии для определения высоты молодого соснового леса по данным TerraSAR-X/TanDEM-X зимнего периода

Т. Н. Чимитдоржиев, И. И. Кирбижекова, А. В. Дмитриев

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, 670047, Россия
E-mail: tchimit@ipms.bscnet.ru

В контексте проблемы углеродной нейтральности актуальна задача достоверных оценок секвестрации углерода бореальными лесами Сибири, значительные площади которых восстанавливаются в настоящее время после пожаров. Для таких оценок используется информация об основных биофизических параметрах леса — биомассе и высоте, в том числе молодых деревьев. В настоящем исследовании предложена методика оценки высоты молодого соснового подростка в зимний период по полностью поляриметрическим данным бистатической радиолокационной системы X-диапазона TerraSAR-X/TanDEM-X. Суть методики заключается в анализе многомодального распределения интерферометрической фазы компоненты поверхностного рассеяния и оценке диапазона её наиболее распространённых значений. Компонента поверхностного рассеяния определена методом поляриметрической интерферометрии PolInSAR. Полагается, что снег, покрывающий верхний ярус ветвей и хвои, в совокупности с таковыми формирует, в случае сомкнутых крон группы деревьев, отражающую поверхность. Последняя является верхним фазовым центром, а земная поверхность, также покрытая снежным покровом, в промежутках между группами деревьев — нижним фазовым центром поверхностного рассеяния. Различие в высоте между этими центрами предлагается считать средней высотой редкого молодого леса. В соответствии с такой постановкой задачи эту величину предлагается оценить на основе измерений ширины основной моды распределения фазы поверхностного рассеяния при помощи анализа производной функции плотности распределения и теоретического диапазона стандартного отклонения $(2-3)\sigma$. Результаты оценки показывают, что данная методика может быть использована для определённых стадий залесения/лесовосстановления сосновым лесом. Основное ограничение этой методики — измеряемое различие по высоте фазовых центров для механизмов поверхностного и объёмного рассеяния не должно превышать 2π — неоднозначности высоты.

Ключевые слова: спутниковая радиолокация, X-диапазон, поляриметрическая интерферометрия, физические механизмы рассеяния, поверхностное рассеяние, угловое рассеяние, объёмное рассеяние, фазовый сдвиг, лесовосстановление, снежный покров

Одобрена к печати: 05.06.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-101-117

Введение

На фоне возрастающей изменчивости климатических параметров и глобальных усилий по достижению углеродной нейтральности, особую значимость приобретает количественная оценка секвестрационного потенциала бореальных лесов. Эти экосистемы, занимающие порядка 27 % площади мировых лесов, играют одну из ключевых ролей в глобальном цикле углерода. Значительные площади бореальных лесов на территории России подвержены регулярным пожарам с последующим естественным восстановлением. Параллельно наблюдается процесс вторичного залесения заброшенных сельскохозяйственных земель. В обоих случаях формирующийся молодой подрост существенно влияет на углеродный баланс территории. В связи с этим возникает необходимость разработки методов масштабируемой оценки параметров молодых лесных насаждений, среди которых ключевым биофизическим индикатором выступает высота древостоя. Данный показатель служит основой для регрессионных моделей пересчёта в фитомассу и, соответственно, депонированный углерод. Методы дистанционного зондирования (мультиспектральная съёмка, лазерная альтиметрия, радиолокационная интерферометрия) позволяют решить эту задачу.

Современные методы спутниковой радиолокационной интерферометрии доказали свою эффективность для мониторинга высоты сплошного лесного полога. Так, в предыдущих исследованиях авторов (Чимитдоржиев и др., 2018) был успешно применён комбинированный подход, использующий радиолокационные данные L-диапазона, проникающего через лесной массив с биомассой до 100 т/га, и X-диапазона, отражающегося от верхнего яруса крон. Разность полученных высот с поправочным коэффициентом давала надёжную оценку средней высоты леса. Дальнейшее развитие метода (Бондур и др., 2024) с использованием данных C-диапазона и алгоритмов взвешенного усреднения интерферограмм (Sandwell, Price, 1998) позволило количественно оценить динамику роста как молодых, так и зрелых деревьев в условиях сплошного лесного покрова.

Однако при работе с молодыми разреженными лесами традиционные интерферометрические методики сталкиваются с существенными ограничениями. Наклонная геометрия радиолокационного зондирования хотя и обеспечивает большее проективное покрытие по сравнению с надирной оптической съёмкой, но не решает проблему смешанного сигнала: радиолокационный отклик формируется как рассеянием на верхних ветвях отдельных деревьев, так и отражением от открытой подстилающей поверхности между ними. Это приводит к значительному влиянию почвенного покрова — его влажности, температуры, наличия снега (Чимитдоржиев и др., 2011; Zakharov, Zakharova, 2023) — на точность оценки высоты подраста. Указанные факторы обуславливают необходимость разработки новых специализированных методик интерферометрических измерений, адаптированных для работы с пространственно неоднородными молодыми лесными насаждениями, что и является основной целью данного исследования.

Основы метода радиолокационной поляриметрической интерферометрии

Одной из наиболее эффективных методик оценки высоты леса является радиолокационная поляриметрическая интерферометрия PolInSAR (*англ.* Polarimetric SAR Interferometry) (Hu et al., 2024; Joshi, Kumar, 2017; Seppi et al., 2024; Xing et al., 2023). Метод PolInSAR объединяет поляриметрические разложения (Pol) по физическим механизмам радиолокационного рассеяния и оценку интерферометрической фазы (InSAR), т.е. интерферометрию. Впервые он был предложен и разработан в 1990-х гг. группой исследователей, включая Шейна Клоуда (*англ.* Shane Cloude) и Константиноса Папатанассиу (*англ.* Konstantinos Papathanassiou). Их работы (Cloude, Papathanassiou, 1998; Papathanassiou, Cloude, 2001) заложили теоретические основы комбинации поляриметрии и интерферометрии в радиолокационном зондировании. В *табл. 1* приведены отличия PolInSAR от классической интерферометрии (InSAR).

Как известно, радиолокационная интерферометрия использует два или более радиолокационных изображений, полученных с разных точек пространства, для построения цифровых моделей рельефа или количественной оценки смещений земной поверхности и объектов инфраструктуры на основе использования дифференциальной радиолокационной интерферометрии DInSAR (*англ.* Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar). Последняя широко применяется для изучения деформаций земной поверхности, например, при землетрясениях или извержениях вулканов. Дифференциальная радиолокационная интерферометрия достаточно хорошо описана в отечественных работах (Бондур и др., 2022; Захаров и др., 2012; Киселева и др., 2017) и используется в том числе для оценок высоты леса по данным различного диапазона (Чимитдоржиев и др., 2018). Поэтому описание принципов дифференциальной радиолокационной интерферометрии в рамках данной статьи опустим.

Радиолокационная поляриметрия (*англ.* Polarimetric SAR) — это метод, который анализирует поляризацию радиолокационного эхо-сигнала, отражённого различными природными и искусственными объектами. Особенности взаимодействия радиоволн со сложными структурами поверхности, дающими многократное переотражение или имеющими пространственную анизотропию, могут быть выявлены с помощью поляризационных измерений. Такие измерения обеспечиваются поляриметрическими радиолокаторами с синтезированной

апертурой (РСА), излучающими, например, линейно поляризованные волны с вертикальной (*англ.* Vertical) и горизонтальной (*англ.* Horizontal) поляризацией и принимающими отражённый сигнал на согласованных (сигналы VV и HH) и ортогональных (VH и HV) поляризациях. Этот многоканальный поляриметрический режим работы радара значительно повышает информативность измерений (Cloude, 2009; Lee, Pottier, 2009).

Таблица 1. Различия методов InSAR и PolInSAR

	InSAR	PolInSAR
Основной принцип	Использует одну поляризацию (обычно VV или HH)	Анализирует полную матрицу рассеяния (HH, HV, VV, VH)
Тип данных	Амплитуда и фаза сигнала	Полный поляриметрический когерентный матричный анализ
Чувствительность	Только к поверхности	К объёмным структурам (лес, снег, урбанизация)
Когерентность	Одна скалярная величина	Зависит от поляризации (векторная когерентность)
Точность в лесах	Низкая (сильное декоррелирование)	Высокая (разделение сигналов от кроны и почвы)
Сложность обработки	Относительно простая	Требует сложных алгоритмов (томография, декомпозиция)
Примеры систем	ERS-1/2, Envisat ASAR, Sentinel-1, Radarsat, TerraSAR-X/TanDEM-X, ALOS-2/PALSAR-2	TerraSAR-X/TanDEM-X, ALOS-2/PALSAR-2, SAOCOM, Biomass
Применение	Цифровые модели рельефа, мониторинг деформаций	Оценка биомассы, высоты деревьев, 3D-структур

Примечание: ERS — *англ.* European Remote-Sensing Satellite; ALOS-2 — *англ.* Advanced Land Observing Satellite; PALSAR — *англ.* Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar; SAOCOM — *англ.* SAR Observation and Communications Satellite.

Результатом измерения поляриметрического РСА является матрица рассеяния:

$$[\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix},$$

здесь S_{ij} — комплексные коэффициенты рассеяния при излучении на j -поляризации и приёме на i -поляризации. Физической основой поляриметрических методов является зависимость поляризационного состояния радарного сигнала от физического механизма обратного рассеяния земными объектами. Различного рода преобразования матрицы рассеяния позволяют выявить эти механизмы и тем самым идентифицировать разные объекты. Отметим, что при моностатическом зондировании обычно выполняется условие $S_{HV} = S_{VH}$. В настоящее время существует множество способов поляриметрических декомпозиций, цель которых оценить вклад каждого механизма рассеяния. Основные механизмы радиолокационного рассеяния следующие:

- поверхностное однократное отражение (зеркальное от гладкой поверхности или диффузное от шероховатой структуры, *рис. 1а, б*, см. с. 104) наблюдается для безлесных участков, например поля, луга и т. д.;
- объёмное рассеяние за счёт многократного отражения от стволов и случайно ориентированных ветвей деревьев (см. *рис. 1в*);
- уголкового двукратного (последовательное отражение от структур, образующих прямой угол или близкий к этому, см. *рис. 1г, д*), например, от земной поверхности и затем от стены здания или стволов крупных деревьев или в обратной последовательности.

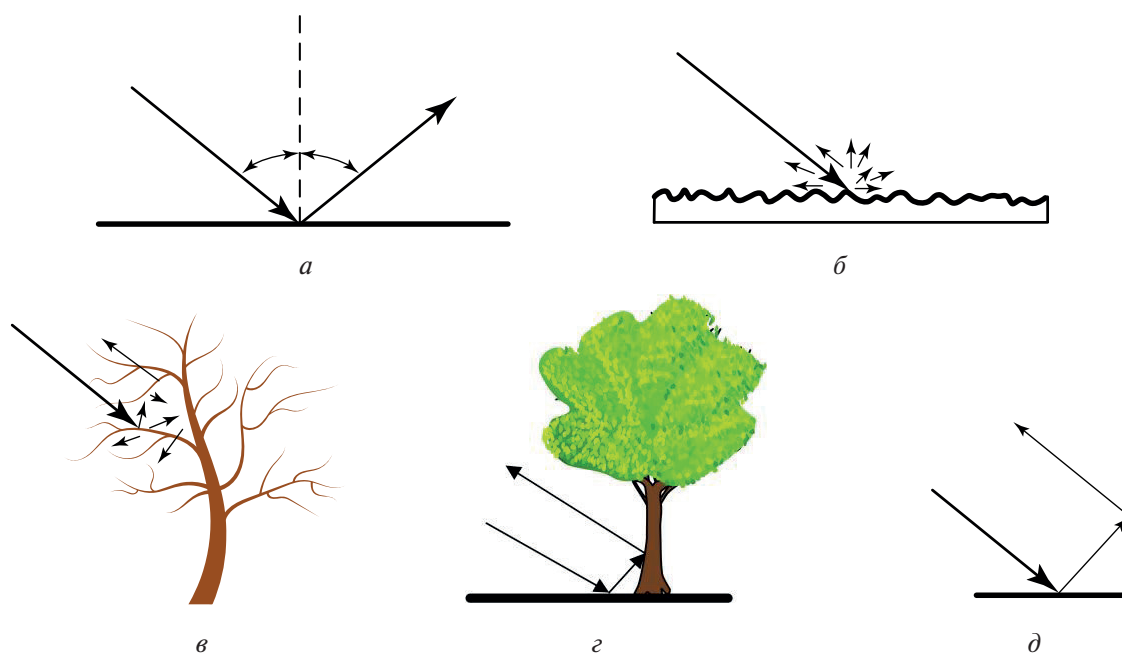


Рис. 1. Основные физические механизмы радиолокационного рассеяния:
а, б — поверхностное однократное; в — объёмное; г, д — угловое двукратное

Метод PolInSAR основывается на анализе особенностей рассеяния поляризованных радиоволн различными элементами природных и антропогенных объектов. Разные типы поляризации демонстрируют различную чувствительность к структурным особенностям среды. Горизонтально поляризованные волны (HH) преимущественно взаимодействуют с горизонтально ориентированными элементами, такими как ветви деревьев, в то время как вертикальная поляризация (VV) более чувствительна к вертикальным структурам, включая стволы. Кросс-поляризованные компоненты (HV/VH) обычно характеризуют процессы объёмного рассеяния пространственно неоднородными средами, каковыми являются совокупность стволов и ветвей со случайными углами наклона.

Анализ когерентности играет ключевую роль в интерпретации радиолокационных интерферометрических данных. Уменьшение когерентности, т. е. увеличение декорреляции, свидетельствует о существенном изменении отражённого радиолокационного сигнала (амплитуды и фазы). Интерферометрическая когерентность двух комплексных радарных изображений I_1 и I_2 определяется как амплитуда комплексного коэффициента корреляции:

$$\gamma = \frac{|\langle I_1 I_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle I_1 I_1^* \rangle \cdot \langle I_2 I_2^* \rangle}}, \quad (1)$$

где $*$ — комплексное сопряжение; $\langle \dots \rangle$ — операция усреднения, $0 \leq \gamma \leq 1$.

При изучении пространственно неоднородных объектов, таких как лесные массивы, наблюдается специфическое поведение радиолокационного сигнала. Фазовый центр отражения, представляющий собой условную точку концентрации обратного рассеяния, в этом случае располагается внутри совокупного объёма ветвей и стволов. Это приводит к снижению когерентности, что объясняется стохастической природой многократных переотражений внутри этого объёма. В отличие от объёмного, поверхностное рассеяние характерно для шероховатых (например, поля, луга и т. п.) объектов. В этом случае фазовый центр соответствует самой отражающей поверхности, а когерентность сигнала остаётся высокой благодаря минимальному влиянию случайных факторов. Наиболее интенсивно поверхностное рассеяние проявляется на согласованных поляризациях (HH, VV) и описывается специализированными моделями, учитывающими шероховатость и диэлектрические свойства поверхности.

В общем случае любая матрица рассеяния $[S]$ может быть эквивалентно представлена соответствующим вектором рассеяния $\mathbf{k}$, записанным в базисе Паули:

$$\mathbf{k} = (1/\sqrt{2})[S_{HH} + S_{VV}, S_{HH} - S_{VV}, 2S_{HV}]^T.$$

Используя векторы рассеяния интерферометрической пары $\mathbf{k}_1$ и $\mathbf{k}_2$, можно записать общее выражение для когерентности, которое содержит все возможные состояния поляризации соответствующих изображений:

$$\gamma = \frac{\langle \mathbf{k}_1 \mathbf{k}_2^{*T} \rangle}{\sqrt{\langle \mathbf{k}_1 \mathbf{k}_1^{*T} \rangle \cdot \langle \mathbf{k}_2 \mathbf{k}_2^{*T} \rangle}},$$

где “ T ” обозначает транспонирование. Однако на практике необходимо выбрать определённую поляриметрическую конфигурацию для каждого из пары изображений, чтобы получить обычное (скалярное) значение когерентности (формула (1)). Это можно сделать с помощью единичных комплексных векторов ω_1 и ω_2 , которые интерпретируются как два механизма рассеяния (*англ.* scattering mechanisms). Они позволяют определить коэффициенты рассеяния μ_1 и μ_2 как проекции соответствующих векторов $\mathbf{k}_1$ и $\mathbf{k}_2$ (Cloude, Papathanassiou, 1998):

$$\mu_1 = \omega_1^{*T} \mathbf{k}_1, \quad \mu_2 = \omega_2^{*T} \mathbf{k}_2.$$

Тогда поляриметрическая интерферометрическая когерентность принимает вид:

$$\gamma(\omega_1, \omega_2) = \frac{\langle \mu_1 \mu_2^* \rangle}{\sqrt{\langle \mu_1 \mu_1^* \rangle \cdot \langle \mu_2 \mu_2^* \rangle}} = \frac{\langle \omega_1^{*T} [\Omega_{12}] \omega_2 \rangle}{\sqrt{\langle \omega_1^{*T} [T_{11}] \omega_1 \rangle \cdot \langle \omega_2^{*T} [T_{22}] \omega_2 \rangle}}, \quad (2)$$

где $[T_{11}] = \langle \mathbf{k}_1 \mathbf{k}_1^{*T} \rangle$, $[T_{22}] = \langle \mathbf{k}_2 \mathbf{k}_2^{*T} \rangle$ — стандартные эрмитовы матрицы когерентности, которые содержат полную поляриметрическую информацию каждого отдельного изображения, а $[\Omega_{12}] = \langle \mathbf{k}_1 \mathbf{k}_2^{*T} \rangle$ — общая комплексная матрица когерентности, содержащая не только поляриметрическую информацию, но и интерферометрические фазовые соотношения между различными поляриметрическими каналами обоих изображений.

Оптимизация когерентности, приведённой в выражении (2), является фундаментальным шагом в методе PolInSAR. Она направлена на извлечение механизмов рассеяния на основе полученных оптимальных значений когерентности, тем самым уменьшая потенциальные ошибки и повышая точность определения фазовых центров рассеяния для каждого механизма рассеяния. Процесс оптимизации (Cloude, Papathanassiou, 1998) заключается в подборе таких поляризационных параметров, при которых когерентность интерферометрической пары достигает экстремальных значений:

$$\gamma_{opt} = \arg \max_{\omega_1, \omega_2} \frac{\langle \omega_1^{*T} [\Omega_{12}] \omega_2 \rangle}{\sqrt{\langle \omega_1^{*T} [T_{11}] \omega_1 \rangle \cdot \langle \omega_2^{*T} [T_{22}] \omega_2 \rangle}}.$$

Математически эта оптимизационная задача с помощью метода множителей Лагранжа сводится к задаче нахождения общих собственных значений v :

$$[T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] [T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^{*T} \omega_1 = v \omega_1, \quad [T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^{*T} [T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] \omega_2 = v \omega_2.$$

Полученные оптимальные собственные векторы ω_{1opt} и ω_{2opt} используются для построения оптимизированных изображений μ_1 и μ_2 , из которых получают три набора интерферограмм $\langle \mu_1 \mu_2^* \rangle$ и соответствующих изображений когерентности (см. формулу (2)) для каждой пары собственных векторов ω_{1opt} и ω_{2opt} , которые соответствуют определённым механизмам рассеяния. Таким образом существенно повышается точность оценки параметров леса, в частности высоты деревьев, за счёт чёткого разделения сигналов от разных компонентов ландшафта.

В работах (Cloude, Papathanassiou, 1998; Xing et al., 2023) оптимизированные когерентности γ_{opt1} , γ_{opt2} и γ_{opt3} представляют собой три основные когерентности, полученные в результате оптимизации поляризметрических данных. Эти когерентности соответствуют разным механизмам рассеяния и используются для разделения фазовых центров, связанных с поверхностью Земли и рассеянием в объёме леса:

- γ_{opt1} — оптимизированная когерентность для доминирующего механизма рассеяния. Это максимальная когерентность с поляризационным состоянием, соответствующим наиболее сильному механизму рассеяния, как правило от поверхности. Эта когерентность используется для определения интерферометрической фазы сигнала, отражённого от земной поверхности.
- γ_{opt2} — оптимизированная когерентность для промежуточного механизма рассеяния, второго по значимости. Для лесной среды это может быть связано с двойным угловым отражением (например, между стволами деревьев и поверхностью Земли) или другими промежуточными эффектами.
- γ_{opt3} — оптимизированная когерентность для объёмного рассеяния (рассеяние ветвями и стволами деревьев). Это минимальная когерентность соответствует поляризационному состоянию, при котором рассеяние от всей толщи лесного полога максимально. Она используется для определения фазового центра рассеяния, как правило расположенного внутри этой толщи ветвей и стволов.

Таким образом, когерентности γ_{opt1} и γ_{opt3} используются для определения фазовых центров рассеяния поверхностного отражения и объёмного рассеяния. Разность высот h_v этих фазовых центров позволяет оценить среднюю высоту деревьев с помощью формулы (Xing et al., 2023):

$$h_v = \frac{\arg(\gamma_{opt3}) - \arg(\gamma_{opt1})}{k_z}, \quad (3)$$

где $\arg(\gamma_{opt3})$ — фаза, связанная с объёмным рассеянием в толще леса; $\arg(\gamma_{opt1})$ — фаза, связанная с рассеянием земной поверхностью; k_z — вертикальное волновое число, которое зависит от параметров радиолокатора и имеет вид:

$$k_z = \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R \sin \theta}. \quad (4)$$

Здесь $B_{\perp}$ — перпендикулярная базовая линия (расстояние между двумя антеннами в направлении, перпендикулярном линии визирования); λ — длина волны радиолокационного сигнала; R — наклонная дальность до цели; θ — угол падения радиолокационного сигнала.

Вертикальное волновое число k_z напрямую влияет на точность оценки высоты деревьев, так как оно определяет, насколько чувствительна система к изменениям высоты. Поэтому одним из ключевых параметров при измерениях средней высоты деревьев методом PolInSAR является длина волны. Так, например, волны Р-диапазона (радиолокатор BIOMASS, длина волны 70 см) проникают под лесной полог и отражаются от подстилающей поверхности независимо от биомассы леса. Волны L-диапазона (ALOS-1, -2/PALSAR-1, -2, длина волны 24 см) при биомассе более 100 т/га рассеиваются толщей леса, не достигая поверхности. Что касается радиолокационных эхо-сигналов С-диапазона (Sentinel-1 с длиной волны 5,6 см) и Х-диапазона (TerraSAR-X/TanDEM-X с длиной волны 3 см), то они рассеиваются верхним ярусом леса с полным проективным покрытием (сомкнутость крон 100 %), соответственно компонента поверхностного рассеяния земной поверхностью отсутствует. Поэтому для измерений средней высоты деревьев зрелого леса применение формулы (2) для этих длин волн не представляется возможным. Однако в случае редколесья или молодого леса проективное покрытие низкое, так как кроны деревьев ещё не сомкнулись, поэтому предлагается использовать данные Х-диапазона бистатической радиолокационной системы TerraSAR-X/TanDEM-X. Применение этих бистатических радиолокационных данных (нулевая временная база) позволит не учитывать временную декорреляцию.

Описание тестового участка и используемых радиолокационных данных

В качестве тестового полигона был использован участок залесения с сосновым подростом. Участок достаточно хорошо изучен и подробно описан, например, в работах авторов (Дмитриев и др., 2022). Он расположен посреди зрелого соснового леса высотой 20–24 м, плотностью 0,2–0,25 дерева/м², диаметром стволов 21–28 см. Этот разреженный лесной подрост на снимке (рис. 2) от 13.06.2015 оптико-электронного сенсора «Геотон-Л1» (пространственное разрешение 3 м), установленного на спутнике «Ресурс-П», представлен оттенками светло-зелёного цвета.

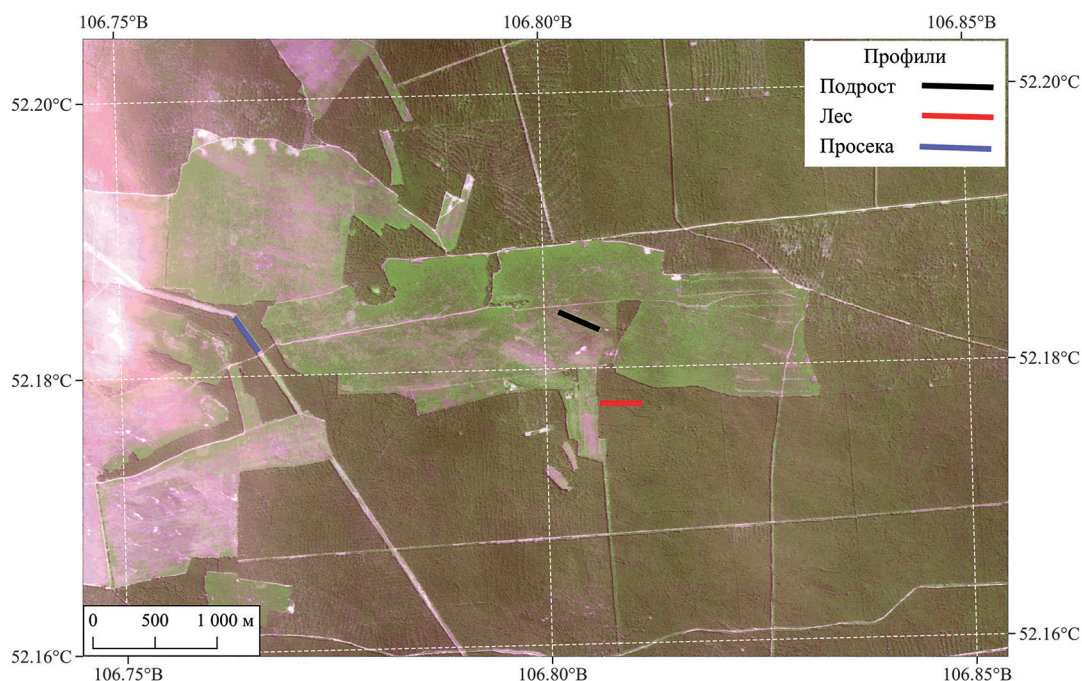


Рис. 2. Общий вид тестового участка на снимке оптико-электронного сенсора «Геотон-Л1» от 13.06.2015 и расположение профилей когерентности и фазы

Для интерферометрических, в данном случае методом PolInSAR, измерений были использованы полностью поляриметрические данные бистатической радиолокационной системы TerraSAR-X/TanDEM-X от 19.01.2015. Пространственная интерферометрическая базовая линия $B_{\perp}$ составляла 399,1 м, расстояние R (наклонная дальность) до середины радиолокационной сцены — 609 816 м, 2π неоднозначность определения высоты — 13,1 м, угол падения θ волны для изображения TerraSAR-X — 33,6°, разность между углами падения для TerraSAR-X и TanDEM-X — 0,037°. Соответственно параметр k_z (см. формулу (3)), используемый для расчётов высоты леса, был равен 0,465. Пространственное разрешение радиолокационных изображений после процедуры некогерентного накопления сигнала (*англ.* multilooking) составляло 5 м, что позволяло разделять интерферометрическую фазу лесного подроста и открытых участков между группами молодых деревьев. В качестве опорного рельефа использована цифровая модель рельефа TanDEM с пространственным разрешением 12 м.

Предварительная оценка

Обработка полностью поляриметрических данных методом PolInSAR была выполнена при помощи программного обеспечения Sarmap SARscape. В итоге были получены три оптимизированные когерентности: 1) для доминирующего механизма рассеяния (максималь-

ный вклад, *рис. 3б*), в нашем случае однократное отражение от земной поверхности; 2) промежуточного по вкладу механизма — углового (см. *рис. 3в*); 3) механизма с минимальным вкладом — объёмного рассеяния (см. *рис. 3г*). Для сравнения на *рис. 3а* приведено изображение интерферометрической когерентности, полученное на НН-поляризации. Ниже на *рис. 4а* (см. с. 109) представлены профили трёх типов когерентности (поверхностное рассеяние — синий, угловое — красный, объёмное — зелёный) вдоль просеки, а график на *рис. 4б* демонстрирует соответствующие профили PolInSAR-фаз. Расположение профилей показано на *рис. 2*. Отметим, что участки, соответствующие профилям, являются достаточно однородными и, следовательно, следует ожидать относительно стабильные величины.

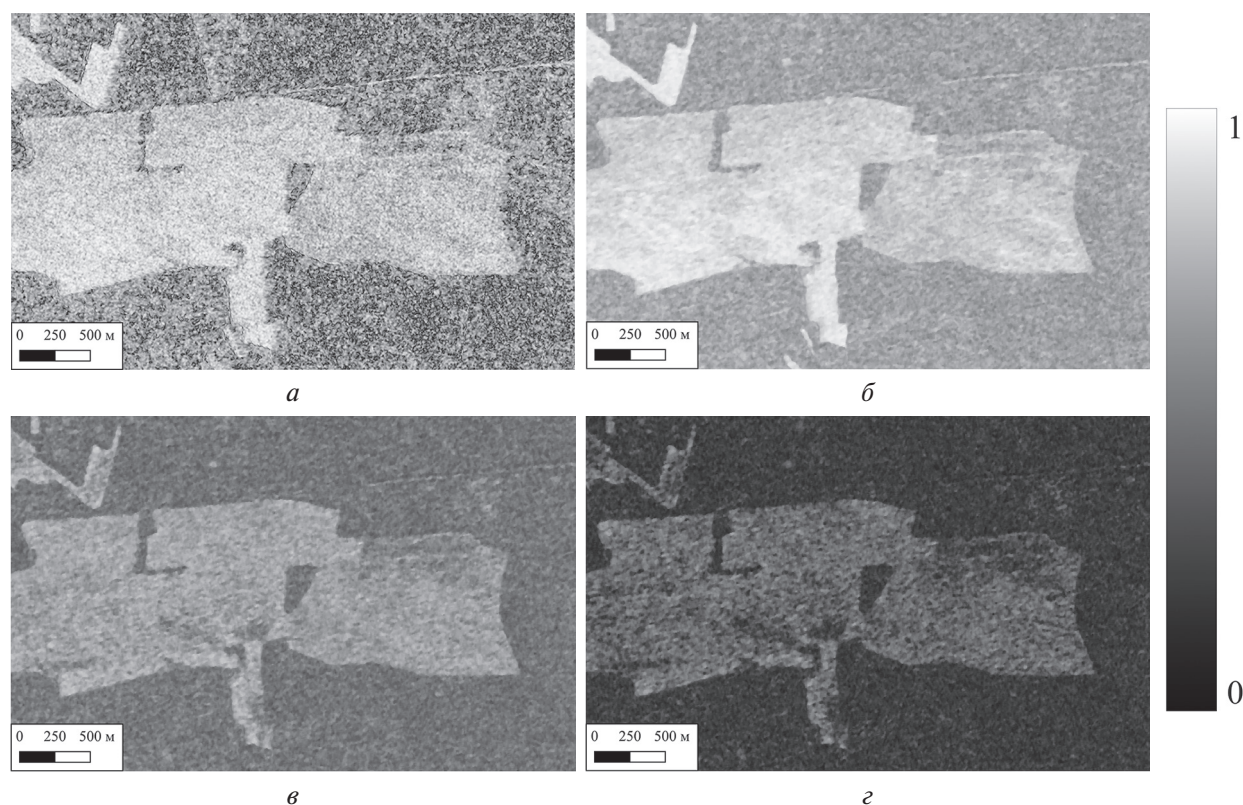


Рис. 3. Тестовый участок залесения: интерферометрическая когерентность на НН поляризации (*а*); поляриметрическая когерентность для поверхностного (*б*), углового двухкратного (*в*) и объёмного (*г*) рассеяния

Также были рассчитаны соответствующие интерферограммы, которые были использованы для определения высоты H фазовых центров рассеяния лесной растительностью по формуле:

$$H = h_{amb} \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\varphi}{k_z}, \quad (5)$$

где φ — интерферометрическая фаза; h_{amb} — фазовая 2π неоднозначность определения высоты. Результаты показали, что средняя разность расчётных высот фазовых центров объёмного и поверхностного рассеяния на участках лесного подроста составляет порядка 6,5 м. Однако это не соответствовало результатам проведённых в 2015 г. полевых наблюдений, в тот момент высота составляла 2–3 м.

Для анализа причин такой невязки первоначально рассмотрим профили когерентности и PolInSAR-фазы на предмет возможности классификации и последующей оценки высоты фазовых центров рассеяния. Анализ профилей оптимизированной когерентности PolInSAR выявляет следующие характерные особенности. Для просеки профили когерентности доста-

точно хорошо разделены по величине, т. е. наблюдается чёткое разделение механизмов рассеяния (см. левый график на рис. 4а). Для подроста (средний график на рис. 4а) и леса (правый график на рис. 4а) разделение по величине несколько хуже. Также следует отметить: 1) когерентность для поверхностного рассеяния на просеке демонстрирует небольшие вариации при средней величине $\gamma \approx 0,9$; 2) вариации когерентности уголкового отражения более значительны, что связано с наличием редких природных квазиуголковых структур, соизмеримых с длиной волны 3 см; 3) объёмное рассеяние вероятно формируется в результате многочисленных переотражений внутри слоисто неоднородной структуры «снег – почва» (Dagurov et al., 2020). Для молодого соснового леса также наблюдается выраженная дифференциация отражений: поверхностное демонстрирует неоднородность распределения горизонтальных ветвей, уголкового показывает резкие пики в местах скопления стволов и крупных ветвей, размеры которых сравнимы с длиной волны X-диапазона, а объёмное имеет высокочастотные колебания, соответствующие неравномерной плотности крон. Зрелый сосновый лес характеризуется квазипериодическими колебаниями объёмной составляющей, соответствующими ярусности крон. В целом анализ профилей когерентности подтверждает возможность использования PolInSAR-когерентности TerraSAR-X/TanDEM-X для разделения зрелых лесных массивов, молодых деревьев и безлесных участков.

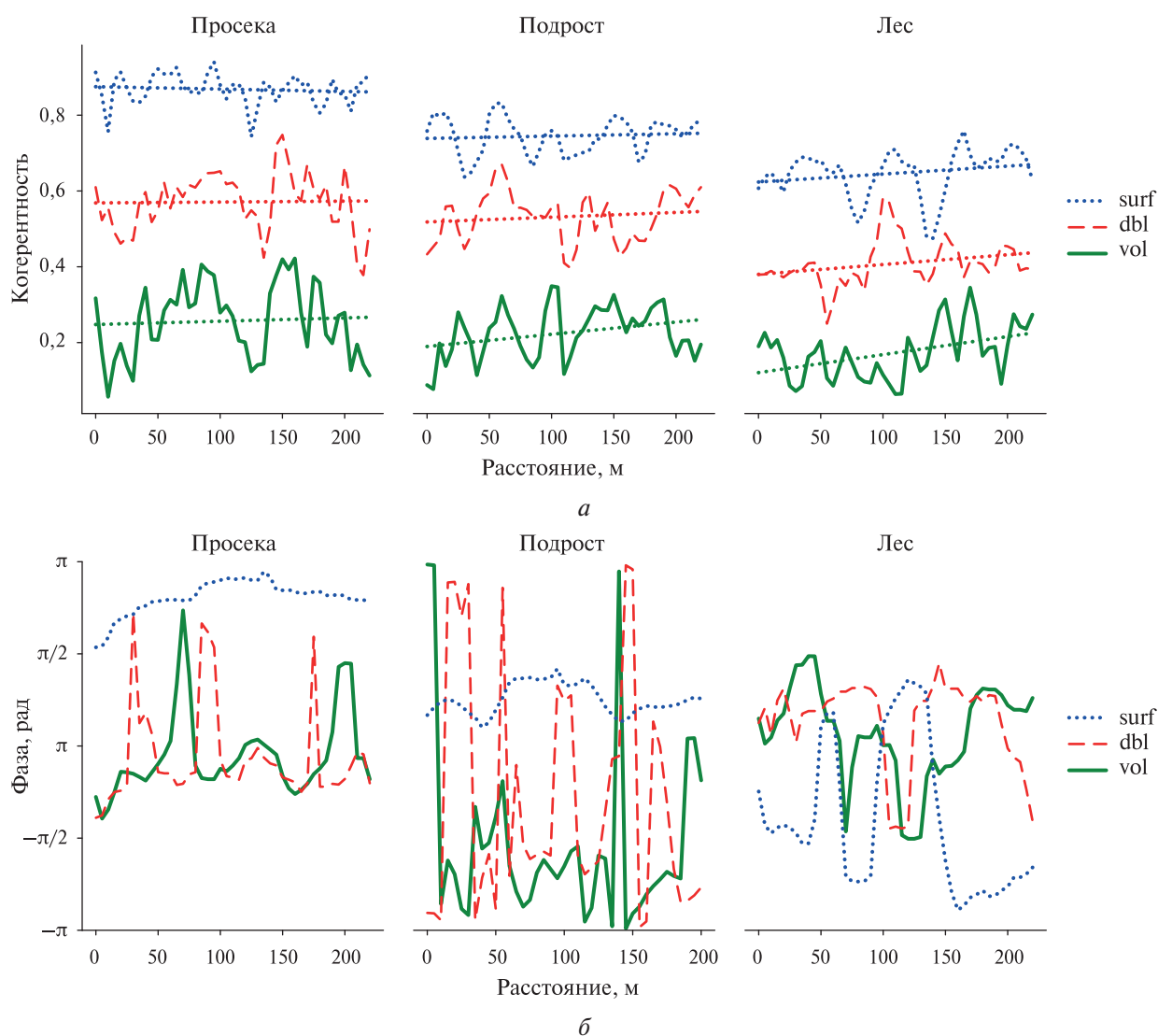


Рис. 4. Профили оптимизированной когерентности (а) и интерферометрических фаз (б) для поверхностного (surf), уголкового двукратного (dbl) и объёмного рассеяния (vol) вдоль просеки (без деревьев) и на участках подроста и зрелого леса

Анализ фазовых профилей PolInSAR, полученных в зимний период с бистатической системы TerraSAR-X/TanDEM-X при наличии снежного покрова, выявляет характерные особенности для всех трёх типов поверхности. На просеке интерферометрическая фаза компоненты поверхностного рассеяния (синяя кривая) демонстрирует относительно стабильное достаточно равномерное увеличение в первой половине профиля и такое же равномерное уменьшение во второй половине (за исключением незначительного всплеска), что характерно для изменений рельефа. Этот паттерн описывает преимущественно отражение от поверхности с минимальным влиянием растительности (незначительный всплеск). Угловое рассеяние (красный профиль) и объёмное рассеяние (зелёный профиль), полученные при средней и минимальной оптимизированной когерентности, характеризуются значительными хаотичными флуктуациями, что обусловлено большим взаимодействием 3-см длины волны с сопоставимыми по размерам неоднородностями земной поверхности в виде квазиуголков, многократными переотражениями от границ слоистой структуры снег – почва (Dagurov et al., 2020) и объёмным рассеянием в этой же структуре. Важно отметить, что на открытых участках поверхностная компонента действительно доминирует, что далее будет использовано для сравнения с более сложными лесными экосистемами.

Для зрелого соснового леса зимой наблюдаются наиболее сложные фазовые профили (см. правый график на *рис. 4б*). Все три составляющие хаотично флуктуируют с амплитудами порядка ± 2 рад с близкими к нулю средними значениями, что свидетельствует о полном экранировании подстилающей поверхности плотными заснеженными кронами зрелого соснового леса с полнотой древостоя более 0,7. Соответственно достоверная оценка разности высот фазовых центров рассеяния от подстилающей поверхности и верхнего яруса для такого леса при помощи метода PolInSAR по данным 3-см длин волн невозможна.

В молодом сосновом лесу (см. средний график на *рис. 4б*) зимние условия также существенно влияют на фазовые характеристики. Компоненты углового и объёмного рассеяния флуктуируют фактически во всём диапазоне значений неразвёрнутой фазы 2π рад, при этом относительное снижение вариаций фаз (особенно для объёмной компоненты) отмечается в средней части профиля, для которой в свою очередь характерно относительное увеличение компоненты поверхностного рассеяния на величину порядка 0,7–1 рад. Эта величина, вероятно, определяет различие по высоте фазовых центров рассеяния, которые расположены на верхнем ярусе сплошного полога ветвей/хвои группы молодых деревьев и на беслесных участках земной поверхности. При этом в обоих случаях фазовые центры рассеяния расположены на границе «воздух – снег» (Qiao et al., 2024).

Таким образом, анализ профилей фазы основных механизмов рассеяния для трёх типов земных покровов в зимний период выявил сложный характер изменения интерферометрических фаз. Значительные вариации наблюдаются для компонент углового и объёмного рассеяния, что связано с рассеянием от случайно ориентированных неоднородностей, соизмеримых с длиной волны. Данные компоненты фазы соответственно во многом носят случайный характер, поэтому далее будем рассматривать только компоненту поверхностного рассеяния, полагая, что в X-диапазоне для молодого леса эта компонента формируется и земной поверхностью в промежутках между кронами групп деревьев, и сплошным пологом ветвей, покрытых снегом.

Статистический анализ гистограмм распределения PolInSAR фазы

Для статистического анализа на территории полигона были выбраны участки без растительности, зрелого соснового леса и подроста сосны с различными биофизическими параметрами (*рис. 5а*, см. с. 111). Выбор участков был осуществлён на основе особенностей и различий текстуры мультиспектральных изображений спутника «Ресурс-П» с высоким пространственным разрешением (3 м) и псевдоцветового композитного изображения, сформированного из трёх оптимизированных когерентностей. Величины когерентности и среднеквадратичного отклонения (СКО) являются индикаторами наличия и степени неоднородности растительного покрова (см. *рис. 5б*). Максимальное значение когерентности и наименьшее значение

СКО соответствуют безлесному участку «Поле» на *рис. 5б*, минимальная когерентность и наибольшая величина разброса — зрелому сосновому лесу «Зрелый лес». Нумерация 1, 2 и 3 трёх участков подроста соответствует возрасту, высоте и плотности молодняка сосны. Участок густого соснового молодняка возрастом более 20 лет и высотой деревьев 7–12 м обозначен как «Молодой лес».

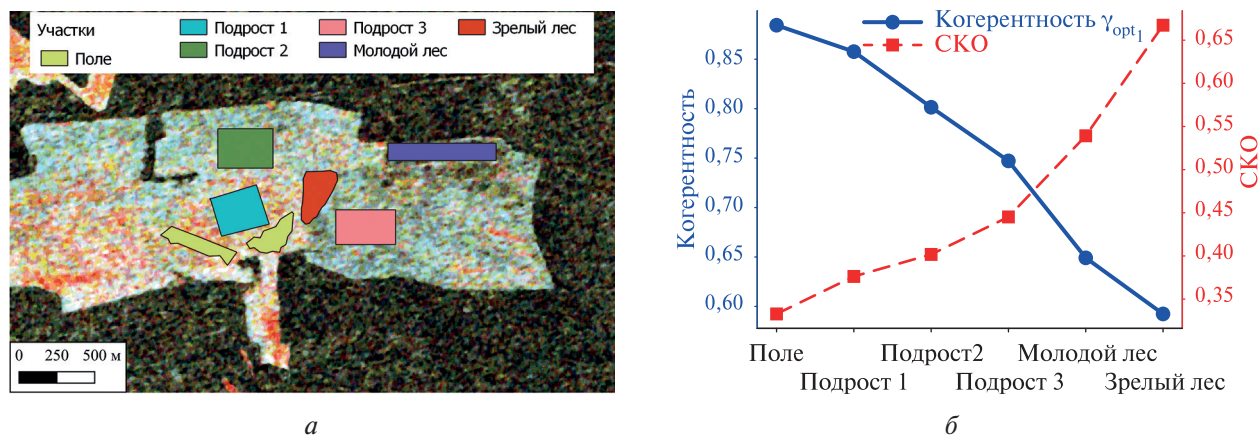


Рис. 5. Псевдоцветовой RGB композит из трёх значений оптимизированной когерентности (*а*); когерентность γ_{opt1} и СКО (*б*) для тестовых участков. Red — максимальная оптимизированная когерентность γ_{opt1} , Green — промежуточная когерентность γ_{opt2} , Blue — минимальная когерентность γ_{opt3}

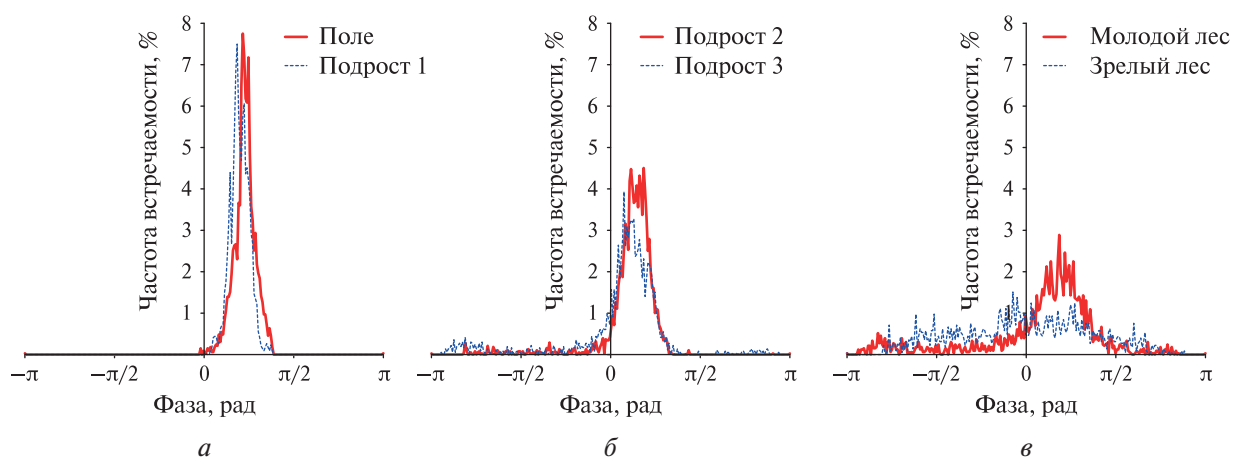


Рис. 6. Гистограммы распределения фазы компоненты поверхностного рассеяния: *а* — для областей с преобладанием открытых участков; *б* — подрост с неполной сомкнутостью крон; *в* — участков леса разного возраста

На *рис. 6* представлены гистограммы плотности распределения $f(x)$ интерферометрической фазы компоненты поверхностного рассеяния для этих участков. Как можно отметить по рисункам, графики $f(x)$ исследуемых участков значительно отличаются от нормального распределения, демонстрируя многомодальность и асимметрию, что обусловлено сложными процессами взаимодействия радиолокационного сигнала с неоднородной подстилающей поверхностью. Это связано с тем, что каждый пиксель изображения содержит смесь различных механизмов рассеяния: отражение от земной поверхности и горизонтальных элементов растительности, объёмное рассеяние в кронах деревьев разной высоты, а также угольковое отражение от вертикальных структур. Основная сложность заключается в том, что разные механизмы рассеяния не просто складываются, а взаимодействуют между собой, причём один физический объект (например, дерево) может одновременно вносить вклад в несколько типов рассеяния.

Такое наложение различных компонент делает традиционные статистические показатели (средние значения и стандартные отклонения) недостаточно информативными, излишне общими. Поэтому в данном случае больший интерес представляют моды распределения и их характеристики положения и разброса, в частности диапазон значимых величин фазы и локальное СКО σ . На гистограммах всех исследуемых участков (см. рис. 6) присутствует основной главный модальный пик, на участках подростка можно заметить также несколько более слабых вторичных модальных пиков, а для зрелого леса визуальные различия модальных пиков плохо различимы. Предлагается оценить ширину главного модального пика распределения по точкам ближайших локальных минимумов, отсекающих фазовые значения второго порядка и т. п. При близком расположении вторичных модальных пиков, по отношению к основному, «хвосты» распределения могут быть ошибочно причислены к соседним модальным пикам, вследствие чего диапазон значений может быть занижен. Для устранения подобной ошибки необходимо вычислить локальное значение СКО σ и оценить ширину пика по уровням $(2-3)\sigma$, что позволит количественно оценить диапазон практически всех искомых фазовых значений соответственно на $\sim 95,4$; $99,7$ %. При таком подходе, зная диапазон изменения фазы для механизма поверхностного рассеяния, можно будет оценить диапазон высот всех фазовых центров рассеяния от почвенного покрова и практически до верхнего яруса ветвей, покрытых снегом. Последний нивелирует дискретную структуру ветвей и хвои, повышая когерентность, что в конечном итоге увеличивает компоненту поверхностного рассеяния от такой горизонтально ориентированной структуры (снег, хвоя, ветви).

Для определения ширины пиков многомодального распределения воспользуемся анализом скользящей производной функции плотности распределения $f(x)$. Этот метод основан на свойствах локальных экстремальных точек: 1) производная функции в такой точке равна нулю: $f'(x) = 0$; 2) $f'(x)$ в точках минимума меняет знак с « $-$ » на « $+$ » и в точках максимума с « $+$ » на « $-$ ». В данном исследовании локальные максимумы характеризуют положение модальных пиков и являются индикаторами наиболее распространённых высот горизонтально ориентированных структур лесной растительности. Границы между модальными пиками определяются точками локальных минимумов. Из-за необходимости сглаживания флуктуаций $f(x)$ в качестве производной $f'(x)$ предлагается рассматривать наклон скользящей касательной. Размер окна обработки с одной стороны ограничен необходимостью сглаживания флуктуаций, обеспечения статистической значимости и надёжности величины наклона касательной, с другой стороны должен быть соизмерим с размерами слабых модальных пиков.

Анализ производных показал, что для зрелого леса гистограмма $f(x)$ содержит до 15 модальных пиков одного порядка, равномерно распределённых на протяжении всего диапазона высот. Для молодого леса и густого подростка «Подрост 3» помимо главного пика наблюдается порядка 10 более слабых вторичных модальных пиков, расположенных неравномерно на разных высотах. А для открытого участка «Поле» и участков подростка с низкой и средней плотностью «Подрост 1» и «Подрост 2» главный модальный пик формируется из двух близко расположенных максимумов одного порядка с разницей высот 15, 24 и 37 см соответственно. В дальнейших оценках будем использовать только ширину основной моды без учёта вторичных.

В табл. 2 представлены статистические характеристики (среднее значение и среднеквадратичное отклонение) и результаты оценки диапазона и разброса высоты для компоненты поверхностного рассеяния главного модального пика. Диапазон высот δh рассчитывается по формуле (5) на основе разности фаз локальных точек минимума, отделяющих главный модальный пик от вторичных. Полагая распределение модальных пиков близким к нормальному, также были вычислены теоретические диапазоны высот $(2-3)\sigma$.

По результатам расчётов, представленных в табл. 2, можно отметить следующее:

- Для участков Поле и Подрост 1 значения δh относительно малы (0,65 и 0,55 м соответственно), что указывает на низкую вариативность высот. Средняя высота составляет 1,57 и 1,33 м, а σ_h — 0,16 и 0,15 м. Теоретические интервалы 2σ и 3σ также демонстрируют узкий разброс значений. Это свидетельствует о том, что эти участки обладают

высокой однородностью, которая характерна безлесной поверхности и связана также с низким отношением сигнал/шум. Неоднородности почвы, остатки травы и низкорослая растительность, соизмеримые с длиной волны, внесли значительный вклад в наблюдаемые значения.

- Для участков Подрост 2 и Подрост 3 наблюдается значительное увеличение δh (2,28 и 4,02 м), что указывает на большую вариативность высот. Средняя высота снижается (0,98 и 0,79 м), а σ_h возрастает (0,45 и 1,01 м). Теоретические интервалы 2σ и 3σ также расширяются. Подобные изменения могут быть связаны с увеличением сложности рассеивающей структуры, что приводит к большему разбросу высоты, например, из-за молодых деревьев на фоне безлесных участков. Необходимо отметить, что эти результаты согласуются с подспутниковыми наблюдениями, что подтверждает их достоверность.
- Для молодого густого леса δh достигает 4,41 м, средняя высота составляет 1,23 м, а σ_h — 1,51 м. Теоретические интервалы (6,03–9,04 м) значительно превышают δh , что может указывать на несоответствие распределения нормальному закону. Это может быть связано с низкой проникающей способностью радиолокационного сигнала Х-диапазона, что затрудняет точную оценку высот для густой лесной растительности.
- Для зрелого леса аномальные значения средней высоты $-0,08$ м (физически некорректно), $\sigma_h = 2,51$ м, $\delta h = 11,39$ м. Отрицательная средняя высота и экстремальный δh свидетельствуют о полном нарушении условий применимости данного подхода. В густых лесах Х-диапазон регистрирует лишь верхний слой крон, а фазовый центр смещается хаотично из-за многократного рассеяния.

Таблица 2. Статистические характеристики положения и разброса высоты на основе распределения фазы поверхностного рассеяния

Тип участка	Характеристики главного модального пика, м				
	δh	h_m	σ_h	$i_{2\sigma}$	$i_{3\sigma}$
Поле	0,65	1,57	0,16	0,64	0,96
Подрост 1	0,55	1,33	0,15	0,59	0,88
Подрост 2	2,28	0,98	0,45	1,79	2,69
Подрост 3	4,02	0,79	1,01	4,02	6,04
Молодой лес	4,41	1,23	1,51	6,03	9,04
Зрелый лес	11,39	-0,08	2,51	10,02	15,03

Примечание: δh — диапазон высоты (разность максимальной и минимальной высоты); h_m — средняя высота; σ_h — среднеквадратичное отклонение высоты; $i_{2\sigma}$ — ширина интервала $[h_m - 2\sigma, h_m + 2\sigma]$, т. е. 4σ ; $i_{3\sigma}$ — ширина интервала $[h_m - 3\sigma, h_m + 3\sigma]$.

В целом следует отметить, что для большинства участков, кроме молодого и зрелого леса, подтверждается предположение о близости распределения модальных пиков к нормальному. При этом наименьший разброс высоты наблюдается для однородных участков (Поле, Подрост 1), но в данном случае велико влияние шума, поэтому предлагаемый подход для оценки средней высоты лесного полога для поля Подрост 1 некорректен. Для более сложных структур (Подрост 2, Подрост 3) вариативность возрастает и вместе с тем увеличивается отношение сигнал/шум. В результате становится возможной достоверная количественная оценка различий в высоте фазовых центров рассеяния от верхнего яруса ветвей/хвои и подстилающей поверхности в промежутках между кронами деревьев. Для густых лесов (молодой и зрелый) предлагаемый подход оказывается недостаточно эффективным из-за низкой проникающей способности радиолокационного сигнала Х-диапазона под сплошной лесной полог.

Заключение

В результате исследования предложена методика оценки высоты молодого соснового подроста в зимний период по полностью поляриметрическим данным бистатической радиолокационной системы X-диапазона TerraSAR-X/TanDEM-X. Суть методики заключается в анализе многомодального распределения интерферометрической фазы компоненты поверхностного рассеяния и оценке диапазона наиболее распространённых значений. Компонента поверхностного рассеяния получена методом поляриметрической интерферометрии PolInSAR. Полагается, что снег, покрывающий верхние ярусы ветвей и хвои, в совокупности с такими формирует, в случае сомкнутых крон группы деревьев, отражающую поверхность — верхний фазовый центр поверхностного рассеяния. В просветах между деревьями на земной поверхности, покрытой также снегом, — нижний фазовый центр поверхностного рассеяния. Разность высоты этих фазовых центров предлагается считать средней высотой редкого молодого леса. В соответствии с такой постановкой задачи эту величину предлагается оценить на основе измерений ширины основной моды распределения компоненты поверхностного рассеяния при помощи анализа производной функции плотности распределения фазы и локальных среднеквадратичных отклонений или диапазона $(2-3)\sigma$.

При измерениях ширины основной моды следует использовать в качестве реперных точек отсчёта молодой сосновый лес, а также безлесный участок (просеку или поляну). Безлесный участок позволяет определить порог влияния фонового шума (в том числе спекл-шума) земной поверхности для измерений высоты редкого подроста. Если ширина основной моды меньше или равна таковой для просеки/поляны/поля, то этот подрост имеет характеристики более сходные с безлесными участками и далее не рассматривается.

В случае молодого соснового подроста, практически ставшего молодым лесом, его проникающая способность в X-диапазоне становится сопоставима со зрелым лесом. Соответственно этому понижается когерентность, величину которой предлагается использовать в качестве необходимого условия для применения этой методики. Например, в данном случае это величина когерентности получена эмпирически и составляет 0,7 (см. *рис. 5б*).

Таким образом, методика количественной оценки средней высоты молодого леса при помощи статистического анализа фазы компоненты поверхностного рассеяния PolInSAR в X-диапазоне эффективна только для редкого подроста сосны, покрытого снегом. Для сложных структур и густого леса необходима комбинация с другими дистанционными методами или переход к иным частотным диапазонам.

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 24-27-20044 «Развитие методов и технологий спутниковой оптико-микроволновой диагностики лесовосстановления/залесения на примере Республики Бурятия» (<https://rscf.ru/project/24-27-20044/>).

Литература

1. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н., Кирбижекова И. И., Дмитриев А. В. Радиолокационное обнаружение аномальной динамики бугров пучения на примере Ямальского бугра/кратера 2020 г. // Докл. Российской акад. наук. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 1. С. 65–72. DOI: 10.31857/S2686739722700013.
2. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В., Номшиев Ж. Д. Применение метода Stacking-InSAR для анализа изменений высоты лесного полога // Исслед. Земли из космоса. 2024. № 4. С. 69–76. DOI: 10.31857/S0205961424040067.
3. Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Добрынин С. И. и др. Оптико-микроволновая диагностика залесения сельскохозяйственных земель // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 168–180. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-168-180.
4. Захаров А. И., Смирнов В. М., Яковлев О. И. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.: Красанд, 2012. 248 с.
5. Киселева Е. А., Михайлов В. О., Смольянинова Е. И., Дмитриев П. Н. К вопросу мониторинга смещений земной поверхности методами радарной спутниковой интерферометрии // Современные

- проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 122–134. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-122-132.
6. Чимитдоржиев Т.Н., Захаров А.И., Татьков Г.И., Хантанов В.Б., Дмитриев А.В., Будаев Р.Ц., Цыбенков Ю.Б. Исследование криогенных деформаций грунта в дельте реки Селенга с помощью спутниковой РСА-интерферометрии и наземного георадарного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 58–63.
 7. Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Кирбизжекова И.И. и др. Дистанционные оптико-микроволновые измерения параметров леса: современное состояние исследований и экспериментальная оценка возможностей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 9–26. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-9-24.
 8. Cloude S. Polarisation: Applications in remote sensing. Oxford: Oxford University Press, 2009. 453 p.
 9. Cloude S.R., Papathanassiou K.P. Polarimetric SAR interferometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1998. V. 36. No. 5. P. 1551–1565. DOI: 10.1109/36.718859.
 10. Dagurov P.N., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dobrynin S.I. Estimation of snow water equivalent from L-band radar interferometry: simulation and experiment // Intern. J. Remote Sensing. 2020. V. 41. No. 24. P. 9328–9359. DOI: 10.1080/01431161.2020.1798551.
 11. Hu S., Xiu Q., Ballester-Berman J.D. et al. A general three-component polarimetric SAR interferometry target decomposition // Advances in Space Research. 2024. V. 74. Iss. 11. P. 5428–5437. DOI: 10.1016/j.asr.2024.08.043.
 12. Joshi S.K., Kumar S. Spaceborne PolInSAR tomography for vertical profile retrieval of forest vegetation // J. Applied Remote Sensing. 2017. V. 11. No. 1. Article 016001. DOI: 10.1117/1.JRS.11.016001.
 13. Lee J.-S., Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics to applications. Boca Raton: CRC Press, 2009. 398 p.
 14. Papathanassiou K.P., Cloude S.R. Single-baseline polarimetric SAR interferometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. No. 11. P. 2352–2363. DOI: 10.1109/36.964971.
 15. Qiao H., Zhang P., Li Z. et al. A new snow depth retrieval method by improved hybrid DEM differencing and coherence amplitude algorithm for PolInSAR // J. Hydrology. 2024. V. 628. Article 130507. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130507.
 16. Sandwell D.T., Price E.J. Phase gradient approach to stacking interferograms // J. Geophysical Research: Solid Earth. 1998. V. 103. No. B12. P. 30183–30204. DOI: 10.1029/1998JB900008.
 17. Seppi S., López-Martínez C., Joseau M.J. An assessment of SAOCOM L-band PolInSAR capabilities for canopy height estimation: A case study over managed forests in Argentina // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2024. V. 17. P. 5001–5014. DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3363435.
 18. Xing C., Wang H., Zhang Z. et al. A review of forest height inversion by PolInSAR: Theory, advances, and perspectives // Remote Sensing. 2023. V. 15. No. 15. Article 3781. DOI: 10.3390/rs15153781.
 19. Zakharov A., Zakharova L. An influence of snow covers on the radar interferometry observations of industrial infrastructure: Norilsk thermal power plant case // Remote Sensing. 2023. V. 15. No. 3. Article 654. DOI: 10.3390/rs15030654.

PolInSAR-based estimation of young pine forest height in winter using TerraSAR-X/TanDEM-X data

T.N. Chimitdorzhiev, I.I. Kirbizhekova, A.V. Dmitriev

Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude 670047, Russia

E-mail: tchimit@ipms.bscnet.ru

In the context of carbon neutrality challenges, reliable quantification of carbon sequestration by Siberian boreal forests is crucial, particularly for vast areas currently undergoing post-fire recovery. Such assessments require accurate measurements of key forest biophysical parameters — biomass and height, including these of young trees. This study presents a novel methodology for estimating winter-time height of young pine regrowth using fully polarimetric X-band bistatic radar data from TerraSAR-X/TanDEM-X. The proposed technique analyzes the multimodal distribution of the interferometric phase of surface scattering component and estimates the range of its most probable values,

with surface scattering component identified through PolInSAR (Polarimetric Interferometric SAR) processing. The fundamental premise is that snow cover on upper branches and needles, combined with the vegetation itself, forms a reflecting surface in areas with clustered tree crowns. This composite surface represents the upper phase center, while the snow-covered ground between the tree clusters constitutes the lower phase center of surface scattering. The vertical separation between these centers provides an estimate of average height of sparse young forest stands. The height estimation procedure involves measuring the width of the dominant mode in the surface scattering phase distribution through analysis of the probability density function derivative and theoretical range standard deviation $(2-3)\sigma$. Validation results demonstrate the method's applicability for specific stages of pine forest regeneration and reforestation. A key limitation of this approach is that the measurable height difference between the phase centers (for surface and volume scattering mechanisms) must remain within the system's height ambiguity limit 2π .

Keywords: satellite radar, X-band, polarimetric interferometry, PolInSAR, scattering mechanisms, surface scattering, double-bounce scattering, volume scattering, phase shift, forest regeneration, snow cover

Accepted: 05.06.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-101-117

References

1. Bondur V. G., Chimitdorzhiev T. N., Kirbizhekova I. I., Dmitriev A. V., Radar detection of anomalous dynamics of perennial heaving mounds from the example of the Yamal mound/crater in 2020, *Doklady Earth Sciences*, 2022, V. 506, No. 1, pp. 654–660, DOI: 10.1134/S1028334X22700015.
2. Bondur V. G., Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Nomshiev Zh. D., Application of the Stacking-InSAR method for analyzing changes in forest canopy height, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2024, No. 4, pp. 69–76 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961424040067.
3. Dmitriev A. V., Chimitdorzhiev T. N., Dobrynin S. I. et al., Optical-microwave diagnostics of agricultural land afforestation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 4, pp. 168–180 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-168-180.
4. Zakharov A. I., Smirnov V. M., Yakovlev O. I., *Sputnikovyi monitoring Zemli: Radiolokatsionnoe zondirovanie poverkhnosti* (Satellite Earth observation: Radar remote sensing of the surface), Moscow: Krasand, 2012, 248 p. (in Russian).
5. Kiseleva E. A., Mikhailov V. O., Smolyaninova E. I., Dmitriev P. N., On monitoring surface displacements of natural terrains using SAR interferometry, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 5, pp. 122–134 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-122-132.
6. Chimitdorzhiev T. N., Zakharov A. I., Tatkov G. I., Haptanov V. B., Dmitriev A. V., Budaev R. C., Cybenov J. B., Study of soils cryogenic deformation in Selenga River delta by means of SAR interferometry and georadar sounding, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 5, pp. 58–63 (in Russian).
7. Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Kirbizhekova I. I. et al., Remote optical-microwave measurements of forest parameters: modern state of research and experimental assessment of potentials, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 4, pp. 9–24 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-9-24.
8. Cloude S., *Polarisation: Applications in remote sensing*, Oxford: Oxford University Press, 2009, 453 p.
9. Cloude S. R., Papathanassiou K. P., Polarimetric SAR interferometry, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1998, V. 36, No. 5, pp. 1551–1565, DOI: 10.1109/36.718859.
10. Dagurov P. N., Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Dobrynin S. I., Estimation of snow water equivalent from L-band radar interferometry: simulation and experiment, *Intern. J. Remote Sensing*, 2020, V. 41, No. 24, pp. 9328–9359, DOI: 10.1080/01431161.2020.1798551.
11. Hu S., Xie Q., Ballester-Berman J. D. et al., A general three-component polarimetric SAR interferometry target decomposition, *Advances in Space Research*, 2024, V. 74, Iss. 11, pp. 5428–5437, DOI: 10.1016/j.asr.2024.08.043.
12. Joshi S. K., Kumar S., Spaceborne PolInSAR tomography for vertical profile retrieval of forest vegetation, *J. Applied Remote Sensing*, 2017, V. 11, No. 1, Article 016001, DOI: 10.1117/1.JRS.11.016001.
13. Lee J.-S., Pottier E., *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*, Boca Raton: CRC Press, 2009, 398 p.
14. Papathanassiou K. P., Cloude S. R., Single-baseline polarimetric SAR interferometry, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, V. 39, No. 11, pp. 2352–2363, DOI: 10.1109/36.964971.

15. Qiao H., Zhang P., Li Z. et al., A new snow depth retrieval method by improved hybrid DEM differencing and coherence amplitude algorithm for PolInSAR, *J. Hydrology*, 2024, V. 628, Article 130507, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130507.
16. Sandwell D. T., Price E. J., Phase gradient approach to stacking interferograms, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, V. 103, No. B12, pp. 30183–30204, DOI: 10.1029/1998JB900008.
17. Seppi S., López-Martínez C., Joseau M. J., An assessment of SAOCOM L-band PolInSAR capabilities for canopy height estimation: A case study over managed forests in Argentina, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, V. 17, pp. 5001–5014, DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3363435.
18. Xing C., Wang H., Zhang Z. et al., A review of forest height inversion by PolInSAR: Theory, advances, and perspectives, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 15, Article 3781, DOI: 10.3390/rs15153781.
19. Zakharov A., Zakharova L., An influence of snow covers on the radar interferometry observations of industrial infrastructure: Norilsk thermal power plant case, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 3, Article 654, DOI: 10.3390/rs15030654.