

Почему космическая радиолокация не может заменить лидарную съемку для определения высот подстилающей поверхности в лесных массивах

Радиолокационные данные дистанционного зондирования Земли из космоса в L и P-диапазонах часто используются службами лесной инвентаризации по всему миру для предварительной оценки наземной биомассы леса (above-ground biomass: AGB)¹. Отсюда родился миф о том, что те же данные могут с успехом применяться для измерения высот деревьев и рельефа, скрытого под кронами. Попробуем разобраться, почему возможности радарных снимков из космоса для решения указанных задач сильно переоценены, какие основные методики измерения высот по данным радиолокационной съемки существуют и где проходят границы их применимости в лесном хозяйстве.

Ключевой характеристикой радиолокационных изображений, показывающей высокую чувствительность к наземной биомассе, является обратное рассеяние. Лучшую корреляцию с AGB имеет рассеяние длинноволнового излучения: в L-диапазоне ($\lambda = 15\text{-}30$ см) и P-диапазоне ($\lambda = 30\text{-}100$ см). Это связано с большой проникающей способностью таких волн, позволяющей отражаться не от верхушек крон, а от стволов и крупных ветвей деревьев, в которых и содержится основная часть наземной биомассы².

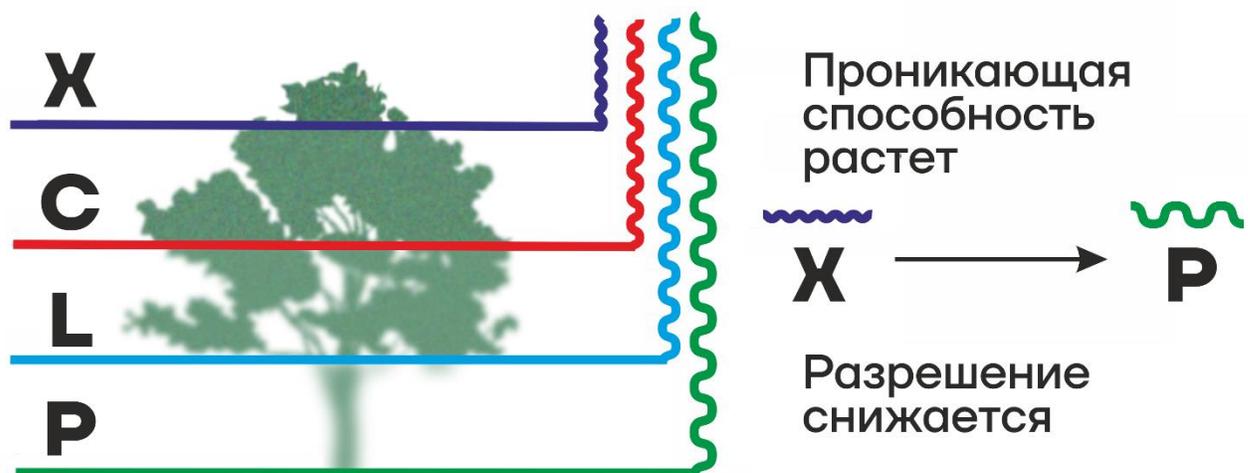


Рисунок 1. Проникающая способность волн разной длины

¹ Dittmann, S.; Thiessen, E.; Hartung, E. Applicability of different non-invasive methods for tree mass estimation: A review. For. Ecol. Manag. 2017, 398, 208–215

² Le Toan, T.; Beaudoin, A.; Riom, J.; Guyon, D. Relating Forest Biomass to SAR Data. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1992, 30, 403–411.

Радиолокационная съемка в Р-диапазоне на сегодняшний день выполняется только с воздуха бортовыми платформами типа E-SAR³, BIOSAR⁴, TropiSAR⁵. Ни одной системы радиолокационной съемки из космоса в Р-диапазоне пока не существует⁶.

В L-диапазоне ситуация иная. Помимо платформ, устанавливаемых на борту самолетов (например, UAVSAR), функционируют космические системы: спутники ALOS, ALOS-2, SMOS, SAOCOM. С 2007 года космическое агентство Японии (JAXA) широко использует данные группировки ALOS для оценки наземной биомассы⁷. На основе работ JAXA и других исследователей удалось установить, что по мере увеличения насыщения биомассы чувствительность материалов радиолокационной съемки к ней снижается. Для данных L-диапазона точность оценки биомассы резко падает после насыщенности на уровне около 100-150 Мегаграмм/га, а для Р-диапазона - на уровне около 200 Мегаграмм/га⁸.

Для решения этой проблемы еще в конце 1990-х гг. ученые предложили дополнить информацию об отражательной способности лесных массивов данными о высотах, используя для этого технологии InSAR⁹, PolInSAR¹⁰ и TomoSAR¹¹.

Суть технологии InSAR (радиолокационной интерферометрии) заключается в построении цифровой модели рельефа (ЦМР) как функции от разности фаз радиолокационных сигналов, отраженных от объектов на земле в результате их съемки одним и тем же сенсором на двух витках движения спутника либо одновременно с нескольких разнесенных в пространстве антенных систем.

³ E-SAR. The Experimental Airborne SAR System of DLR. Available online: https://www.dlr.de/hr/en/Portaldata/32/Resources/dokumente/institut/E_SAR_data_sheet.pdf (дата обращения: 05 апреля 2024).

⁴ Imhoff, M.L.; Johnson, P.; Holford, W.; Hyer, J.; May, L.; Lawrence, W.; Harcombe, P. BioSAR (TM): An inexpensive airborne VHF multiband SAR system for vegetation biomass measurement. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2000, 38, 1458–1462

⁵ Dubois-Fernandez, P.C.; Toan, T.L.; Daniel, S.; Oriot, H.; Chave, J.; Blanc, L.; Villard, L.; Davidson, M.W.J.; Petit, M. The TropiSAR Airborne Campaign in French Guiana: Objectives, Description, and Observed Temporal Behavior of the Backscatter Signal. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2011, 50, 3228–3241

⁶ Hojo A.; Takagi K.; Avtar R.; Tadono T.; Nakamura F. Synthesis of L-Band SAR and Forest Heights Derived from TanDEM-X DEM and 3 Digital Terrain Models for Biomass Mapping. *Remote Sens.* 2020, 12(3), 349

⁷ Avtar, R.; Suzuki, R.; Sawada, H. Natural Forest biomass estimation based on plantation information using PALSAR data. *PLoS ONE* 2014, 9, e86121.

⁸ Wang, Y.; Davis, F.W.; Melack, J.M.; Kasischke, E.S.; Christensen, N.L. The effects of changes in forest biomass on radar backscatter from tree canopies. *Int. J. Remote Sens.* 1995, 16, 503–513

⁹ Bamler, R.; Hartl, P. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Probl.* 1998, 14, R1

¹⁰ Cloude, S.R.; Papathanassiou, K.P. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1998, 36, 1551–1565

¹¹ P. Piau, "Performances of the 3d-sar imagery," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS'94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data. Analysis and Interpretation., International, vol. 4. IEEE, 1994, pp. 2267–2271.*

PollnSAR (поляризационная интерферометрия) представляет собой сочетание радиолокационной интерферометрии (InSAR) и поляриметрии (PolSAR) — технологии обнаружения и классификации объектов на основе их изменчивости в способности отражать, а радиолокатора — в способности испускать и принимать сигналы разной поляризации. Технология PollnSAR позволяет оценить высоты деревьев, используя разницу в проникающей способности разных каналов поляризации¹².

TomoSAR — основанный на построении вертикальных профилей метод радиолокационной томографии, позволяющий улучшить разрешение радиолокационной съемки по высоте за счет совместной интерферометрической обработки комбинаций радиолокационных изображений с разной длиной базовых линий. Недостатки метода — большие затраты времени и средств на организацию многократной съемки, а также повышенные требования к объему вычислительных ресурсов и разработке сложных алгоритмов обработки 3D-данных¹³.

Для получения ЦМР под кронами с использованием длинноволновых данных InSAR существует два наиболее распространенных подхода¹⁴:

- подход, основанный на анализе случайного объема над землей (random volume over ground: RVoG) и
- частотно-временной анализ (time-frequency analysis: TF).

Первый подход опирается на модель RVoG и данные PollnSAR, в котором ЦМР обычно является побочным продуктом инверсии высоты леса. Этот метод используется при оценке высоты деревьев на основе двухчастотных данных InSAR. Коротковолновые радиолокаторы высокой частоты (обычно в X-диапазоне) снимают верхушки крон, а длинноволновые импульсы низкой частоты (в P и L-диапазонах) проникают глубже. Основная проблема метода состоит в том, что модель RVoG рассматривает лес как равномерно распределенный отражатель, что неприменимо к данным в P и L диапазонах, для которых основными отражателями в лесу являются неоднородные стволы деревьев и толстые ветви¹⁵.

Ввиду этого ряд китайских исследователей предложил основанный на субапертурной декомпозиции метод частотно-временного анализа (TF), с помощью которого фазовый центр подстилающей поверхности может быть отделен от общего сигнала. В отличие от полной апертуры, субапертура имеет меньший угол обзора, а

¹² Flores-Anderson A.; Herndon K.; Thapa R.; Cherrington E. Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. The SAR Handbook, 2019

¹³ Xu, K.; Zhao, L.; Chen, E.; Li, K.; Liu, D.; Li, T.; Li, Z.; Fan, Y. Forest Height Estimation Approach Combining P Band and X-Band Interferometric SAR Data. Remote Sens. 2022, 14, 3070

¹⁴ Там же

¹⁵ Там же

потому с ее помощью поверхность земли “увидеть” легче. На сегодняшний день именно подход частотно-временного анализа является наиболее перспективным с точки зрения возможностей получения высокоточных моделей подстилающей поверхности под кронами деревьев с использованием длинноволновых радиолокационных данных¹⁶.

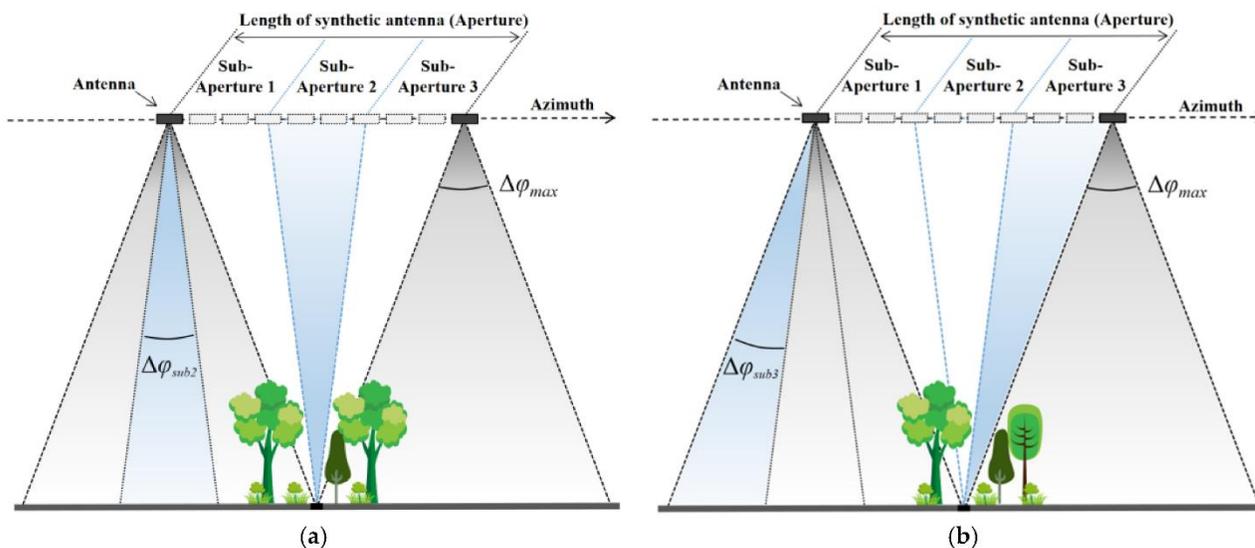


Рисунок 2. Принципиальная схема проникающей способности лесов разного типа на радиолокационных изображениях с различными субапертурами: (а) Лучшее проникающее действие у субапертуры 2; (б) Лучшее проникающее действие у субапертуры 3

Тестирование технологии TF путем проведения аэросъемки и ее валидация по данным лидарной съемки были реализованы на примере участков в Китае¹⁴ и Швеции¹⁵. Матрицы разностей высот, полученные путем вычитания ЦМР, созданных по лидарным данным, из ЦМР, построенных по радиолокационным данным аэросъемки в Р-диапазоне с разрешением 1,5 м по азимуту и наклонной дальности, характеризуются средней квадратической ошибкой (RMSE) 1 - 2 метра.

Авторы исследований подчеркивают, что полученные точности справедливы только при использовании материалов аэросъемки в Р-диапазоне и не могут в полной мере распространяться на данные съемки из космоса, как из-за отсутствия космических радиолокаторов в Р-диапазоне, так и ввиду меньшего разрешения данных, получаемых со спутников в близком, но не являющемся аналогом L-диапазоне. Лучшее разрешение среди космических аппаратов L-диапазона – у

¹⁶ Fu, H.; Zhu, J.; Wang, C.; Wang, H.; Zhao, R. Underlying topography estimation over forest areas using high-resolution P-band single-baseline PolInSAR data. Remote Sens. 2017, 9, 363

японского ALOS PALSAR-2 (1 м по азимуту и 3 м по наклонной дальности в режиме съемки Spotlight, ширина сцены 25 x 25 км).

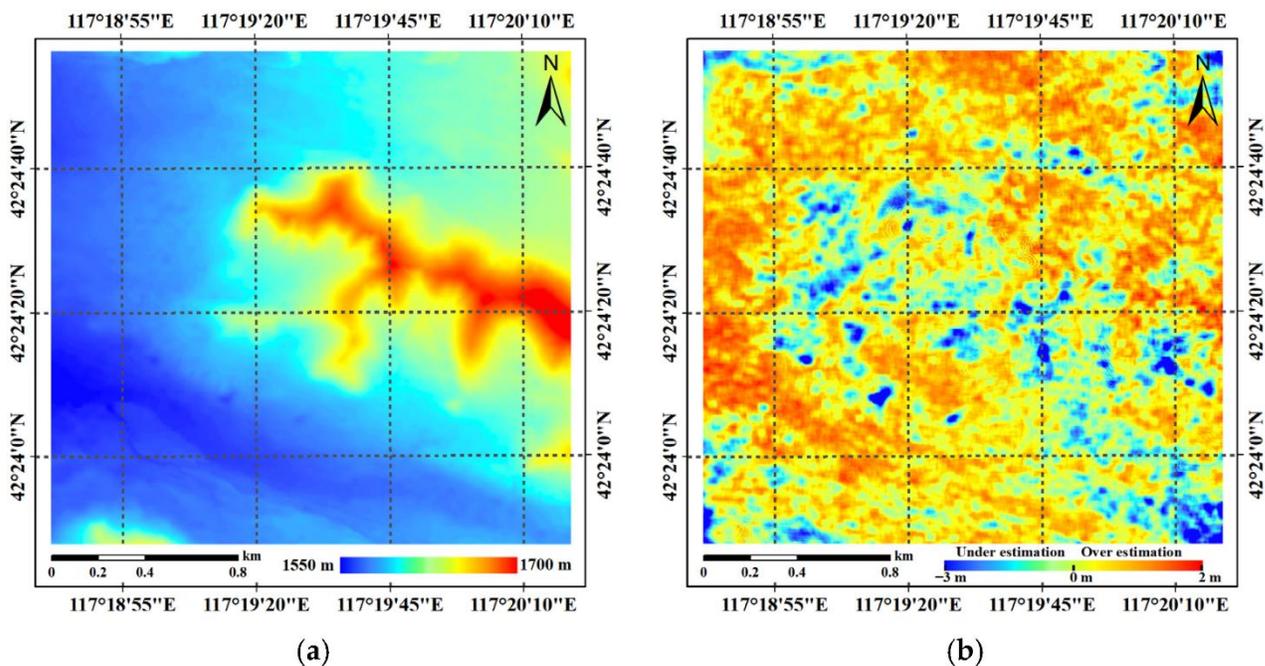


Рисунок 3. Цифровая модель рельефа, полученная по радиолокационным данным Р-диапазона, и матрица разностей ее высот с ЦМР, полученной по лидарным данным. Китай, провинция Хэбэй

Из-за того, что размер пиксела изображений из космоса больше размера открывающих подстилающую поверхность промежутков между кронами деревьев, неизбежно смешение отражений от неоднородных и разнонаправленных стволов и ветвей, увеличение спекл-шума, а значит, и значительное превышение среднего фазового центра общего сигнала над истинной высотой рельефа.

Отсюда следует и другое ограничение — возможность использования метода для обнаружения подстилающей поверхности только в лесах со средней и низкой степенью сомкнутости крон.

Кроме того, метод TF увеличивает вероятность обнаружения радиолокатором открытой поверхности земли только за счет изменения угла наблюдения в азимутальном направлении, не учитывая сильное влияние угла обзора и проникающей способности леса в направлении наклонной дальности.

Помимо все прочего, лимитирующими факторами метода частотно-временного анализа, как и всех других технологий радиолокационной интерферометрии, являются атмосферный и ионосферный эффекты, а также эффект временной декорреляции. Листовой покров растений в период вегетации меняется

очень сильно. Чем больше разница во времени между съемками для образования интерферометрической пары, тем выше неопределенность при корегистрации таких изображений, и соответственно, ниже точность определения высот и превышений.

Таким образом, использование радиолокационных данных в длинноволновых диапазонах спектра для извлечения высот подстилающей поверхности в лесах зависит от большого числа лимитирующих факторов, связанных, как с сомкнутостью леса, так и со спецификой съемочного устройства и организации съемки.

Наиболее продвинутый подход к измерению высот рельефа под кронами — метод частотно-временного анализа — показывает наилучшую точность в ходе съемки лесов низкой или умеренной сомкнутости в Р-диапазоне. Однако такими сенсорами на данный момент оснащаются только авиационные носители.