

Интеркалибровка космических РСА различных частотных диапазонов по наблюдениям тропических лесов Амазонки

А.И. Захаров, Л.Н. Захарова

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН (ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН)
141190 Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1.
E-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru*

Проведен обзор исследований радиофизических свойств тропических лесов Амазонки с помощью космических скаттерометров и радаров с синтезированной апертурой. Отмечено, что вследствие высокого уровня наземной биомассы лесов уровень отраженного лесами в среднем практически одинаков во всех стандартных частотных диапазонах от X до L. Приведены графики распределения удельной эффективной площади рассеяния в этих диапазонах по территории тестового участка в национальном парке Риу-Негру, подтверждающие совпадение локальных радиофизических характеристик лесов. Сделано заключение о возможности использования тестовых участков в тропических лесах Амазонки для интеркалибровки радаров различных частотных диапазонов, в том числе отечественного радара S-диапазона «Кондор-ФКА».

Ключевые слова: радар с синтезированной апертурой, тропические леса Амазонки, насыщение, радиометрическая калибровка, ЭПР, УЭПР

Intercalibration of spaceborne SARs in different frequency bands over the Amazon rain forests

A.I. Zakharov, L.N. Zakharova

Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, RAS (Kotelnikov FIRE RAS)

The survey of radiophysical studies of Amazon rain forests with spaceborne scatterometers and synthetic aperture radars was conducted. It was noted that because of high level of the forests above ground biomass the signal backscatter level is practically the same in all the standard frequency bands, from X to L. The plots of normalized radar cross-section of forest cover over the test territory in national reserve park Rio Negro presented confirm the concurrence of the local scattering properties. The conclusion about the applicability of Amazon rain forests for the radars intercalibration in different frequency bands as well as absolute radiometric calibration of prospective domestic S-band SAR «Kondor-FKA» is made.

Keywords: synthetic aperture radar, Amazon rain forests, saturation, radiometric calibration, RCS, NRCS

Введение

Абсолютная радиометрическая калибровка космической радиолокационной аппаратуры является обязательной процедурой, обеспечивающей достоверные измерения радиофизических свойств земных покровов. Традиционным средством абсолютной калибровки являются уголковые отражатели (УО), эффективная площадь рассеяния которых (ЭПР) может быть очень точно оценена исходя из их геометрических размеров и формы граней. Стабильность отражательных свойств УО обеспечивается жесткостью их конструкции и точностью его наведения в сеансе съемки, а точность измерения ЭПР зависит от степени превышения сигнала над фоновыми отражениями

подстилающей поверхности. Из практики применения УО для калибровки следует, что точность измерения ЭПР, и, таким образом, точность калибровки может быть лучше 0,3 дБ. Несколько хуже, порядка 0,3-0,5 дБ, точность формирования ЭПР активных приемо-передатчиков или транспондеров.

Альтернативой специализированным точечным калибровочным пассивным отражателям типа УО или транспондеров могут быть естественные протяженные объекты. Высокий уровень стабильности отражения демонстрируют растительные покровы (леса), ледовые поверхности высокоширотных поясов Антарктиды, пустынные территории Южной Америки и др. Одним из важных достоинств лесных покровов является модельная форма угловой зависимости УЭПР (обозначаемая σ^0) леса от угла падения волн, в результате чего отражательная характеристика γ^0 , равная $\sigma^0/\cos\theta$, не зависит от угла падения θ .

Особенности рассеяния зондирующего сигнала лесными покровами

УЭПР лесных массивов зависит как от радиофизических свойств растительного слоя, так и от параметров радиолокационной съемки: поляризации передающей и приемной антенн, угла зондирования, частоты зондирующего сигнала. Чем больше длина волны, тем глубже проникает сигнал сквозь кроны деревьев, тем большие объемы лесной биомассы участвуют в обратном рассеянии. В Р- и L-диапазонах (длины волн 70 и 23 см), например, существенно взаимодействие электромагнитного поля с крупными ветвями, стволами и почвенным покровом, В С- и Х-диапазонах (длины волн 6 и 3 см) доминирует рассеяние на мелких ветвях, листьях или иголках. Определенную роль в формировании отраженного к радару сигнала играет многократное переотражение на ветках крон, двойное переотражение от системы ствол-земля, отражение от подстилающей земной поверхности, а также затухание в кроне дерева. Структурные особенности кроны дерева являются причиной различия в уровне отражения сигнала на вертикальной и горизонтальной поляризациях, и это необходимо учитывать при использовании радарных данных при решении тематических задач.

Наблюдается монотонная зависимость уровня отраженного сигнала и биомассой растительного слоя, которую описывают многочисленными аллометрическими уравнениями, и что является основой для оценки биомассы леса. На рис.1 ниже приведены усредненные приблизительные зависимости УЭПР леса от биомассы растительности в тоннах на гектар. Ku, X, C, S, L, P здесь — это обозначения частотных диапазонов, выделенных для работы РСА из космоса.

На графиках видно, что существует такое явление как насыщение, заключающееся в нечувствительности измерений УЭПР к росту биомассы начиная с некоторого порогового значения. Порог насыщения зависит от длины волны зондирующего сигнала. При зондировании в С-диапазоне насыщение наступает на уровне 50 т/га, а в L-диапазоне — при 100 т/га. Максимально возможный уровень ЭПР оказывается примерно равным при зондировании в различных стандартных диапазонах частот.

Тропические леса Амазонки занимают громадные территории таких стран как Бразилия, Перу, Колумбия и Эквадор. Стабильные сезонные погодные условия (высокая влажность покровов вследствие практически каждодневных дождевых осадков при годовом объеме порядка 2200 мм и стабильно высокая температура воздуха в пределах 27-280) являются причиной высокой стабильности отражательных свойств этих лесов, что подтверждено в многочисленных космических скаттерометрических и радиолокационных съемках. Благодаря этому тропические леса Амазонки стали де-факто стандартным полигоном для интеркалибровки космических РСА, работающих в одном и том же частотном диапазоне.

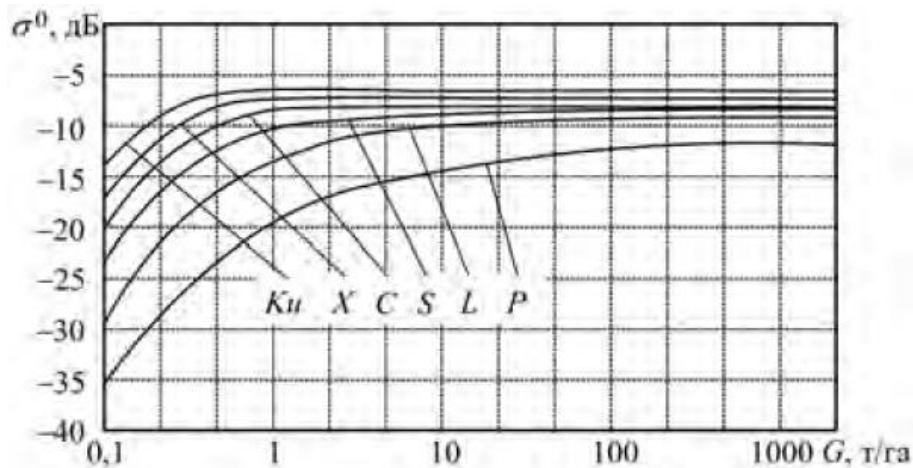


Рис. 1. Усредненные значения УЭПР на согласованной поляризации сигнала для растительности с разным объемом биомассы [1]

Радиофизические исследования тропических лесов Амазонки

Примечательной особенностью тропических лесов Амазонки является в целом их высокая пространственная однородность и высокий объем наземной биомассы. На рис. 2 приведена карта распределения биомассы тропических лесов: от 500 т/га (темно-зеленые тона) до первых десятков т/га в долинах рек и ручьев, где преобладает разреженная растительность (желтые цвета) [2].

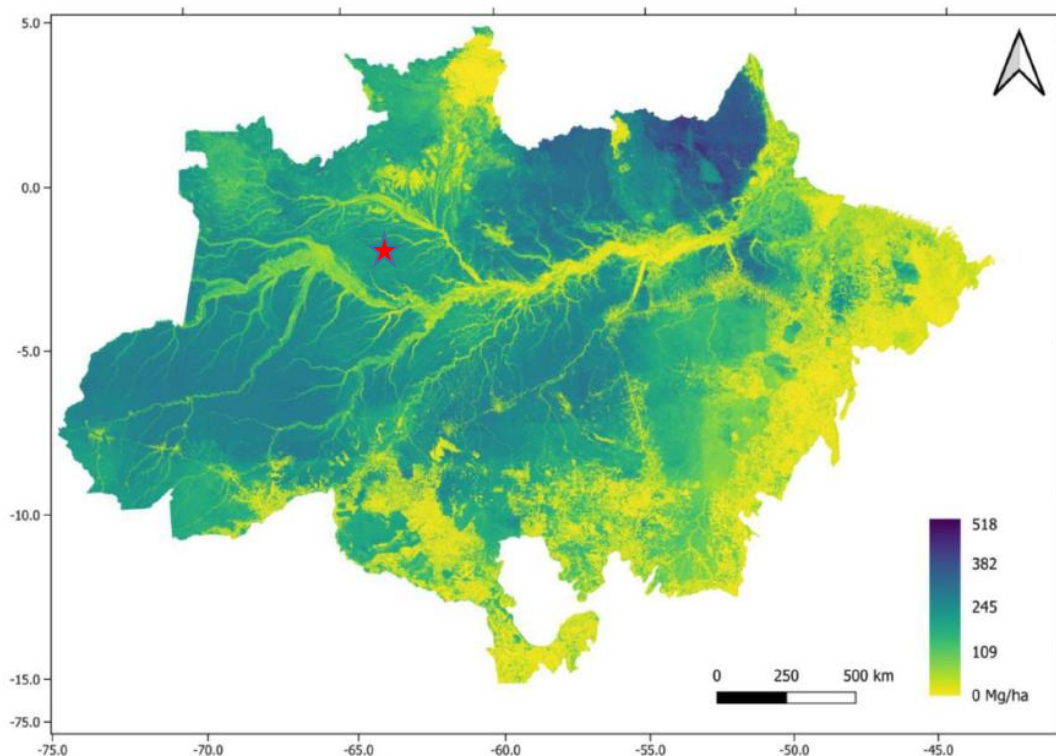


Рис. 2. Карта распределения надземной биомассы (т/га) в Амазонии [2]

Сведения о глобальных характеристиках отражательных свойств лесов Амазонки были получены различными космическими радиофизическими средствами в разных диапазонах волн на длительных интервалах времени. Один из первых экспериментов, показавших уникальную стабильность лесов, был проведен с помощью скаттерометра

SASS Ku-диапазона со спутника Seasat в 1978 году. Среднее значение σ^0 лесов Амазонки оказалось равным -7,6 дБ при угле падения 40° , оно менялось от -6,7 дБ ранним утром до -7,6 дБ в полдень [3,4]. Измерения на вертикальной и горизонтальной поляризациях совпадали. Стабильность отражательных свойств лесов оказалась равной 0,1-0,2 дБ.

Наиболее полный длительный массив измерений был получен с помощью многолучевых скаттерометров С-диапазона, работавших более 10 лет на спутниках ERS-1/2 начиная с 1991 года [5]. Обнаружено, что среднее значение γ^0 равно -6,5 дБ. В съемках как на нисходящем, так и на восходящем витках заметно наличие медленных сезонных изменений с амплитудой примерно 0,15 дБ, модулированных шумоподобными вариациями с амплитудой около 0,05 дБ.

Громадный объем наблюдений отражательных свойств лесов Амазонки был выполнен и в L-диапазоне с помощью японского PCA JERS-1 в 1991-1997 гг. [6]. Среднее значение γ^0 в этих измерениях близко к -6 дБ и примерно равно тому, что получено в С-диапазоне по данным радаров ERS (-6,5 дБ). Отражательные характеристики σ^0 и γ^0 отличаются здесь на ~ 1 дБ из-за косинуса угла падения волн. Суммарный итог наблюдений отражательных свойств лесов Амазонки по данным японского PCA JERS-1 приведен в таблице 1.

Таблица 1. Глобальные отражательные свойства лесов Амазонки по данным JERS-1

Сезон года		σ^0		γ^0	
		среднее	с.к.о.	среднее	с.к.о.
1	суммарно	-6,92 дБ	0,23 дБ	-5,83 дБ	0,23 дБ
2	сухой	-7,08 дБ	0,18 дБ	-5,99 дБ	0,18 дБ
3	влажный	-6,81 дБ	0,2 дБ	-5,72 дБ	0,2 дБ

Большой объём измерений отражательных свойств лесов в X-диапазоне был выполнен в миссии TanDEM-X [7]. Выяснилось, что хотя тропические леса кажутся довольно стабильным и изотропным объектом, уровень γ^0 медленно снижается примерно от -6,2 дБ до -7 дБ при увеличении угла падения от 25° до 50° . Кроме того, на величину γ^0 влияет время съемки: на вечерних изображениях (съемки с восходящего витка) уровень сигнала на 0,5 дБ ниже по сравнению с сигналами на изображениях, полученных утром (на нисходящих витках). Уровень сигнала на поляризации HH на 0,5 дБ больше, чем на поляризации VV.

Локальные отражательные характеристики леса в национальном парке Риу-Негру

Тестовый участок (отмечен звездочкой на рис. 2) расположен к западу от города Манаус, между реками Солимоинс с юга и Риу-Негру с севера. Уровень биомассы растительности на этой территории превышает 150 т/га, вследствие чего отражение в диапазонах от X до L находится в состоянии насыщения. Одним из достоинств этого участка является сравнительно высокая однородность покровов: по данным [8] вариации УЭПР в С-диапазоне здесь не превышают 0,33 дБ. Приведённые ниже графики распределения σ^0 по наклонной дальности построены по данным съемок аппаратов L-, С- и X-диапазонов на восходящих витках с примерно одним и тем же углом падения волн и по одной и той же территории национального парка Риу-Негру. На графике рис. 3 даны усредненные по 1000 строк измерения PCA PALSAR для 9344 отсчетов по дальности, что соответствует полосе длиной примерно 50 км. Среднее значение σ^0 здесь -7,1 дБ. Необходимо отметить постоянство уровня отражения вдоль строки, которое можно объяснить однородностью растительных покровов в зоне съемки.

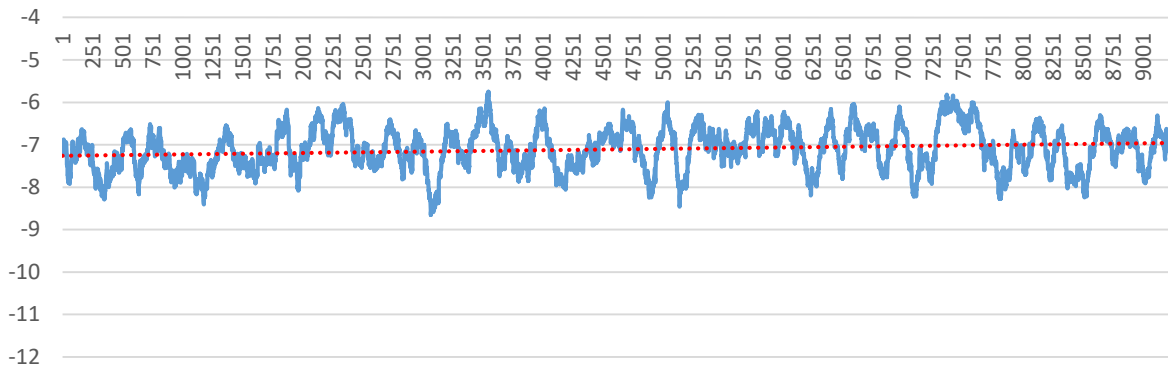


Рис. 3. График распределения УЭПР леса по строке изображения РСА L-диапазона

На графике рис. 4 даны усредненные по 1000 строк измерения РСА Sentinel-1 для 24000 отсчетов по дальности, что соответствует примерно полосе длиной 80 км. Среднее значение σ^0 здесь -7,2 дБ. Также необходимо подчеркнуть уровня отражения вдоль строки по дальности.

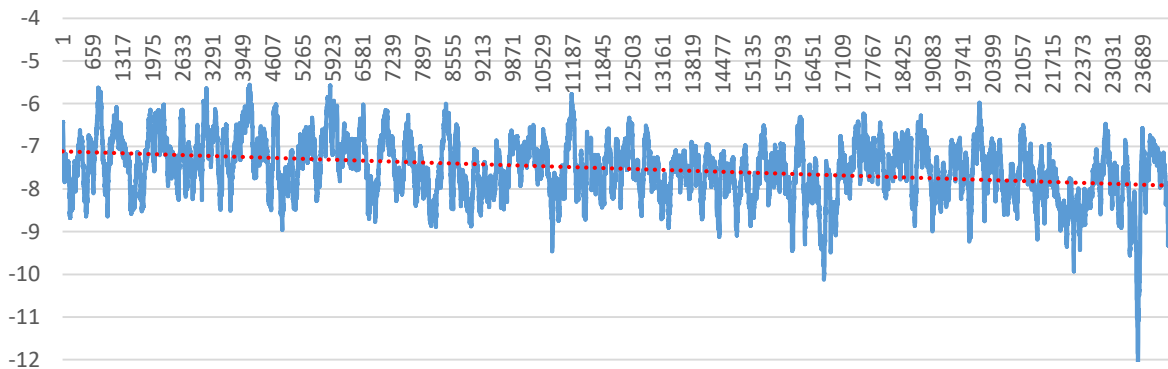


Рис. 4. График распределения УЭПР леса по строке изображения РСА С-диапазона

На графике рис. 5 также даны усредненные измерения РСА TerraSAR-X, но здесь проведено усреднение и по массиву строк, и по 30 отсчетам по дальности. При результирующем разрешении по наземной дальности 100 м длина полосы по наземной дальности равна 30 км. Среднее значение σ^0 здесь -7,12 дБ. Также необходимо подчеркнуть стабильность уровня отражения вдоль строки по дальности.

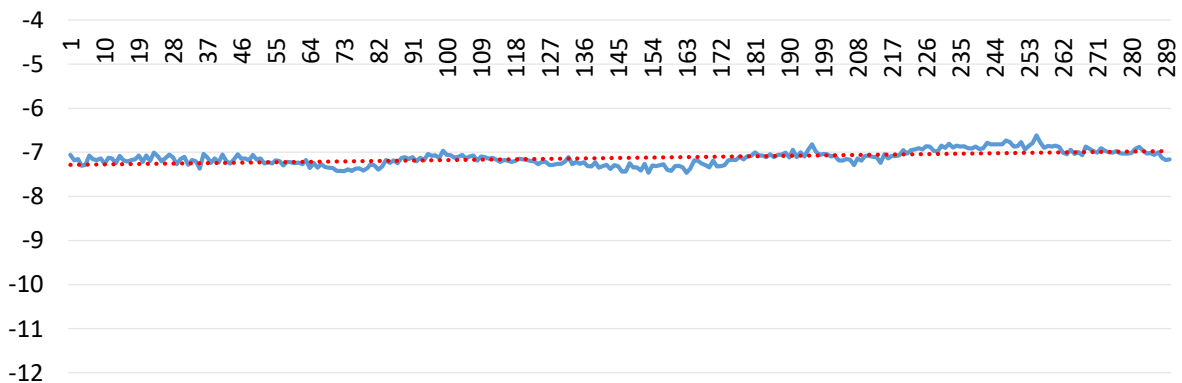


Рис. 5. График распределения УЭПР леса по строке изображения РСА X-диапазона

Средние значения σ^0 на графиках для L-, C-, X-диапазонов оказываются практически одинаковыми оттого, видимо, что в случае большой, больше 150 т/га, биомассы отражение в этих диапазонах формируется только кроной дерева, оно не зависит от локальных вариаций биомассы. Величины σ^0 близки, хотя и не совпадают с усредненными отражательными характеристиками, позаимствованными из [3-7] и приведенными в тексте выше. Структурные особенности крон могут оказывать влияние на отражательные свойства, а потому при необходимости выполнения интеркалибровки разных РСА необходимо проводить съемки одного и того же участка местности. Кроме того, для надежности измерений необходимо проводить их при повторяющихся углах падения волн, в одни и те же сезоны года.

Немаловажным следствием полученных результатов может быть заключение о возможности абсолютной радиометрической калибровки радаров других частотных диапазонов, например, перспективного РСА S-диапазона «Кондор-ФКА» (длина волны 9,6 см), предполагая, что уровень σ^0 при угле падения порядка 400 будет равен -7 дБ.

Выводы

Вследствие высокого уровня надземной биомассы лесов уровень отраженного тропическими лесами Амазонки в среднем практически одинаков, в пределах 0.5 дБ, во всех стандартных частотных диапазонах от X до L. Локальные характеристики лесных покровов на территории тестового участка в национальном парке Риу-Негру при зондировании в этих диапазонах совпадают с хорошей точностью, что позволяет сделать заключение о возможности использования тропических лесов Амазонки для интеркалибровки радаров различных частотных диапазонов, в том числе перспективного отечественного радара S-диапазона «Кондор-ФКА». Поскольку структурные особенности крон могут оказывать влияние на отражательные свойства, необходимо проводить интеркалибровку РСА разных частотных диапазонов, снимая одну и ту же территорию. Кроме того, для надежности измерений необходимо проводить их при повторяющихся углах падения волн, в одни и те же сезоны года.

Работа выполнена по государственному заданию Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования/ Под ред. В.С. Вербы – М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
2. Ometto, J.P., Gorgens, E.B., de Souza Pereira, F.R. et al. A biomass map of the Brazilian Amazon from multisource remote sensing// Sci Data. 2023. Vol. 10. P. 668.
3. Long D.G. and Hardin P.J. Vegetation studies of the Amazon basin using enhanced resolution Seasat scatterometer data// IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing. 1994. Vol. 32. No. 2. P. 449–460.
4. Birrer I.J., Bracalente E.M, Dome G.J., Sweet J. and Berthold G. σ^0 Signature of the Amazon Rain Forest Obtained from the Seasat Scatterometer// IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1982. Vol. GE-20. No. 1. P. 11-17.
5. Hawkins R. et al. Stability of Amazon backscatter at C-band: Spaceborne results from ERS-1/2 and RADARSAT-1// Proc. SAR Workshop: CEOS Committee Earth Observ. Satell. 2000. P. 99.
6. Shimada M. Long-term stability of L-band normalized radar cross section of Amazon rainforest using the JERS-1 SAR Can. J. Remote Sensing. 2005. Vol. 31(1). P. 132–137.

7. Dell'Amore L., Bueso-Bello J., Klenk P., Reimann J., and Rizzoli P. Characterization of the Amazon Rainforest Backscatter at X-Band Using TanDEM-X Data// IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2024. Vol. 17. P. 1673-1690.
8. <https://calvalportal.ceos.org/web/guest/sarcv> //Электронный ресурс. Дата доступа 15.03.2024.