

О радиометрической калибровке РСА «Кондор-ФКА» с помощью распределенных объектов – тропических лесов Амазонки

А.Н. Рабочий¹, А.И. Захаров², Г.В. Лебедев¹, М.Г. Красногорский¹

¹ Акционерное общество «ВПК «НПО машиностроения»

Россия, 143960, Московская область, г. Реутов, ул. Гагарина, д.33

Email: vpk@vpk.promash.ru

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН

Россия, 141190, Московская область, г. Фрязино, пл. Введенского, д.1

E-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru

Продemonстрированная в докладе высокая временная стабильность отражательных свойств тестового участка тропического леса по данным РСА Sentinel-1 позволила использовать этот участок для внешней радиометрической калибровки РСА КА «Кондор-ФКА». В ряде сеансов, проведенных отечественным радаром на полугодовом интервале времени под различными углами обзора, измерен уровень отраженного лесными покровами сигнала и выявлено, что среднеквадратичное отклонение измерений находится в пределах 0.14 дБ, что удовлетворяет техническим требованиям. Сделана оценка радиометрической чувствительности РСА и ширины диаграммы направленности бортовой антенны.

Ключевые слова: радар с синтезированной апертурой (РСА), удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР), космический аппарат, Sentinel-1, «Кондор-ФКА»

On the radiometric calibration of «Kondor-FKA» SAR over the distributed targets–Amazon rain forests

A.N. Rabochy¹, A.I. Zakharov², G.V. Lebedev¹, M.G. Krasogorsky¹

¹ Joint stock company "MIC "NPO Mashinostroyeniya"

² Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, RAS

High temporal stability of scattering properties in a tropical forest test area demonstrated in the report according to Sentinel-1 SAR data made it possible to use this area for external radiometric calibration of the «Kondor-FKA» satellite radar. In a series of sessions conducted by Russian radar during six-month period at various observation angles, the signal level reflected by forest cover was measured and found to be within 0.14 dB, meeting technical requirements. SAR radiometric sensitivity and the onboard antenna pattern beamwidth were assessed also.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), normalized radar cross section (NRCS), satellite, Sentinel-1, «Kondor-FKA»

Введение

Радиометрическая калибровка научной аппаратуры — процедура, обеспечивающая достоверность измеряемых свойств зондируемой поверхности в радиофизических моделях рассеяния. Общепринятым способом калибровки радаров с синтезированной апертурой (РСА) является внешняя калибровка, в ходе которой эталонные калибровочные средства размещают на снимаемой поверхности. Традиционные средства внешней калибровки — это пассивные эталонные цели (в первую очередь, уголкового отражатели) и активные цели: транспондеры или активные радарные калибраторы. Типовая точность калибровки с применением уголкового отражателя порядка 0.15 дБ была достигнута в проекте TerraSAR-X (X-диапазон) при использовании уголкового отражателя с ребром 2 м [1], а в проекте ALOS PALSAR-1

(L-диапазон) она была в пределах 0.67 дБ для уголков с ребром 2-2.5 м, причем в экспериментах с 5-метровыми уголками она была в пределах 0.17 дБ [2]. В работе [3] рассматривался вопрос об использовании объектов инфраструктуры, являющихся яркими точечными целями, в различных регионах России, однако за редкими исключениями круглогодичная стабильность этих целей чаще всего хуже 0.5 дБ. Естественные протяженные калибровочные объекты могли бы быть ещё одной альтернативой калибровки с использованием специализированной калибровочной аппаратуры. Тропические леса Амазонки — общеизвестный и фактически эталонный участок для калибровки космических РСА разных диапазонов волн. Использование естественных стабильных по отражающим характеристикам протяженных объектов представляется экономически и технологически выгодным способом калибровки и контроля характеристик РСА в ходе всего срока активного существования космических РСА.

Тестовый участок для радиометрической калибровки

Вследствие постоянно высокой влажности из-за практически непрерывных осадков в течение года при общем количестве осадков 2300 мм в год и практически постоянной температуре воздуха 27°C...28°C, тропические леса Амазонки оказываются привлекательным объектом для интеркалибровки космических РСА. Примечательной особенностью тропических лесов Амазонки является в целом их высокая пространственная однородность и высокий объем наземной биомассы, вследствие чего их отражательные свойства меняются в весьма небольших пределах на больших пространственных интервалах. В работе [1] показано, что УЭПР лесов Амазонки в разных диапазонах близка, наблюдаемое отличие не превышает 1 дБ. Наблюдается монотонная зависимость уровня УЭПР от длины волны РСА — чем больше длина волны, тем меньше УЭПР.

Благодаря широкой доступности калиброванных радиолокационных снимков этой территории, сделанных зарубежными космическими РСА в L и C частотных диапазонах, можно сделать заключение об отражательных свойствах лесов в промежуточном, S диапазоне и использовать полученные оценки УЭПР для абсолютной радиометрической калибровки перспективных РСА S-диапазона, таких, как РСА космического аппарата (КА) «Кондор-ФКА». Приводимые далее уровни отражательных свойств лесных покровов будут даваться в двух вариантах — σ^0 или сигма-ноль и γ или гамма, в децибелах.

Описание отражательных свойств леса в единицах γ предпочтительно из-за нечувствительности к углу падения волн. Связь между σ^0 и γ такова:

$$\gamma = \frac{\sigma^0}{\cos \theta},$$

где θ — угол падения волн.

Выберем в качестве тестового участка район, отмеченный желтым прямоугольником на радиолокационном снимке РСА КА «Кондор-ФКА» (см. рис. 1). Сезонная зависимость отражательных свойств указанного тестового участка в S-диапазоне в по серии из 28 снимков РСА Sentinel-1, снятых с интервалом 12 дней в период с 01.01.2024 по 07.01.2025, представлена в виде графиков на рис. 2. Значения γ здесь получены усреднением измерений РСА в прямоугольнике размером 7*10 км.

На графике измерений γ на VV поляризации четко выделяются сезон дождей с конца декабря начало сентября со стабильным уровнем γ около 6.3 дБ, а также сезон сухой погоды — с начала сентября по конец средину декабря с падением γ на 0.6 дБ. Особо стоит отметить стабильность γ в период дождей, с начала января по средину сентября, когда все перепады γ на VV поляризации находятся в узком диапазоне 0.2 дБ.

Предположив среднее значение γ равным -6.3 дБ, получим среднеквадратичное отклонение (с.к.о.) равным 0.08.

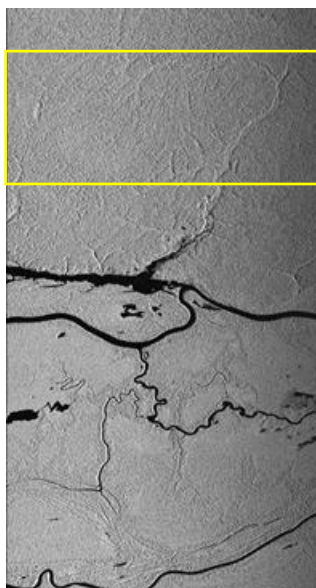


Рис. 1. Радиолокационный снимок РСА КА «Кондор-ФКА»

Отметим, что отражательные свойства густой лесной растительности типа лесов Амазонки на НН поляризации выше, чем на VV поляризации, на 0.5 дБ. Поэтому, вероятно, при анализе данных РСА КА «Кондор-ФКА» на НН поляризации надо исходить из значения $\gamma = -5.8$ дБ.

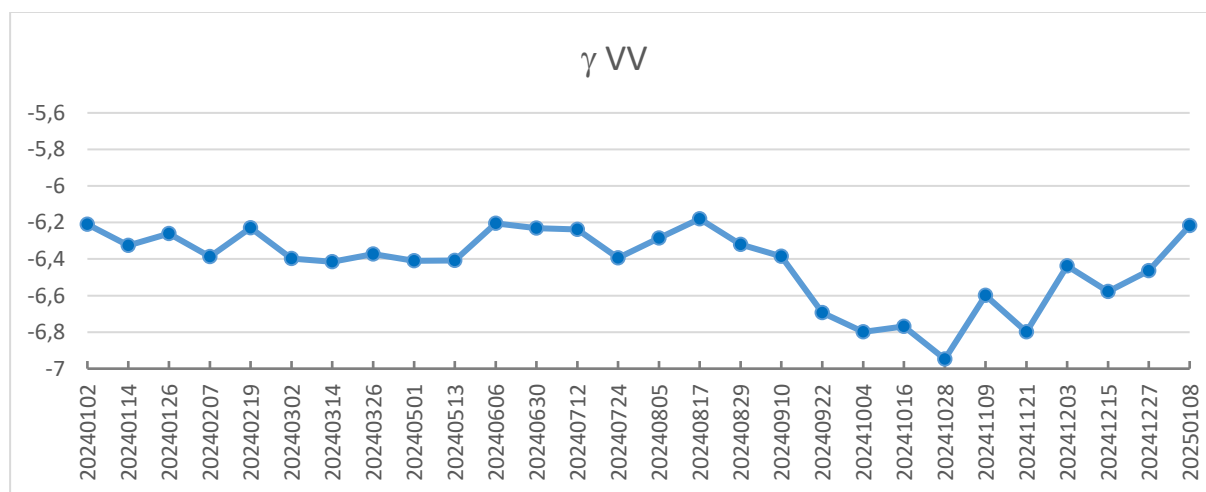


Рис. 2. Сезонные вариации γ на согласованной VV поляризации

Абсолютная радиометрическая калибровка РСА КА «Кондор-ФКА» по результатам съемки лесов Амазонки

На рис. 3 показаны графики измерений мощности эхо-сигнала леса $P_{\text{леса}}$ и водной поверхности $P_{\text{реки}}$ в зависимости от угла визирования РСА. По вертикальной оси отложен уровень мощности в относительных единицах. На графике с данными $P_{\text{леса}}$ представлена угловая зависимость уровня отраженного лесом сигнала, скорректированная с учетом изменения наклонной дальности и угла падения волн. Мощность эхо-сигнала леса в среднем равна 27 дБ, с с.к.о 0.18 дБ, мощность сигнала водной поверхности в среднем равна 11 дБ и монотонно возрастает на 3 дБ с ростом

наклонной дальности. Столь малые флуктуации сигнала $P_{\text{леса}}$ свидетельствуют и о высокой точности измерений отражательных свойств в данном случае лесов Амазонки, и о высокой стабильности параметров РСА. Необходимо отметить, тот факт, что съемки проводились на восходящих и нисходящих витках, и справа, и слева по ходу движения КА, что не сказалось на измерениях отражательных свойств лесных покровов.

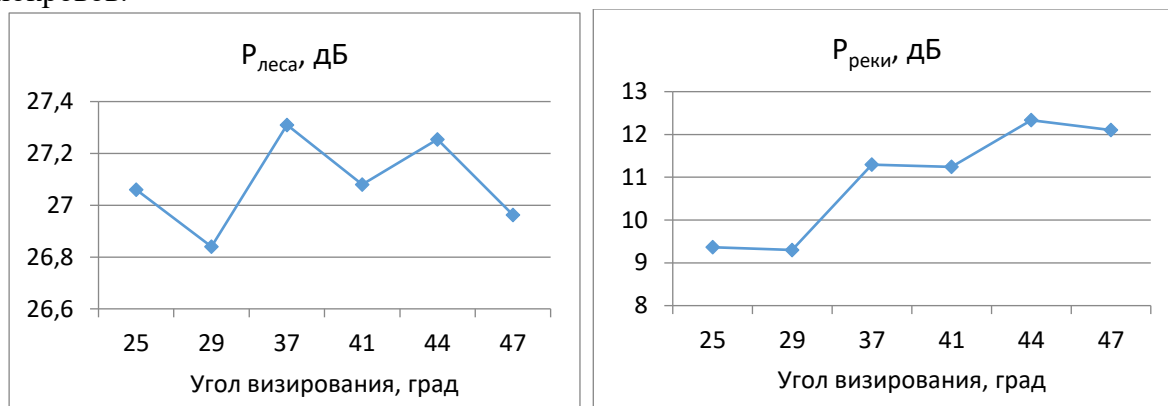


Рис. 3. Графики мощности эхо-сигнала леса (слева) и водной поверхности (справа) на снимках РСА КА “Кондор-ФКА”

Подводя итог, можно утверждать, что по результатам обработки 6 сеансов съемки РСА КА “Кондор-ФКА” стабильность измерений отражательных свойств леса Амазонки лучше 0.18 дБ. Следовательно, достижимая точность радиометрической калибровки РСА КА «Кондор-ФКА» также лучше 0.18 дБ. Уровень мощности тепловых шумов на графике справа возрастает на 3 дБ вследствие роста угла визирования / наклонной дальности. Исходя из уровня УЭПР леса и мощности сигналов леса и водной поверхности, можно оценить радиометрическую чувствительность РСА в предположении, что уровень сигнала водной поверхности – это мощность тепловых шумов. Учитывая данных графиков рис. 3 и упомянутый ранее уровень УЭПР леса Амазонки, получим, что удельная ЭПР шума или радиометрическая чувствительность РСА не хуже -21 дБ.

Оценка формы диаграммы направленности антенны РСА КА «Кондор-ФКА»

Для аккуратной коррекции влияния диаграммы направленности на радиолокационное изображение необходимо оценить ее форму. Форму и ширину диаграммы направленности РСА КА «Кондор ФКА» оценим путем анализа распределения уровня отраженного сигнала РСА некоторой однородной поверхностью.

В качестве примера используем данные сеанса съемки тропических лесов Амазонки. Для получения измерений уровня отраженной лесными покровами мощности проведем усреднение 7000 строк радиолокационного изображения в области однородной отражающей поверхности, а также выполнена оценка радиометрической чувствительности РСА по сигналу гладкой водной поверхности. Для получения корректных оценок, на изображении также предварительно проведена коррекция угловой зависимости отражательных свойств леса и вычтен уровень тепловых шумов, оцененный по гладкой водной поверхности.

На рисунке 4 ниже дан график распределения нормированной на максимум мощности в зависимости от угла визирования и ее параболическая аппроксимация. По горизонтальной оси отложены значения угла визирования. Несмотря на то, что диапазон углов визирования в пределах полосы съемки равен 0.6^0 (см. оранжевый график), с помощью графика модельной зависимости (синий график) можно

экстраполировать уровень мощности за пределы полосы изображения и провести оценки угловой ширины диаграммы направленности. На уровне 0.5 (-3 дБ) она равна 0.92^0 , а на уровне 0.25 (-6 дБ) - 1.14^0 , что совпадает с модельными оценками.

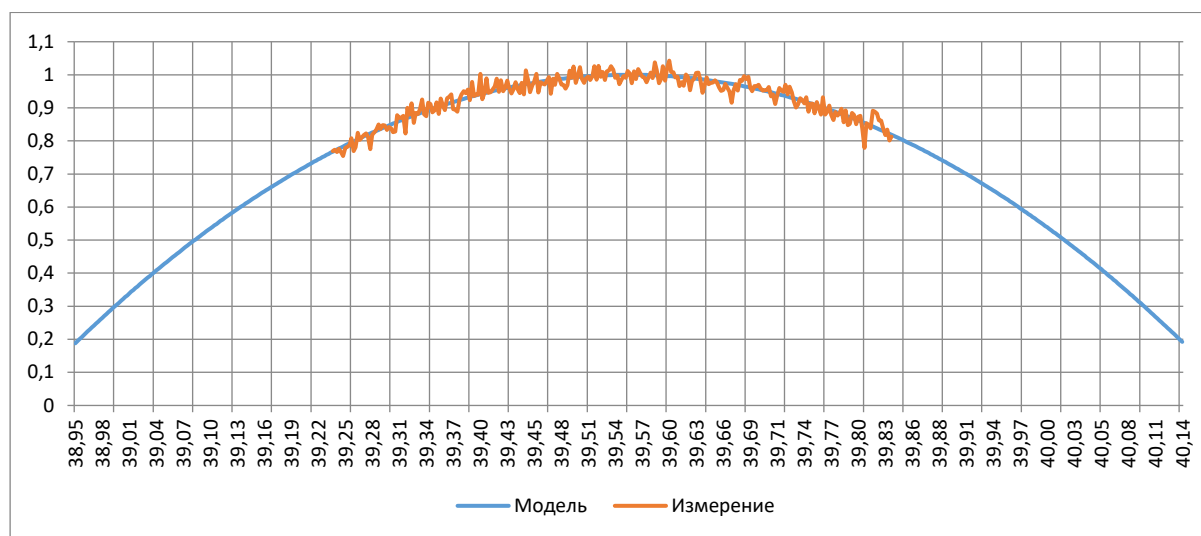


Рис. 4. Нормированное распределение нормированной мощности в зависимости от угла визирования и ее параболическая аппроксимация

Заключение

Исследованы естественные протяженные объекты, тропические леса Амазонки в южной Америки, с целью анализа стабильности их отражательных свойств и внешней радиометрической калибровки РСА КА «Кондор-ФКА». Показано, что в основном круглогодичная стабильность их отражательных свойств превосходит стабильность отражения искусственных калибровочных целей — уголковых отражателей. Отмечена высокая стабильность работы КА «Кондор-ФКА». Проведена абсолютная радиометрическая калибровка данных РСА, оценена радиометрическая чувствительность аппаратуры и измерена ширина диаграммы направленности антенны. Указанные характеристики соответствуют техническим требованиям.

Работа частично выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

Литература

1. Döring B.J., Schrank D., Schwerdt M., Baner R., Absolute Radiometric Calibration of TerraSAR-X Approach and Ground Targets // German Microwave Conference, Hamburg, Germany. 2008. 1-4.
2. Shimada M., Isoguchi O., Tadono T., Isono K. PALSAR Radiometric and Geometric Calibration // IEEE Trans. GRS., 2009. Vol. 47. No. 12. 3915-3932.
3. Захаров А.И., Сорочинский М.В., Захарова Л.Н., Иwanyчев Е.Е. Применение естественных точечных и протяженных объектов для радиометрической калибровки РСА // IV Всероссийские Арmandовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Муром, 27-29 мая 2014 г. С. 230-235.
4. А.И. Захаров, Л.Н. Захарова. Интеркалибровка космических РСА различных частотных диапазонов по наблюдениям тропических лесов Амазонки // Всероссийские открытые Арmandовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Муром, 25-27 июня 2024. С. 493-499.