DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.9.14
УДК: 621.396.96

Абсолютная радиометрическая калибровка РСА КА «Кондор-ФКА» с помощью снимков тестового калибровочного участка в лесах амазонии

А.Н. Рабочий [1], А.И. Захаров [2]

[1] Акционерное общество «ВПК «НПО машиностроения», Россия, Реутов
[2] ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Россия, Фрязино

Статья поступила в редакцию 25 августа 2026 г.

Аннотация. Проанализированы отражательные характеристики лесов Амазонии при зондировании в типовых частотных диапазонах работы зарубежных РСА и сделан прогноз об отражательных характеристиках тестового лесного участка на снимках отечественного РСА S-диапазона. Приведено описание геометрии измерений и параметров работы отечественного РСА КА «Кондор-ФКА» в шести сеансах съемки тестового полигона, использованных для абсолютной радиометрической калибровки. Описан алгоритм синтеза радиолокационных изображений и перечислены этапы радиометрической коррекции данных в ходе синтеза изображений, при выполнении которых уровень сигнала на изображениях не зависит от параметров работы РСА и геометрии измерений. Получено выражение и сделана оценка абсолютного коэффициента радиометрической калибровки, связывающего отсчеты мощности сигнала на изображении с удельной ЭПР поверхности. В результате совместного анализа мощности эхо-сигналов на шести снимках тестового участка показана высокая суммарная временная стабильность ~0.25 дБ отраженного сигнала и функционирования приемно-передающего тракта РСА КА «Кондор-ФКА».

Сделана оценка радиометрической чувствительности РСА и ширины диаграммы направленности бортовой антенны. Полученные результаты соответствуют требованиям ТЗ.

Ключевые слова: космический аппарат (КА), радар с синтезированной апертурой (РСА), «Кондор-ФКА», УЭПР, леса Амазонии, радиолокационное изображение, радиометрическая коррекция, абсолютная калибровка.

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

Автор для переписки: Захаров Александр Иванович, aizakhar@fireras.su

Введение

В радиолокации под абсолютной радиометрической калибровкой понимают процедуру, обеспечивающую определение характеристик радиолокатора и, следовательно, измеряемых характеристик объекта наблюдения. Наиболее полноценным вариантом калибровки является внешняя калибровка, позволяющая охватить приемо-передающий тракт и антенную систему. Внешняя калибровка обеспечивается установкой на тестовых полигонах искусственных объектов (уголковых отражателей, активных приемо-передатчиков) или съемкой протяженных объектов земной поверхности с известными и стабильными отражательными свойствами. Тропические леса Амазонии являются эталонным протяженным объектом, используемым для калибровки и интеркалибровки космических радиолокационных средств наблюдения Земли. Отражательные свойства этих лесных покровов исследовались на протяжении двух десятков лет в различных частотных диапазонах радарами с синтезированной апертурой (РСА) и скаттерометрами.

1. Радиофизические характеристики лесных покровов Амазонии

Примечательной особенностью тропических лесов Амазонии является их в целом высокая пространственная однородность и, как правило, высокий, более 150 т/га, объем наземной биомассы [1], а практически непрерывные дождевые

осадки в течение года при общем годовом количестве 2300 мм в год и неизменно высокая температура воздуха 27 °С…28 °С обеспечивают высокую стабильность отражения сигналов.

Удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР), или σ^0, леса зависит как от его радиофизических свойств, так и от параметров радиолокационной съемки: поляризации передающей и приемной антенн, угла зондирования, частоты зондирующего сигнала. Чем больше длина волны, тем большая часть сигнала проникает в слой растительности, тем большие ее объемы определяют уровень обратного рассеяния. Как следует из графика в работе [2], начиная с некоторого уровня биомассы растительности, разного в разных частотных диапазонах, уровень отражения перестает расти, и при очень больших значениях биомассы (более 100-150 т/га) становится примерно одинаковым во всех используемых частотных диапазонах, выделенных для работы космических РСА.

В качестве примера приведем результаты измерений некоторых зарубежных космических миссий. Наиболее употребительной характеристикой отражательных свойств леса, которая будет использована далее в статье, является величина γ вследствие ее нечувствительности к углу падения волн, связанная с σ^0 соотношением $\gamma = \sigma^0(\theta)/\cos\theta$. Среднее значение γ для лесов Амазонки в L-диапазоне по данным японского РСА JERS-1 за 1992-1998 гг. равно –6,0 дБ и –5,7 дБ для сухого и влажного сезонов соответственно, с величинами вариаций 0,18 дБ и 0,2 дБ [3]. Измерения в X-диапазоне показывают более сложное поведение γ в зависимости от геометрии и параметров и сезонов съемки. По данным немецких радаров TanDEM-X за период 2012–2020 гг. среднее значение γ лесов в X-диапазоне максимально при малых локальных углах падения (–6,1 дБ при 25°) и плавно снижается с ростом этого угла до –6,9 дБ при 51°. Расхождение в значениях для сухого и влажного сезона составляет заметно меньшую величину, чем вариации из-за угла падения. Кроме того, есть разница около 0,5 дБ между средними значениями γ на

восходящем и нисходящем витках. Анализ многолетних наблюдений данных TanDEM-X для небольшого тестового участка показал, что в сухой сезон вариации достигают 0,2 дБ, а в сезон дождей 0,11 дБ. Средние значения составили –6,81 дБ и –6,83 дБ, соответственно для сухого и влажного сезонов [4].

Благодаря доступности калиброванных радиолокационных снимков лесных покровов Амазонки, сделанных зарубежными космическими РСА в частотных диапазонах от X до L, можно сделать предположение об отражательных свойствах лесов в промежуточном, S-диапазоне. Исходя из приведенного выше можно предположить, что в S-диапазоне работы отечественного КА «Кондор-ФКА» –6.9 дБ < γ < –5.7 дБ, причем, вероятно, ближе к верхней границе, выявленной в L-диапазоне.

2. Характеристики РСА КА «Кондор-ФКА»

Согласно [5], параметры орбиты и основные характеристики РСА таковы:

- Высота орбиты – 520 км
- Наклон плоскости орбиты 97.50
- Диапазон углов визирования: 20° – 55°
- Частотный диапазон РСА – S (9.6 см)
- Ширина полосы обзора – 2 × 500 км
- Полоса частот ЛЧМ сигнала 200 МГц
- АЦП 4 бита RE + 4 бита IM.

Эффективный размер зеркальной антенны РСА равен 6 м, ширина диаграммы направленности луча по уровню –3 дБ в вертикальной и горизонтальной плоскостях равна 1°±0.1°. Возможно проведение съемки поверхности Земли в детальном непрерывном (ДНР), детальном прожекторном (ДПР) и обзорном (ОР) режимах с правого или левого борта по ходу движения космического аппарата в диапазоне углов визирования 24°…55°. Разрешение по поверхности в режиме ДНР составляет 2…3 м, в режиме ДПР – 1…2 м, в режиме ОР – 6…12 м [5]. Особенностью работы приемного тракта РСА в этих сеансах

было применение режима так называемого быстрого АРУ (автоматическая регулировка усиления) с установкой уровня усиления по суммарному эхо-сигналу из предыдущего зондирования, чтобы обеспечить эффективное использование разрядов 4-разрядного АЦП. Длительность окна квантования эхо-сигнала и частота повторения импульсов f_{rep} менялись в больших пределах в зависимости от дальности до области съемки R, угла падения волн θ и выбранной длительности зондирующего импульса τ.

Использованные в данной работе материалы – это 6 сеансов съемки лесов Амазонки радаром «Кондор-ФКА» в режиме ДНР, выполненные в сентябре-ноябре 2025 года на горизонтальной поляризации в различной геометрии съемки – на восходящем и нисходящем витках орбиты, справа и слева по ходу движения спутника, в диапазоне углов падения θ от 30° до 50° (см. таблицу 1, где сеансы упорядочены в соответствии с ростом углом визирования из сопроводительной информации к сигнальным данным). Частота повторения импульсов f_{rep} менялась от сеанса к сеансу в пределах от 6578 до 7874 Гц, а длительность импульса τ – от 6 до 7 мкс. Изображения синтезированы с помощью алгоритма Range-Doppler, длина синтезируемой апертуры менялась в зависимости от наклонной дальности, что обеспечивало постоянство разрешения по азимуту, которое равно в предельном случае половине эффективной длины антенны РСА по азимуту.

Таблица 1. Геометрия и параметры съемки РСА в 6 сеансах съемки.

дата	Виток	борт	R, км	θ, град	f_{rep}, Гц	τ, мкс
2025.11.28	Восх	справа	583	-30.17	7874	6
2025.10.01	Нисх	слева	578	29.73	7936	6
2025.09.30	Восх	справа	682	-43.54	7812	6
2025.11.23	Нисх	слева	675	42.84	7692	6
2025.10.24	Нисх	справа	764	-50.62	6578	7
2025.10.02	Восх	слева	757	50.14	7633	6

Центральный элемент одного из снимков, приведенного на рис. 1, –приток реки Жапура в северо-западной части Бразилии, севернее населенного пункта Альтамира. Желтым прямоугольником отмечен типичный лесной район, выбранный для проведения измерений уровня эхо-сигнала леса. Мощность сигнала оценивалась в окне размером ~1000×1000 пикселов в районе максимума диаграммы направленности, на значительном удалении от водных объектов.

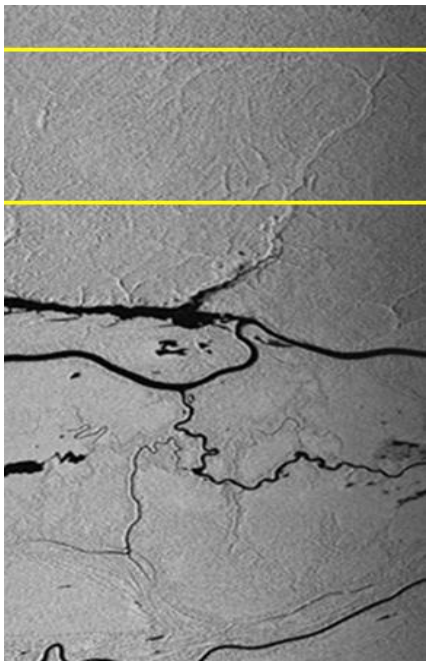


Рис. 1. Пример радиолокационного изображения тестового лесного участка по данным РСА КА «Кондор-ФКА».

Сезонная зависимость отражательных свойств лесных покровов на тестовой территории, построенная по данным серии из 28 снимков РСА Sentinel-1, снятых в С-диапазоне с интервалом 12 дней в период с 01.01.2024 по 07.01.2025, представлена в виде графика на рис. 2. На этом графике измерений γ на вертикальной согласованной (VV) поляризации выделяется 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 декабря – с падением γ на 0.4 дБ. Особо стоит отметить высокую стабильность γ в период дождей, когда все перепады γ на VV-поляризации находятся в узком диапазоне 0.2 дБ. Как показано в [5], отражательные свойства густой лесной растительности лесов Амазонки на горизонтальной согласованной (HH) поляризации в среднем выше,

чем на VV-поляризации, на 0.5 дБ. Поэтому, вероятно, при анализе данных из 6 осенних сеансов съемки РСА КА «Кондор-ФКА», полученных на НН-поляризации, можно исходить из значения $\gamma = -6.2$ дБ.

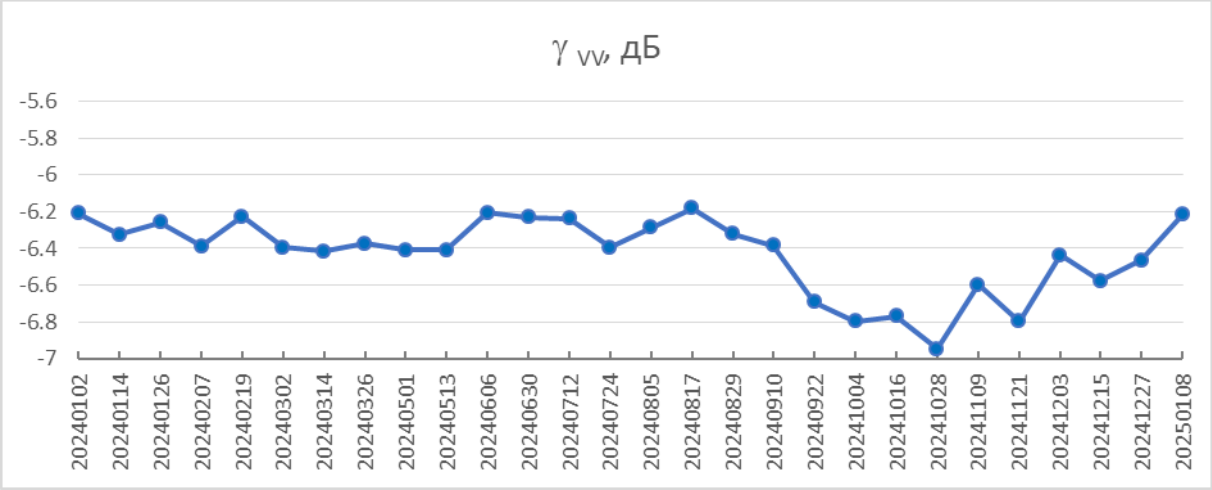


Рис. 2. Сезонные вариации γ на VV поляризации.

3. Составляющие процедуры радиометрической коррекции при калибровке изображения

Сигнал на выходе приемного тракта РСА P_r есть сумма полезного сигнала, описываемого классическим уравнением радиолокации, и шума

$$P_r = P_S + P_N = \frac{P_T G^2(\alpha)\lambda^2 G_R G_{AGC}\sigma}{(4\pi)^3 R^4} + G_{AGC}P_N, \quad (1)$$

где P_T – излучаемая мощность, P_S – эхо-сигнал поверхности, P_N – шум приемного тракта, $G^2(\alpha)$ – квадрат диаграммы направленности антенны РСА как функция угла α между электрической осью антенны и направлением на область съемки, λ – длина волны сигнала, G_R – общее усиление приемного тракта включая АЦП, G_{AGC} – коэффициент ослабления в приемном тракте (АРУ), R – наклонная дальность до объекта поверхности, σ – эффективная площадь рассеяния поверхности (ЭПР), равная

$$\sigma = \sigma^0 \Delta_{az}\Delta_{rg}, \quad (2)$$

где σ^0 – удельная ЭПР поверхности, а Δ_{az} – разрешение радара по азимуту и Δ_{rg} – разрешение по наземной дальности, имеющие следующую зависимость:

$$\Delta_{rg} = \frac{c\tau}{2\sin\theta}, \quad (3)$$

$$\Delta_{az} = \frac{\lambda R}{D_{az}}, \quad (4)$$

где τ – длительность зондирующего импульса, c – скорость света, D_{az} – эффективная длина антенны РСА по азимуту.

Выражение для интенсивности сигнала после синтеза радиолокационного изображения P_R:

$$P_R = \frac{P_T G^2(\alpha)\lambda^2 G_R \left(N_{az} N_r FFT_{az} FFT_r K_p\right)^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} + N_{az} N_r \left(FFT_{az} FFT_r K_p\right)^2 P_N . \quad (5)$$

Здесь σ – ЭПР элемента поверхности в пределах пиксела изображения.

В скобках учтены: K_p – коэффициент перевода отсчетов амплитудного изображения в 16-разрядную сетку при целочисленном представлении результатов синтеза изображения, влияние интервала когерентного накопления по азимуту N_{az} (длина окна свертки по азимуту) и по дальности N_r (число отсчетов зондирующего сигнала), а также длина быстрого преобразования Фурье (БПФ) при вычислении свертки по азимуту FFT_{az} и дальности FFT_r в алгоритме Range-Doppler, которые подстраивались в соответствии с длиной строк данных. Подчеркнем, что вследствие когерентного накопления детерминированного сигнала его мощность возрастает в $\left(N_{az} N_r\right)^2$ раз, а мощность шума при некогерентном накоплении возрастает в $N_{az} N_r$ раз.

В выражении (5)

$$N_{az} = \frac{W_{az} f_{rep}}{V_g} = \frac{\lambda R f_{rep}}{D_{az} V_g}, \quad (6)$$

где W_{az} – длина синтезируемой апертуры, зависящая от эффективной длины антенны РСА по азимуту D_{az}, V_g – скорость перемещения следа антенны по земной поверхности;

$$N_r = \tau f_{dis}, \quad (7)$$

где f_{dis} – частота квантования эхо-сигнала по дальности, τ – длительность зондирующего импульса. В использованной версии программного обеспечения после операций вычисления свертки выполнялась нормировка амплитудного изображения на $N_{az}N_rFFT_{az}FFT_r$, с тем чтобы компенсировать влияние различной длины зондирующего импульса и синтезируемой апертуры в разных сеансах, а также меняющегося размера БПФ при обработке строк данных с сильно отличающейся длиной. С учетом этого для синтезированного изображения

$$P_{RS} = P_{SS} + P_{NS} = \frac{P_T G^2(\alpha)\lambda^2 G_R \left(K_p\right)^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} + \frac{\left(K_p\right)^2 P_N}{N_{az}N_r}. \quad (8)$$

Отметим также, что влияние АРУ на уровень сигнала радиоголограммы скорректировано в программе синтеза на этапе подготовки данных к обработке. Влияние диаграммы направленности устранено тем, что измерения сигнала леса и шума водной поверхности проводились вблизи ее максимума на всех снимках.

Для протяженных объектов на радиолокационном изображении

$$\sigma = \delta_{az}\delta_{rg}\sigma_0(\theta). \quad (9)$$

Расстояние между пикселами изображения по наземной дальности

$$\delta_{rg} = \frac{c}{2 f_{dis} \sin\theta}, \quad (10)$$

где c – скорость света, θ – угол падения, f_{dis} – частота квантования отсчетов эхо-сигнала, равная 300 МГц в сеансах ДНР.

Расстояние между пикселами изображения по азимуту

$$\delta_{az} = \frac{V_g}{f_{rep}}, \quad (11)$$

где V_g – скорость перемещения следа антенны по земной поверхности, f_{rep} – частота повторения импульсов.

Для сравнительного анализа измерений сигнала на радарных изображениях необходимо скомпенсировать различия в наклонной дальности до поверхности, а также площади пиксела $\delta_{az}\delta_{rg}$.

Введем корректирующий коэффициент K_{corr}, компенсирующий влияние наклонной дальности в (8), а также угла падения в (10) и частоты повторения импульсов в (11), определяющих площадь пиксела, на уровень интенсивности сигнала на синтезированном изображении:

$$K_{corr} = R^4 f_{rep} \sin\theta \tag{12}$$

и применим его для коррекции отсчетов мощности сигнала и шума на снимках. Оценим коэффициент перевода отсчетов мощности сигнала на изображении в единицы отражательных характеристик поверхности, используя усредненные в некотором окне значения мощности сигнала леса $\langle P_{RS} \rangle$ и мощности шума $\langle P_{NS} \rangle$. После умножения на K_{corr} усредненная в некотором окне на изображении мощность сигнала P_{SSC} зависит только от $\sigma^0(\theta)$:

$$P_{SSC} = K_{corr}\left(\langle P_{RS} \rangle - \langle P_{NS} \rangle\right) = K_{ap}\sigma^0(\theta), \tag{13}$$

где K_{ap} – коэффициент абсолютной калибровки для отсчетов мощности сигнала на изображении, $\langle \cdot \rangle$ – операция усреднения. Избавимся от угловой зависимости $\sigma^0(\theta)$ в (13), перейдя к отражательной характеристике поверхности γ:

$$K_{ap} = \frac{\langle P_{SSC} \rangle}{\gamma \cos\theta}. \tag{14}$$

4. Результаты измерений

На рис. 3 приведен график эхо-сигнала леса на изображении P_{RS} из (9) в зависимости от угла падения волн, а на рис. 4 в децибелах – корректирующие факторы из (12) и (14). Для более наглядного представления наклонная дальность нормирована на референсную дальность $R_{ref} = 500$ км, а частота повторения – на референсную частоту $f_{ref} = 7874$ Гц из таблицы 1.

Результат коррекции измерений сигнала леса в шести сеансах съемки $P_{SSC}/\cos\theta$, равный $K_{ap}\gamma$, приведен на рис. 5. Среднее значение измерений на графике равно 19.9 дБ. Предположив, что $\gamma =$ –6.2 дБ, получим абсолютный

коэффициент калибровки $K_{ap} =$ 26.1 дБ со среднеквадратичным отклонением около 0.25 дБ, позволяющий перевести скорректированные для использованной версии программы цифровые данные после синтеза в единицы УЭПР. Последнее число характеризует совокупную стабильность отражательных свойств отражающей поверхности и аппаратуры РСА на интервале проведения сеансов съемки.

Усредненная шумовая составляющая измерений P_{NSC} на синтезированном изображении из (8) с учетом (6) и корректирующего фактора (12) равна

$$P_{NSC} = \frac{\left(K_p\right)^2 R^3 D_{az} V_g \sin\theta}{N_r \lambda} P_N . \qquad (15)$$

Заметим, что в принятом варианте коррекции цифровых данных в ходе синтеза мощность шума растет в кубической зависимости от R при постоянном уровне полезного сигнала на синтезированном изображении (согласно (13). Соответственно, сигнал/шум падает в кубической зависимости от R.

Уровень шума приемного тракта на изображении оценивался по сигналу гладкой водной поверхности. На рис. 6 приведен график оценок уровня шума с учетом факторов рис. 4. При средней величине уровня шума на графике, составляющей 4.5 дБ, с учетом $K_{ap} =$ 26.1 дБ получим оценку радиометрической чувствительности $\sigma^0_N =$ –21.6 дБ для $\theta =$ 43° (дальность 670 км).

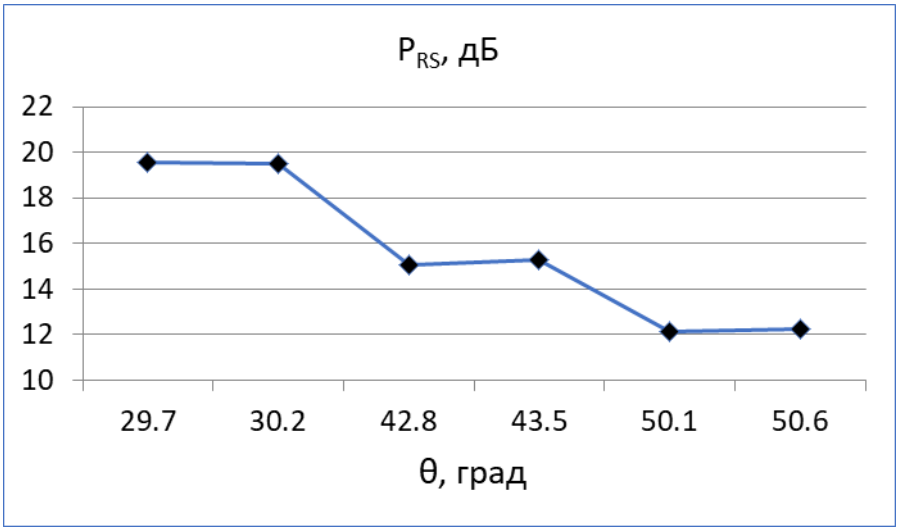


Рис. 3. Эхо-сигнал леса на изображении до коррекции геометрии съемки.

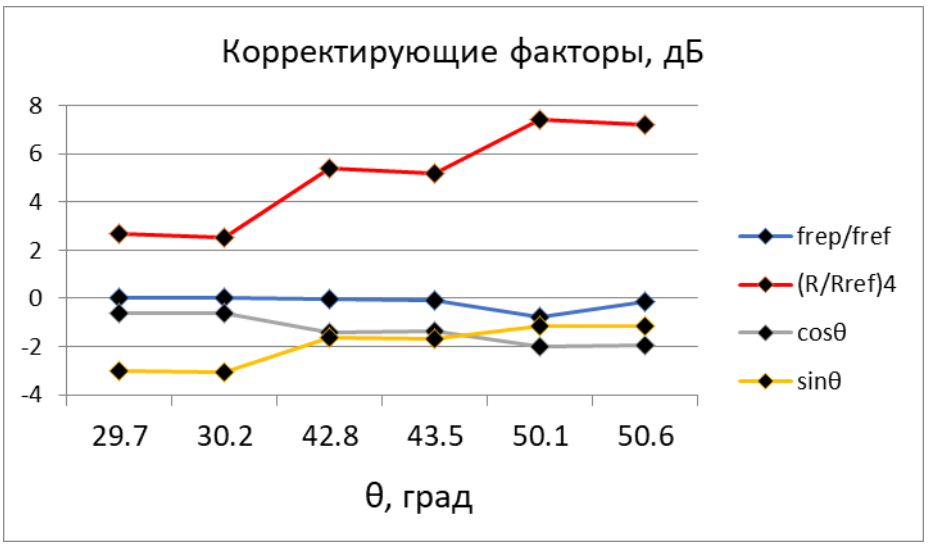


Рис. 4. Корректирующие факторы.

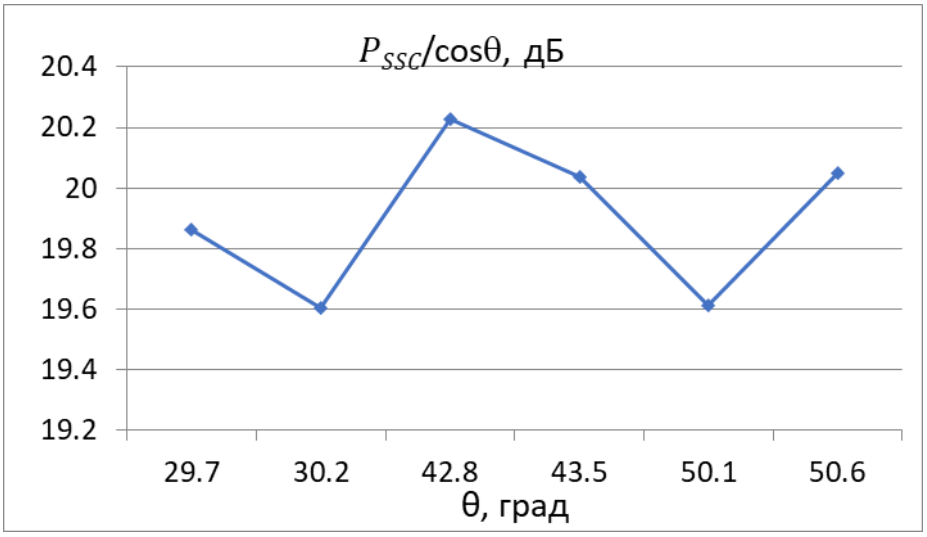


Рис. 5. Результат учета факторов из (12) при коррекции измерений мощности сигнала леса.

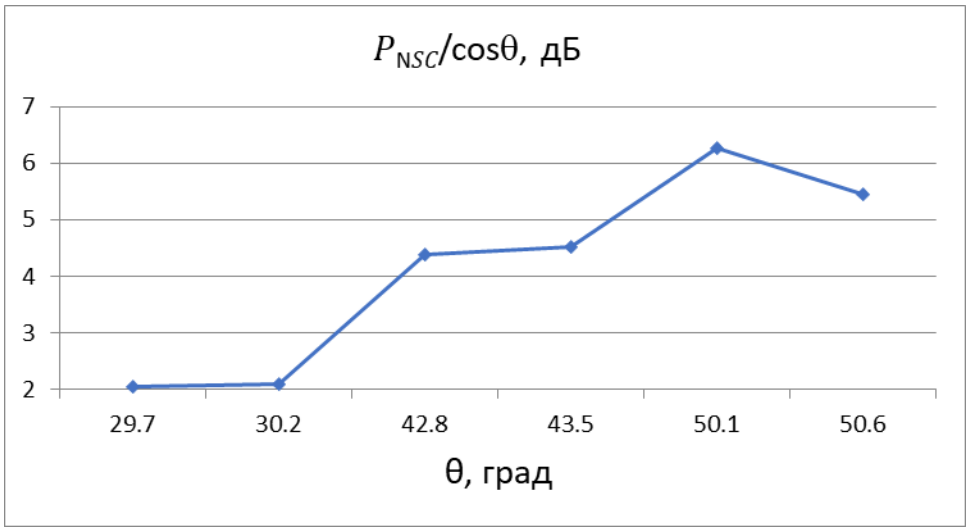


Рис. 6. Уровень шума с учетом факторов из (12).

Результатом применения описанных выше факторов радиометрической коррекции данных в процессе синтеза изображения является формирование радиолокационных изображений с характеристиками отражения, не зависящими от параметров работы РСА и геометрии съемки. Этап коррекции (12) можно выполнить на выходе программы синтеза, умножая квадратурные компоненты сигнала пикселов изображения на коэффициент

$$\sqrt{K_{corr}} = R^2 \sqrt{f_{rep} \sin\theta}\,. \tag{16}$$

Тогда $\sigma^0(\theta)$ поверхности в пикселе изображения будет связана с мощностью сигнала пиксела через коэффициент калибровки K_{ap} соотношением

$$\sigma^0(\theta) = \frac{P_{SSC}}{K_{ap}} \tag{17}$$

независимо от геометрии съемки и параметров работы РСА. Очевидным достоинством использованного подхода к радиометрической коррекции при синтезе изображений и оценке абсолютного калибровочного коэффициента является возможность использования единого калибровочного коэффициента при переводе цифровых массивов изображения в УЭПР независимо от геометрии съемки.

Подчеркнем, что при обработке радиоголограммы в случае фиксированной длины синтезируемой апертуры, вычисленной, например, для центра кадра (наиболее простой и часто используемый вариант синтеза), разрешение по азимуту в пределах снимка меняется в зависимости от дальности в третьей степени, и соотношение (17) будет справедливо только в области, выбранной в качестве калибровочной. Для участков на других дальностях R с углом падения волн θ необходима дополнительная коррекция, учитывающая изменение дальности, угла падения и угломестную диаграмму направленности [6]:

$$\sigma^0(\theta) = \frac{P_{SSC}}{K_{ap}} \cdot \frac{1}{G^2(\alpha)} \cdot \frac{\sin\theta}{\sin\theta_c} \cdot \frac{R^3}{{R_C}^3}\,, \tag{18}$$

где θ_c – угол падения сигнала в калибровочной области, а R_c – наклонная дальность до нее.

5. Оценка 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» можно оценить по распределению уровня отраженного сигнала некоторой однородной поверхностью. В качестве примера используем данные сеанса съемки тропических лесов Амазонки на рис. 1. Для получения измерений уровня отраженного лесными покровами сигнала проведем усреднение нескольких тысяч строк изображения в однородной области и вычтем уровень тепловых шумов, оцененный по гладкой водной поверхности.

На рисунке 7 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° (см. оранжевый график), с помощью графика модельной зависимости (синий график) можно экстраполировать измерения за пределы полосы изображения и провести оценки угловой ширины диаграммы направленности. На уровне 0.5 (-3 дБ) она равна 0.92°, а на уровне 0.25 (-6 дБ) – 1.14°, что совпадает с модельными оценками.

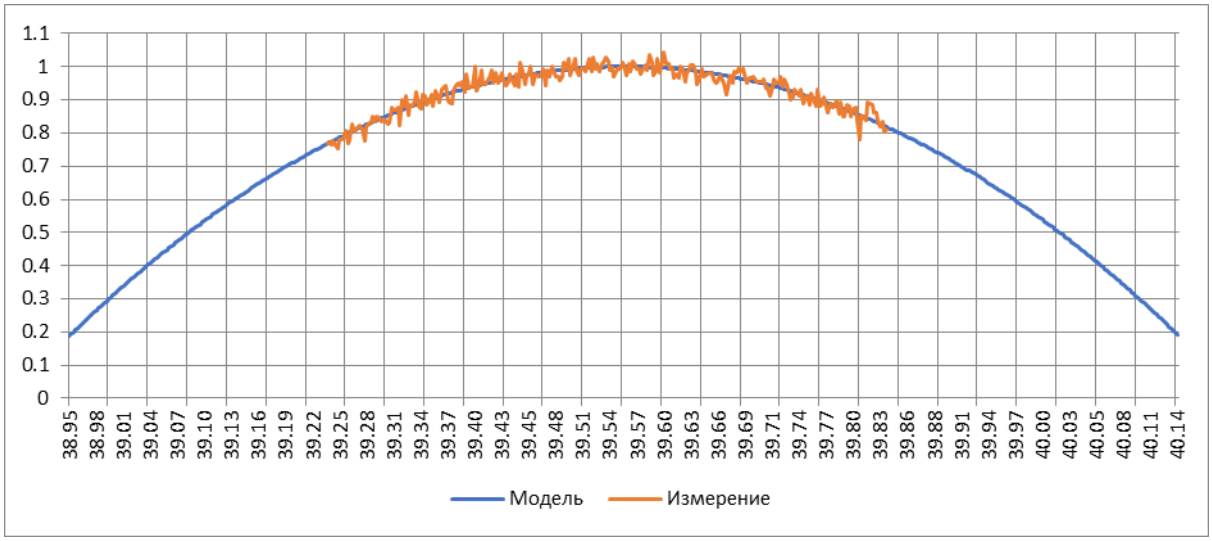


Рис. 7. Нормированное распределение нормированной мощности в зависимости от угла визирования и ее параболическая аппроксимация.

Заключение

Тропические леса Амазонки являются стабильным протяженным объектом земной поверхности, удобным для внешней радиометрической калибровки космических радаров, в том числе и РСА КА «Кондор-ФКА». Анализ материалов съемки зарубежных космических РСА позволил сделать предположение об отражательных характеристиках лесов на снимках, сделанных отечественным РСА S-диапазона, и использовать их для внешней абсолютной калибровки. Детальное обсуждение алгоритма синтеза радиолокационных изображений позволило определить этапы радиометрической коррекции данных, при выполнении которых уровень сигнала на изображениях не зависит от параметров работы РСА и геометрии измерений. Сделана оценка абсолютного коэффициента радиометрической калибровки для использованной в работе экспериментальной версии программы синтеза радиолокационных изображений. Статистический анализ эхо-сигналов тестового участка леса на 6 снимках выявил высокую стабильность работы РСА КА «Кондор-ФКА» порядка 0.25 дБ в течение 2 месяцев работы. Выполнена оценка радиометрической чувствительности РСА и ширины диаграммы направленности антенны. Указанные характеристики соответствуют техническим требованиям.

Авторы признательны госкорпорации «Роскосмос» и Европейскому космическому агентству за использованные данные.

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

Литература

1. Верба В.С. и др. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – 2010.
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. https://doi.org/10.1038/s41597-023-02575-4
3. Shimada M. Long-term stability of L-band normalized radar cross section of Amazon rainforest using the JERS-1 SAR // Canadian Journal of Remote Sensing. – 2005. – V. 31. – No. 1. – P. 132-137. https://doi.org/10.5589/m04-058
4. Dell'Amore L. et al. 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. – 2023. – V. 17. – P. 1673-1690. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3338982
5. Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми космической системой «Кондор-ФКА». – Госкорпорация "Роскосмос", АО «ВПК «НПО машиностроения». – 2023. https://ntsomz.ru/wp-content/uploads/2023/05/2023.02.17.rukovodstvo.pol_.zovatela.kondor-fka.dla_.saita_.pdf
6. Laur H. et al. Derivation of the backscattering coefficient // ERS-1 SAR. PRI Products, European Space Agency Publication, Nevilly, France. – 1992.

Для цитирования:

Рабочий А.Н., Захаров А.И. Абсолютная радиометрическая калибровка РСА КА «Кондор-ФКА» с помощью снимков тестового калибровочного участка в лесах Амазонии // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 9. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.9.14