

Ледовые покровы озера Восток в Антарктиде как средство контроля радиометрической стабильности космических РСА L-диапазона

А.И. Захаров, Л.Н. Захарова

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал 141190, Московская область, Фрязино, пл. Введенского, 1.
E-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru*

Проведен анализ долговременной стабильности отражательных свойств естественных покровов в Антарктиде по данным съемки японских космических радиолокаторов с синтезированной апертурой PALSAR-1 и PALSAR-2. Выявлена высокая, превосходящая стабильность специализированных искусственных целей, стабильность отражательных свойств ледовой поверхности озера Восток, которая может использоваться в качестве объекта для интеркалибровки и мониторинга стабильности работы космических радаров. Ключевые слова: радиометрическая калибровка, стабильность, протяженные калибровочные цели, озеро Восток

Ice covers of Lake Vostok in Antarctica as verification tool of spaceborne L-band SAR radiometric stability

A.I. Zakharov, L.N. Zakharova

V.A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch.

The analysis of the long-term stability of the scattering properties of natural covers in Antarctica was carried out using Japanese PALSAR-1 and PALSAR-2 spaceborne synthetic aperture radar observations. High stability of the reflective properties of the extended ice covers of Lake Vostok, surpassing the stability of specialized artificial targets, has been revealed. For that reason, Lake Vostok ice covers may be considered as suitable target for spaceborne radars intercalibration and monitoring of their stability.

Keywords: radiometric calibration, stability, distributed calibration targets, Lake Vostok

Введение

Регулярная калибровка научной аппаратуры дистанционного зондирования в течение всего срока её эксплуатации необходима для получения достоверной информации о свойствах зондируемой поверхности. Общепринятой и наиболее результативной является внешняя калибровка, в ходе которой эталонные калибровочные средства размещают в зоне планируемой съемки. Традиционными средствами внешней калибровки радаров с синтезированной апертурой (РСА) являются пассивные эталонные цели, в первую очередь уголковые отражатели, которые видны на изображениях как яркие точечные объекты. Особенностью калибровки высокодетального РСА L-диапазона является необходимость использования уголковых отражателей больших размеров. В калибровочных работах проекта ALOS PALSAR-1 благодаря использованию уголков с длиной ребра 2-2,5 м точность калибровки составила 0,67 дБ, а при использовании 5-метровых уголков достигала 0,17 дБ [1]. Предсказуемость эффективной площади рассеяния (ЭПР) уголков делает их незаменимыми при измерении коэффициента передачи системы для абсолютной калибровки, а очевидным недостатком является необходимость установки и наведения перед калибровочными сеансами с соблюдением ряда специфических требований к

свойствам подстилающей поверхности и обеспечения мер по сохранности аппаратуры в течение всего цикла измерений.

Естественные протяженные калибровочные объекты могут быть альтернативой специализированной калибровочной аппаратуре. Тропические леса Амазонки — общеизвестный и фактически эталонный район для калибровки космических РСА разных диапазонов волн. Благодаря постоянно высокой влажности из-за практически непрерывных осадков в течение года при общем количестве осадков 2300 мм/год и практически постоянной температуре воздуха 27...28°C они оказываются привлекательным объектом калибровки и интеркалибровки космических РСА. Стабильность удельной эффективной площади обратного рассеяния (УЭПР) лесов Амазонки в L-диапазоне (длина волны 23 см) оказалась равной 0,2 дБ на протяжении десятилетия [2].

Объект исследования

Целью данной работы является демонстрация возможностей иного протяженного естественного объекта – подледного озера Восток в Антарктиде, максимальные размеры которого 300×60 км. На гладкой ледовой поверхности этого озера, лежащего на глубине 4 км под слоем льда, незаметны какие-либо проявления донного рельефа. Для территории озера, как и для всей высокоширотной Антарктиды, типичны экстремальные погодные условия: крайне низкое годовое количество осадков 18 мм, температура зимой –65°C, летом –35°C. Средняя скорость ветра в этом районе 4-6 м/с преимущественным направлением с запада на восток. Редко выпадающие снеговые осадки сносятся ветром к восточному берегу, образуя вдоль берега снежные дюны. Последствия снежных метелей на поверхности озера иногда проявляются кратковременно в виде повышения уровня УЭПР на 1-1,5 дБ.

Результаты измерений

Первые положительные результаты, показывающие перспективность использования ледовых покровов озера для калибровочных работ, были получены в результате обработки данных из 15 сеансов съемки японского РСА PALSAR-1 в ноябре 2006 - январе 2011 годов [3]. В обработке использовались данные формата SLC, уровень обработки 1,1. На рис. 1 приведен график изменения средней УЭПР на НН поляризации для тестового участка размером 3000*3000 пикселей, расположенного в правой нижней части стандартного кадра PALSAR-1, накрывающего среднюю часть озера Восток. Было обнаружено, что, несмотря на медленные пространственные вариации уровня УЭПР ледовой поверхности, при среднем значении -17,7 дБ среднеквадратичное отклонение (СКО) УЭПР, называемое в тексте также стабильностью, равно 0,19 дБ.

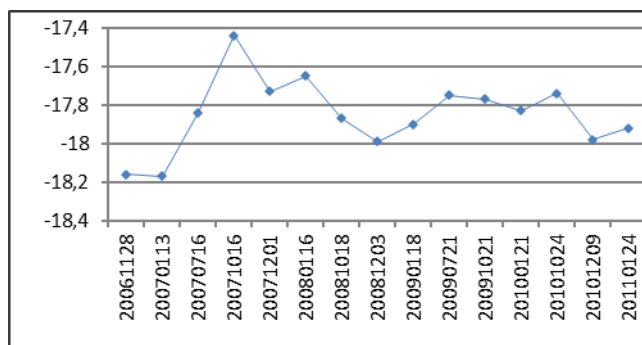


Рис. 1. УЭПР поверхности озера Восток, дБ, по данным РСА PALSAR-1

Для построения карты распределения стабильности отражательных свойств в пределах кадра снимки были совмещены поэлементно и усреднены в окне 50×50 пикселей, после чего эти данные использованы для вычисления среднего и среднеквадратичного отклонения УЭПР в децибелах.

На рис. 2 слева приведена карта среднего значения УЭПР ледовой поверхности в пределах радиолокационного снимка поверхности озера Восток по 15 снимкам радаром PALSAR-1 из периода 2007-2011 гг. Справа – карта стабильности или СКО УЭПР поверхности. Перепады яркости от черного до белого соответствуют здесь изменениям стабильности от 0 до 0,4 дБ. В верхнем левом углу снимка на рис. 2 слева видна холмистая береговая линия озера с тонкой белой линией между холмов — трассой санно-гусеничного поезда, соединяющей российскую антарктическую станцию Восток с береговой станцией Прогресс. Следует отметить высокую однородность стабильности отражательных свойств поверхности на рис. 2 справа: единственным нестабильным объектом в пределах кадра является трасса санно-тракторного пути.

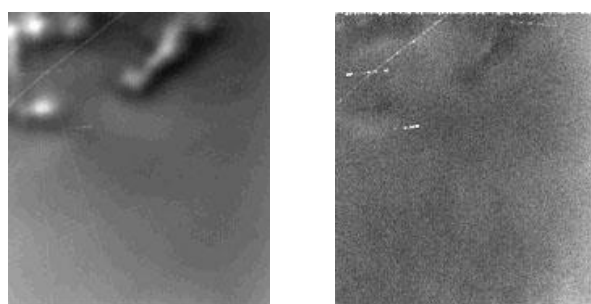


Рис. 2. Карты среднего значения и СКО УЭПР по данным PCA PALSAR-1, трасса 601

Более обширный материал для исследований ледовых покровов озера Восток был получен в японском проекте ALOS-2 с помощью PCA PALSAR-2 в конце второго десятилетия 21 века. В нашей работе использованы серии снимков, выполненных со стандартных трасс 173-185. Расположение на поверхности озера границ стандартных кадров для трасс 173, 179 и 185 показано на рис. 3. Как видно, эти кадры покрывают практически всю поверхность озера. Важной особенностью этих серий снимков был малый интервал между повторными съемками, что позволило прописать сезонные вариации УЭПР ледовых покровов.

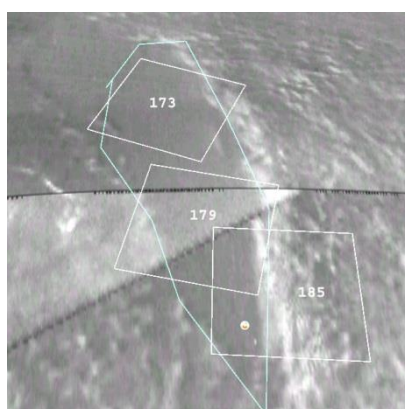


Рис. 3. Границы кадров снимков PALSAR-2 при съемках с трасс 173, 179, 185

Как и в случае обработки данных PALSAR-1, все имеющиеся снимки для каждой серий снимков в отдельности были совмещены поэлементно и усреднены в окне 50×50 пикселей, после чего вычислены среднее значение и СКО УЭПР для 26 SLC

изображений. На рис. 4 ниже приведена карта УЭПР (слева) и СКО (справа) для радарных снимков с трассы 173, полученных в период с июля 2019 по февраль 2022 г. Черный цвет на карте СКО соответствует нулю, а белый уровню стабильности 0,4 дБ. На рис. 5 показаны аналогичные карты для серии снимков на трассе 179. Можно отметить еле заметные вариации отражательных свойств и их стабильности. В пределах более темной области на карте СКО вверху слева уровень стабильности 0,17 дБ в отличие от всей другой поверхности в кадре, где стабильность УЭПР равна 0,2 дБ.

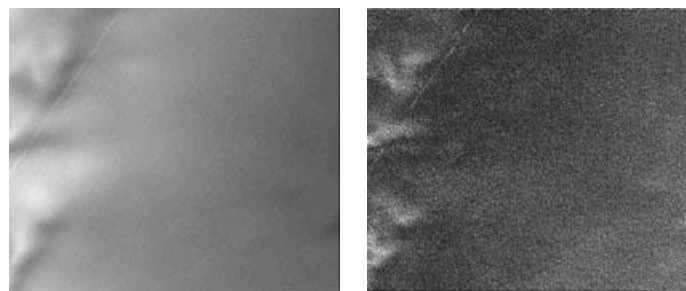


Рис. 4. Карты среднего значения и СКО УЭПР по данным PCA PALSAR-2, трасса 173

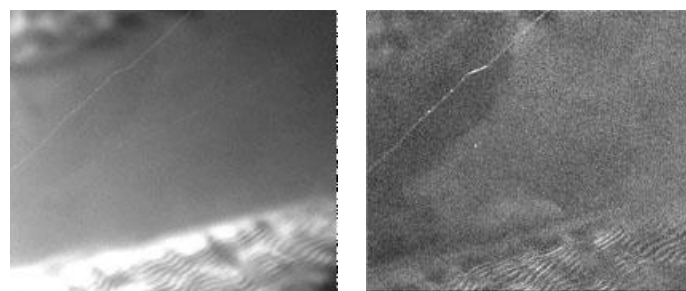


Рис. 5. Карты среднего значения и СКО УЭПР по данным PCA PALSAR-2, трасса 179

График временного изменения УЭПР тестового участка размером 3000×3000 пикселей на гладкой ледовой поверхности по данным с трассы 173 на НН поляризации приведен на рис. 6. Среднее значение УЭПР на двухлетнем интервале времени составляет -16,1 дБ, СКО равно 0,2 дБ.

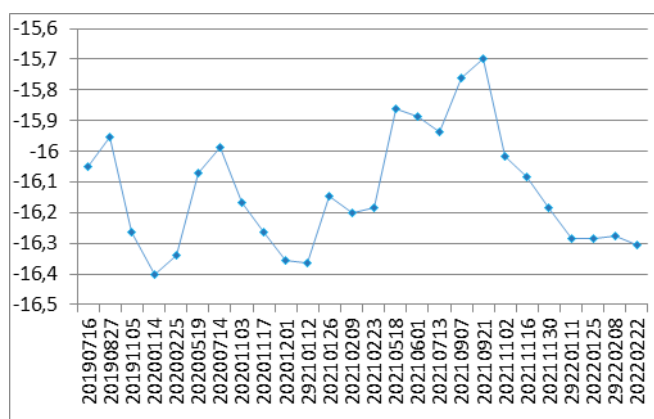


Рис. 6. Временной ход УЭПР ледовых покровов, дБ, по данным PALSAR-2, трасса 173

Аналогичный график для другого тестового участка размером 3000×3000 пикселей, расположенного в границах кадра на трассе 179, приведен на рис. 7. Среднее значение УЭПР на НН поляризации за два года наблюдений равно -16,2 дБ, СКО равно 0,16 дБ.

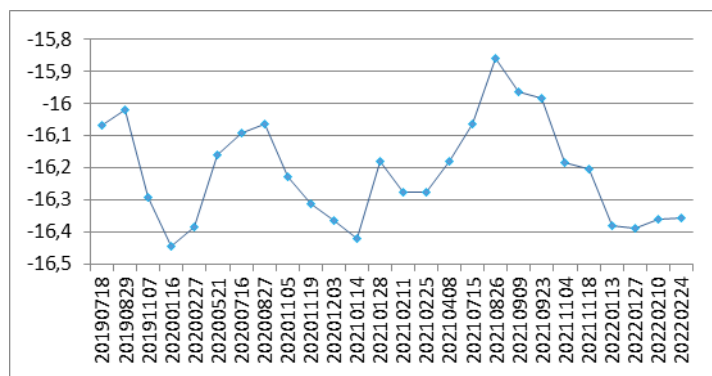


Рис. 7. Временной ход УЭПР ледовых покровов, дБ, по данным PALSAR-2, трасса 179

Представляют интерес сезонные вариации УЭПР, которые видны на рис. 6 и 7. Низкие значения типичны для измерений, сделанных зимой, в декабре-феврале, а высокие — преимущественно в августе-сентябре. Регулярное возрастание УЭПР на ~ 0.6 дБ может быть объяснено сезонными интенсивными осадками в виде снега с образованием снежных дюн вследствие ветреной погоды, которые типичны в это время года, согласно информации с метеостанции на полярной станции Восток.

Чтобы исключить влияние сезонных вариаций, вычтем измерения с графика рис. 7 из измерений с графика 6. Для обработки возьмём только пары измерений из сеансов съемки, разнесенных на 2 дня. Соответствующий график разностей УЭПР приведен на рис. 8. По оси абсцисс выложены даты съемки сеансов трассы 173.

Очевидна здесь хорошая повторяемость измерений ЭПР, сделанных с разных трасс, в разное время и по неперекрывающимся тестовым участкам поверхности озера. Заметный пик (~ 0.3 дБ) может быть объяснен пространственной неоднородностью выпавших снеговых осадков.

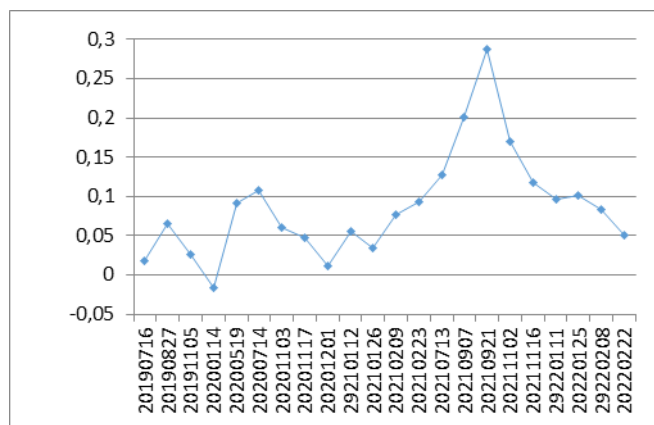


Рис. 8. Временной ход разности УЭПР тестовых участков, дБ, из измерений на трассах 173 и 179

Большинство других разностей УЭПР на рис. 8 вне периода наблюдений 20210907-20211102 находятся в пределах 0,1 дБ. СКО разностей равно 0,06 дБ. Столь высокая кратковременная стабильность измерений по данным съемки, разнесенных на 2 дня, может быть объяснена не только стабильностью отражения ледовых покровов, но и высокой кратковременной стабильностью работы PCA PALSAR-2.

Чтобы исключить влияние атмосферных осадков и других возможных сезонных эффектов, приводящих к вариациям отражательных свойств покровов при оценке долговременной стабильности, выберем измерения, сделанные только в зимнее время

года на интервале 2020-2022 гг. На рис. 9 и 10 приведены соответствующие подмножества измерений и наложены линии линейного тренда.

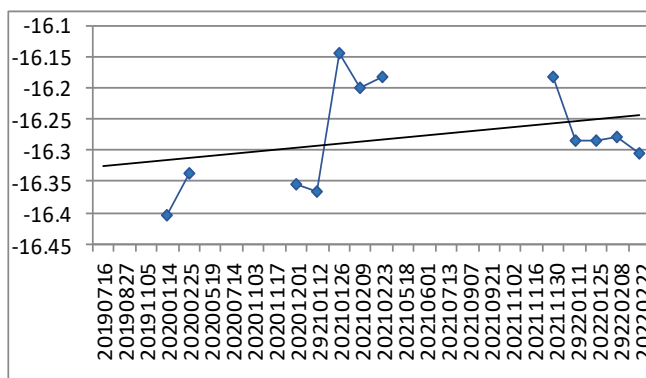


Рис. 9. УЭПР ледовых покровов, дБ, по данным зимних съемок PALSAR-2, трасса 173

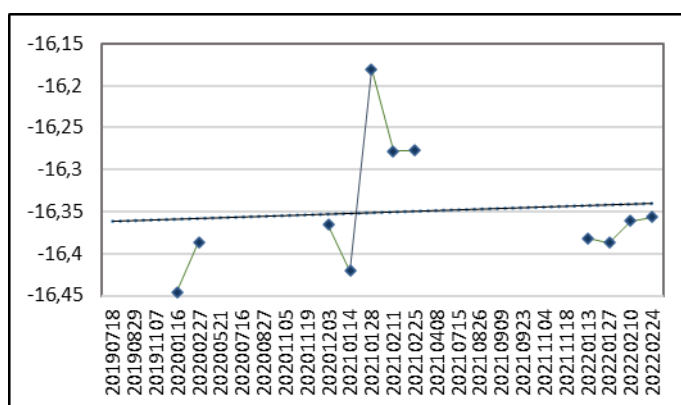


Рис. 10. УЭПР ледовых покровов, дБ, по данным зимних съемок PALSAR-2, трасса 179

Для 12 измерений с трассы 173 СКО УЭПР равно 0.082 дБ. Отметим небольшой тренд измерений в течение 2 лет. Для 12 измерений с трассы 179 СКО равно 0.076 дБ. Можно утверждать, что долговременная стабильность работы PCA PALSAR-2, равно как и УЭПР ледовых покровов озера Восток, составляет 0.08 дБ. Столь выдающаяся стабильность ледовых покровов озера Восток позволяет считать его перспективным протяженным калибровочным объектом, превосходящим по стабильности отражения все известные искусственные калибровочные средства. Одновременно, результатами анализа данных PCA подтверждается беспрецедентно высокая радиометрическая стабильность измерений PALSAR-2.

Заключение

Снежно-ледовые покровы высокоширотной части Антарктики в целом и ледовые покровы озера Восток в частности демонстрируют исключительно высокую временную стабильность отражения сигналов PCA, превосходящую по стабильности отражения все известные искусственные калибровочные средства. Несмотря на пространственную неоднородность УЭПР в пределах 1-2 дБ, круглогодичная стабильность измерений УЭПР (включая стабильность работы радара) находится в пределах 0,2 дБ в различных частях озера. Кратковременная стабильность измерений (на интервале 2 дней) равна 0,06 дБ. Долговременная стабильность зимних измерений PALSAR-2 по данным двухлетнего интервала времени составляет 0,08 дБ. Очевидной причиной стабильности отражательных свойств высокоширотной части Антарктики являются постоянно

низкие температуры порядка $-20\dots-60^{\circ}\text{C}$, а также низкий уровень атмосферных осадков в течение года.

При условии проведения измерений в одной и той же геометрии радиолокационной съемки, высокоширотные территории Антарктики могут быть рекомендованы в качестве объектов для интеркалибровки и мониторинга стабильности работы космических радаров. Практически единственным серьезным недостатком ледовых покровов озера Восток может быть довольно низкий уровень УЭПР поверхности, вследствие чего для радаров со слишком высоким уровнем теплового шума измерения при низком отношении сигнал-шум становятся малодостоверными. Отдельная проблема, требующая разрешения, — это влияние атмосферы в виде атмосферных осадков, расфокусировка изображения на ионосферных неоднородностях и Фарадеевское вращение плоскости поляризации сигнала.

Работа выполнена в рамках госзадания. Авторы признательны Японскому аэрокосмическому агентству JAXA за предоставленные в рамках научных проектов RA2 и RA6 радарные снимки PALSAR-1 и PALSAR-2.

Литература

1. Shimada M., Isoguchi O., Tadono T., Isono K. PALSAR Radiometric and Geometric Calibration // IEEE Trans. GRS, 2009, Vol. 47, No. 12, pp. 3915-3932.
2. M. Shimada, 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, No.1, pp.132–137.
3. Захаров А.И., Захарова Л.Н., Сорочинский М.В., Синило В.П., Ивановичев Е.Е. Радиометрическая калибровка космических РСА с помощью протяженных естественных объектов земной поверхности// Всероссийские открытые Армандовские чтения «Муром-2019». С. 511-516.