

Протяженные естественные объекты земной поверхности как средство контроля радиометрической стабильности космических РСА

А. И. Захаров, Л. Н. Захарова, В.П. Синило, Е.Е. Иванычев

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

Проведен анализ долговременной стабильности отражательных свойств различных типов естественных покровов по данным съемки японского космического радиолокатора с синтезированной апертурой PALSAR-1 и PALSAR-2. Выявлена высокая, сравнимая со стабильностью специализированных искусственных целей, стабильность отражательных свойств протяженных объектов Антарктики и Южной Америки, которые могут использоваться в качестве объектов для интеркалибровки и мониторинга стабильности работы космических радаров.

Ключевые слова: радиометрическая калибровка, стабильность, протяженные калибровочные цели, Атакама, озеро Восток

Distributed natural areas of Earth covers as verification tool of spaceborne SAR radiometric stability

A.I. Zakharov, L.N. Zakharova, V.P. Sinilo, E.E. Ivanychev

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

The analysis of the long-term stability of the scattering properties of various types of natural covers was carried out using Japanese PALSAR-1 and PALSAR-2 spaceborne synthetic aperture radar observations. High stability of the reflective properties of the extended objects of the Antarctica and South America, comparable with stability of specialized artificial targets, has been revealed. For that reason, distributed targets under discussion may be considered as suitable targets for spaceborne radars intercalibration and monitoring of their stability.

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

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, уголковые отражатели) и активные цели: транспондеры или активные радарные калибраторы. Типовая точность калибровки с применением уголковых отражателей порядка 0.15 дБ была достигнута в проекте TerraSAR-X (X-диапазон) при использовании уголковых отражателей 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]. Такого рода калибровочные цели выглядят яркими точечными объектами на радарных изображениях. Предсказуемость эффективной площади обратного рассеяния (ЭПР) этих целей делает их незаменимыми при измерении коэффициента передачи системы для абсолютной калибровки, их компактность позволяет детально исследовать особенности двумерной импульсной функции отклика РСА. Недостатком этих средств является необходимость их установки для проведения калибровочных работ с соблюдением ряда специфических требований к свойствам

подстилающей поверхности, обеспечения электропитания для транспондеров и мер по сохранности аппаратуры в течение всего цикла измерений.

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. Особенно заметны вариации ЭПР в разные сезоны года, когда процессы замерзания/оттаивания изменяют отражательные свойства подстилающей поверхности, участвующей в формировании отраженного сигнала. Более стабильными в роли точечных отражателей оказываются элементы инфраструктуры, расположенные в районах с круглогодичной положительной температурой воздуха [4]. Однако невозможность достаточно точной оценки ЭПР элементов инфраструктуры ограничивает возможности по проведению абсолютной калибровки. Естественные протяженные калибровочные объекты могли бы быть ещё одной альтернативой специализированной калибровочной аппаратуре. Тропические леса Амазонки — общеизвестный и фактически эталонный участок 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° 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 десятилетий [5]. Целью данной работы является демонстрация возможностей некоторых других протяженных естественных объектов для калибровки и интеркалибровки космических РСА на примере данных японских радаров L-диапазона PALSAR-1 (2006-2011 гг.) и PALSAR-2 (2014 г. – настоящее время).

Принципиально отличающимися от лесов Амазонки по геофизическим характеристикам являются два участка земной поверхности, исследованные в данной работе в качестве предположительно стабильных отражателей. Особенностью этих территорий являются также стабильные, хотя и в основном экстремальные погодные условия. Это поверхности подледного озера Восток в Антарктиде и пустыни Атакама в Южной Америке. Первые результаты исследования стабильности их отражательных свойств были описаны в [6]. Пустыня Атакама в Чили, на побережье Тихого океана, известна исключительно засушливым климатом. В провинции Антофагаста, покрываемой снимком PALSAR (рис. 1, слева, с координатами центра 22.367° ю.ш., 68.812° з.д.), выпадает порядка 1 мм осадков в год. Типичная температура воздуха летом 19-20°C, зимой 13-14°C.

Для построения карты распределения уровня стабильности отражательных свойств по поверхности региона в пределах радиолокационного кадра были взяты 12 снимков, сделанных в период с 26.07.2007 по 19.12.2010 г. Размер стандартного кадра ~ 70×70 км. Данные уровня обработки 1.1 с разрешением 4.5 м по азимуту и 4.7 м по наклонной дальности (в режиме FBS) были совмещены поэлементно, усреднены в окне 50×50 пикселей, после чего были использованы для вычисления среднего и среднеквадратичного отклонения УЭПР в децибелах.

Видимые на радарном снимке контрасты обусловлены мелкомасштабными шероховатостями, крупными уклонами рельефа и диэлектрическими свойствами грунта. На правом изображении — уровень долговременной стабильности отражающей поверхности. Перепады яркости от черного до белого соответствуют изменениям стабильности от 0 до 1 дБ. Темное пятно на карте стабильности немного влево от центра — шероховатая пустынная равнина, наиболее стабильный участок в пределах кадра. Самое яркое трапециевидное пятно на изображении (рис. 1, слева) — город

Калама, для которого характерно довольно нестабильное отражение сигнала РСА. Яркое пятно на карте стабильности, расположенное ниже центра кадра — пруды-отстойники шахт по добыче медной руды, расположенных неподалеку. В целом, левый край сцены характеризуется повышенной нестабильностью вследствие активной хозяйственной деятельности человека, светлое пятно на правом краю показывает слабую стабильность из-за низкого отношения сигнал-шум слабо отражающих участков.

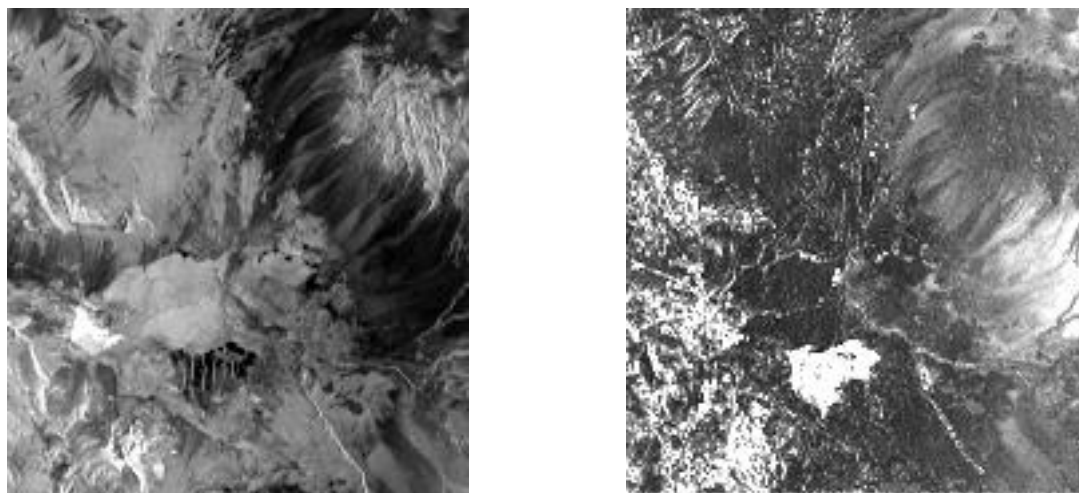


Рис. 1. Среднее за 4 года значение УЭПР поверхности в пустыне Атакама (слева) и среднеквадратичное отклонение УЭПР (справа) по данным РСА PALSAR-1

График временных изменений УЭПР фрагмента поверхности размером 1000×1000 пикселей в левом верхнем углу радарного кадра по данным PALSAR-1 приведен на рис. 2. Среднее значение УЭПР -15 дБ, стандартное отклонение 0.52 дБ.

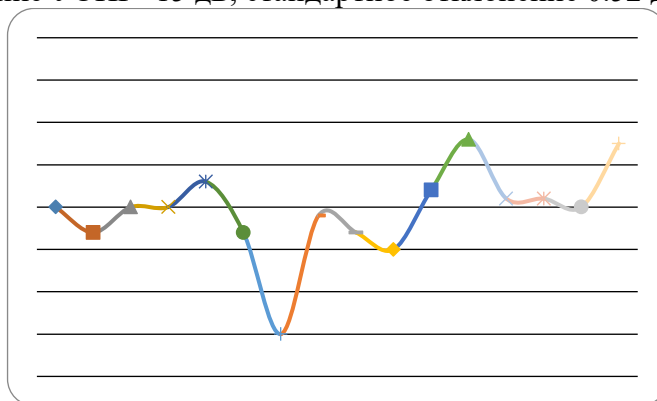


Рис. 2. График временного хода УЭПР фрагмента поверхности по данным РСА PALSAR-1

Набор данных РСА PALSAR-2 из 16 снимков, сделанных в период с 04.10.2014 по 29.08.2020 г., был использован для построения аналогичных карт среднего значения и стабильности отражения, приведенных на рис.3. Перепады яркости от черного до белого на рисунке справа также соответствуют изменениям стабильности от 0 до 1 дБ. График временных изменений УЭПР фрагмента поверхности размером 1000×1000 пикселей в левом верхнем углу радарного кадра по данным PALSAR-2 приведен на рис.4. Среднее значение УЭПР -17 дБ, стандартное отклонение 0.35 дБ. Отличие в средних значениях УЭПР объясняется разными углами падения зондирующего сигнала и несовпадением тестовых участков поверхности в пределах формально выбранного

окна усреднения. В пределах кадра данных PALSAR-2 выявлены также участки несколько меньшего размера со стабильностью до 0.19 дБ.

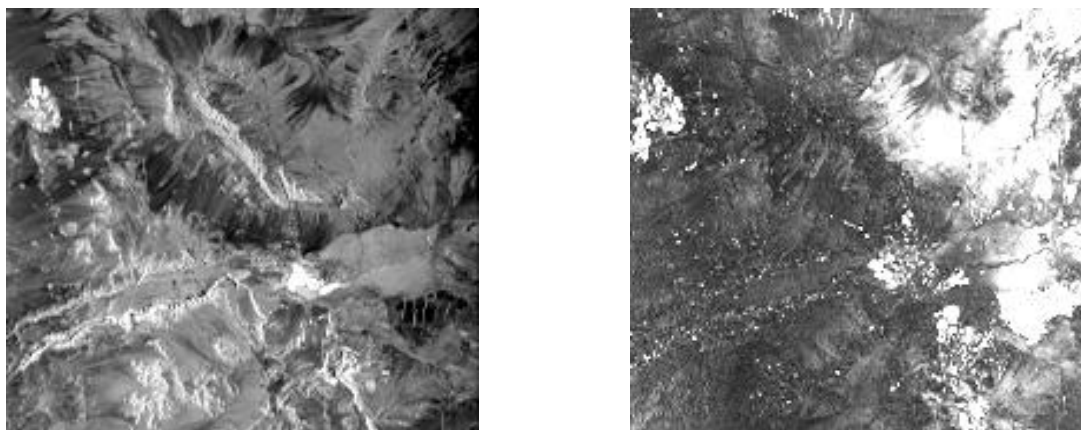


Рис. 3. Среднее за 6 лет значение УЭПР поверхности пустыни Атакама (слева) и среднеквадратичное отклонение УЭПР (справа) по данным PCA PALSAR-2

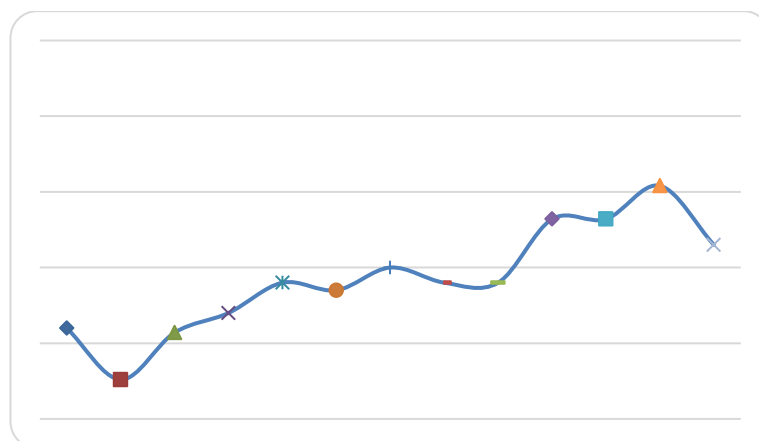


Рис. 4. График временного хода УЭПР фрагмента поверхности в левом верхнем углу по данным PCA PALSAR-2 на интервале 6 лет

Одним из наиболее привлекательных тестовых участков может быть поверхность высокоширотного озера Восток, имеющего размер примерно 250×50 км. На гладкой ледовой поверхности этого озера, лежащего на глубине 4 км под слоем льда, незаметны какие-либо проявления донного рельефа. Для тестового участка в средней части озера (координаты центра снимка на рис. 5 — 77.3° ю.ш., 104.8° в.д.), 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 с преимущественным направлением с запада на восток (на рис.5 — слева направо). Редко выпадающие снеговые осадки сносятся ветром к восточному берегу, образуя вдоль берега снежные дюны (вне данного кадра). Последствия снежных метелей на поверхности озера иногда проявляются кратковременно в виде повышения уровня УЭПР на 1.5 – 2 дБ. На рис. 5 слева приведена карта среднего значения УЭПР ледовой поверхности в пределах радиолокационного снимка поверхности озера Восток по данным съемки 12 изображений радаром PALSAR-1 в период 2007-2011 гг. Справа – карта стабильности или уровня среднеквадратичного отклонения УЭПР поверхности. Перепады яркости от черного до белого соответствуют здесь изменениям стабильности от 0 до 0.4 дБ, в

отличие от карт Атакамы. В нижнем левом углу снимка на рис. 5 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. 5 справа: единственным нестабильным объектом в пределах кадра является трасса санно-тракторного пути.

Для большей наглядности УЭПР ледовой поверхности озера в левой верхней части снимка рис. 5 была усреднена в окне 500×5000 пикселей и представлена в виде графика. График вариаций УЭПР из 12 снимков PALSAR-1 представлен на рис. 6. Среднее значение УЭПР в пределах окна усреднения -17.8 дБ, среднеквадратичное отклонение 0.19 дБ.

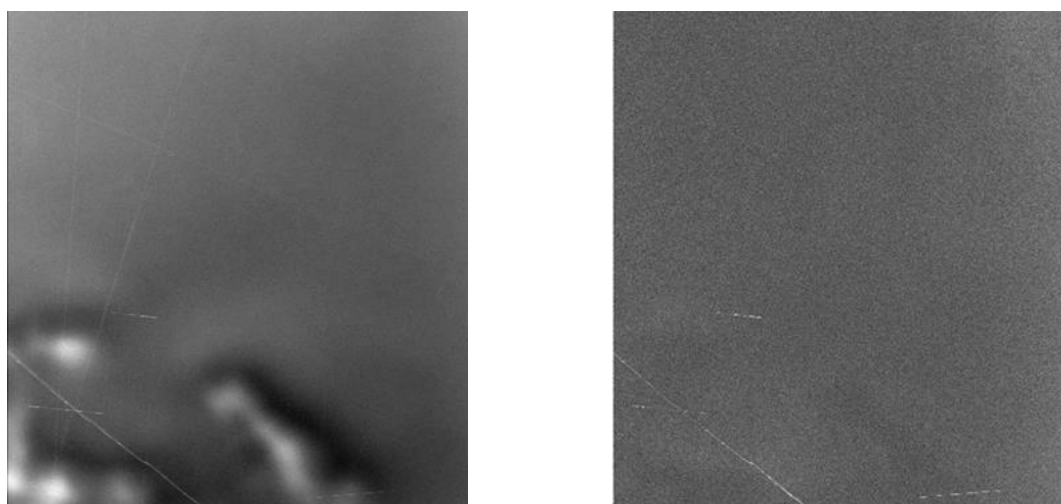


Рис. 5. Среднее за 4 года значение УЭПР озера Восток в пределах кадра (слева) и среднеквадратичное отклонение УЭПР (справа) по данным PCA PALSAR-1

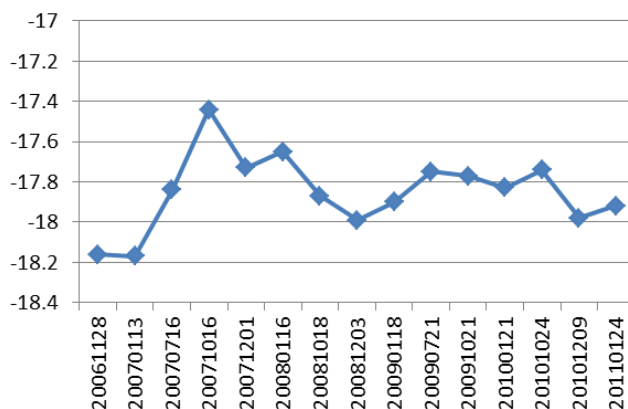


Рис. 6. График временного хода УЭПР фрагмента поверхности озера Восток по данным PCA PALSAR-1

Наиболее высокий уровень стабильности отражательных свойств ледовых покровов озера ~ 0.17 дБ для поверхности рис. 5 наблюдался по данным PCA PALSAR-2 в 2019-2020 годах при съемке с условной трассы 173. Карта среднего значения УЭПР в пределах кадра радара PALSAR-2 и уровня среднеквадратичного отклонения УЭПР поверхности или стабильности, построенные по 12 снимкам, выглядят аналогично тем, что на рис. 5, а потому здесь не приводятся.

Практически единственным серьезным недостатком рассмотренных территорий в Антарктике может быть довольно низкий уровень УЭПР ледовых покровов, вследствие чего для радаров со слишком высоким уровнем теплового шума измерения их УЭПР становятся малодостоверными. Отдельная проблема, требующая разрешения, — это влияние атмосферы в виде метеоосадков, расфокусировки изображения на ионосферных неоднородностях и Фарадеевского вращения плоскости поляризации сигнала.

Заключение

Исследованы естественные протяженные объекты на поверхности Земли, расположенные на континентах Антарктида и Южная Америка, с целью выявления поверхностей со стабильными отражательными свойствами. В основном, стабильность их отражательных свойств не уступает стабильности искусственных калибровочных целей — уголковых отражателей. Наилучшие по стабильности показатели демонстрирует ледовая поверхность озера Восток в Антарктике, имеющая круглогодичную стабильность лучше 0.17 дБ на интервале 4 года. При условии проведения измерений в одной и той же геометрии радиолокационной съемки рассмотренные протяженные естественные объекты могут быть рекомендованы в качестве объектов для интеркалибровки и мониторинга стабильности работы космических радаров.

Работа выполнена в рамках госзадания. Авторы признательны Японскому аэрокосмическому агентству JAXA за предоставленные в рамках научного проекта РАБ радарные снимки PALSAR-1 и PALSAR-2.

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, pp. 1-4.
2. Shimada M., Isoguchi O., Tadono T., Isono K. PALSAR Radiometric and Geometric Calibration // *IEEE Trans. GRS*, 2009, Vol. 47, No. 12, pp. 3915-3932.
3. Захаров А.И., Сорочинский М.В., Захарова Л.Н., Иванычев Е.Е. Применение естественных точечных и протяженных объектов для радиометрической калибровки РСА // IV Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред// Материалы VI Всероссийской научной конференции, Муром, 27-29 мая 2014 г. С. 230-235.
4. Yang J., Qiu X., Ding C., Lei B, Identification of Stable Backscattering Features, Suitable for Maintaining Absolute Synthetic Aperture Radar (SAR) Radiometric Calibration of Sentinel-1// *Remote Sens.* 2018, 10, 1010.
5. 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.
6. Захаров А.И., Захарова Л.Н., Сорочинский М.В., Синило В.П., Иванычев Е.Е. Радиометрическая калибровка космических РСА с помощью протяженных естественных объектов земной поверхности// Всероссийские открытые Армандовские чтения «Муром-2019». С. 511-516.