

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2019»

## **Радиометрическая калибровка космических РСА с помощью протяженных естественных объектов земной поверхности**

А.И. Захаров, Л.Н. Захарова, М.В. Сорочинский, В.П. Синоло, Е.Е. Ивановичев

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

*Проведен анализ долговременной стабильности отражательных свойств различных типов естественных покровов по данным съемки японского космического радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) PALSAR. 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.*

*The analysis of the long-term stability of the scattering properties of various types of natural covers was carried out using Japanese PALSAR 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.*

Достоверность измеряемых радаром отражательных характеристик поверхности, являющихся входными параметрами в радиофизических моделях рассеяния, обеспечивается калибровкой радаров с синтезированной апертурой (РСА). Общепринятым способом обеспечения калибровочных работ является внешняя калибровка, а средствами внешней калибровки - 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 PALSAR (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]. Особенностью использования такого рода калибровочных целей является то, что они выглядят яркими точечными объектами на радарных изображениях. Предсказуемость 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 ряде работ [3] рассматривался вопрос об использовании объектов инфраструктуры, выглядящих 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 оказываются элементы инфраструктуры в роли точечных отражателей, 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. В мире накоплен немалый опыт использования лесных покровов, тропических лесов Амазонки – стабильность отражательных свойств этих протяженных объектов в L-диапазоне (длина волны 23 см) оказалась равной 0.22 дБ. Недостатки протяженных естественных объектов в части абсолютной калибровки аналогичны естественным точечным объектам, но протяженные объекты могут оказаться более надежным объектом при абсолютной калибровке в схеме интеркалибровки, а также могут быть пригодны для контроля стабильности работы бортовой аппаратуры. Целью этой работы является демонстрация возможностей некоторых протяженных естественных объектов для калибровки космических РСА.

Одними из первых хорошо изученных нами протяженных объектов являются нефтяные платформы на Каспии, южнее полуострова Апшерон [5-7]. Нефтяная платформа — это сложное громоздкое сооружение. Размеры типовой платформы на этом месторождении равен примерно 80×100 м. Высота платформы с учетом буровой вышки достигает 80 метров. На рис. 1 дан фрагмент радиолокационного изображения группы нефтяных платформ, полученного со спутника PALSAR с предельным разрешением (формат SLC). Платформы здесь смотрятся яркими точками на фоне водной поверхности. Кривые белые линии, тянущиеся от берега в море — эстакады.



**Рис. 1. Радарный снимок скопления нефтяных платформ в районе «Нефтяных камней»**

Поскольку платформа является протяженной целью на снимке, ЭПР платформы вычислялась путем интегрирования отраженного сигнала в прямоугольнике размером 80 пикселей по азимуту на 20 пикселей по дальности. На рис. 2 приведена гистограмма стабильности отражения 200 платформ на НН поляризации по результатам анализа 22 снимков РСА PALSAR, сделанных в 2006-2010 гг. По вертикальной оси отложено количество платформ с заданным уровнем стабильности, по горизонтальной – стабильность отражения в децибелах. Видно, что более 80 платформ имеют стабильность отражения лучше 0.6 дБ.



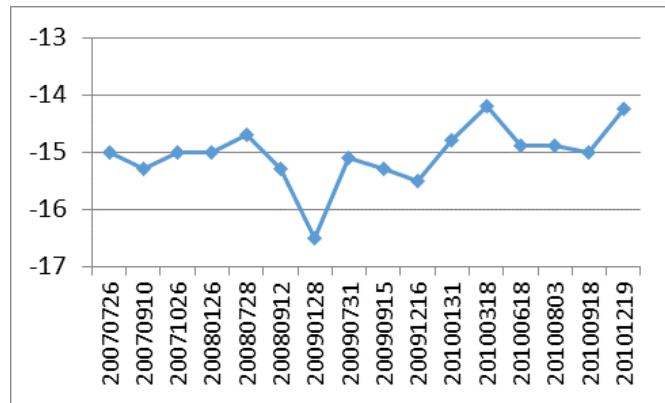
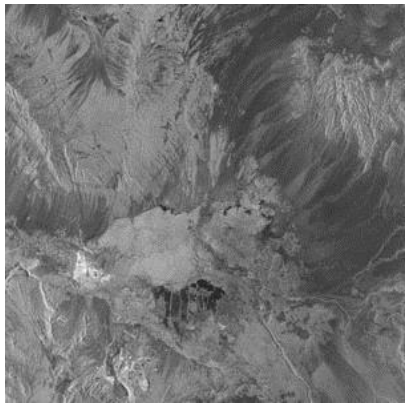
**Рис. 2. Гистограмма распределения 200 нефтяных платформ в зависимости от стабильности отражения на НН поляризации**

Нефтяные платформы на Каспии могут считаться перспективным средством мониторинга стабильности работы космических РСА в силу стабильности геометрии конструкций платформ, а также состояния подстилающих покровов, заключающейся в отсутствии ледовых покровов на море в этом регионе в холодное время года, отчего ЭПР платформ не зависела от времени года на интервале 4 лет.

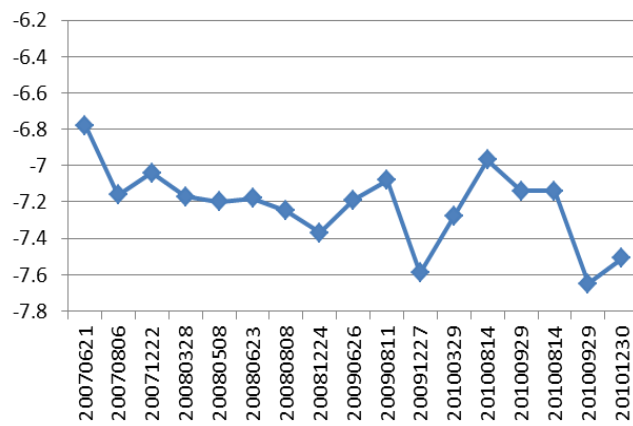
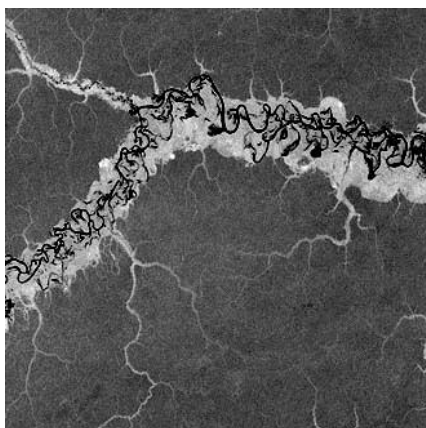
Принципиально другими являются рассмотренные нами четыре участка земной поверхности в регионах с различными природными и погодными условиями, исследованные нами в качестве предположительно стабильных отражателей. Особенностью этих территорий являются также стабильные, хотя и в основном экстремальные погодные условия. Среди них 2 области в Антарктике и две – в Южной Америке. Все ниже приведённые измерения УЭПР сделаны по результатам съёмки РСА PALSAR на согласованной НН поляризации.

Пустыня Атакама в Чили, на побережье Тихого океана, характерна исключительно засушливым климатом. В провинции Антофагаста, покрываемой снимком PALSAR (рис. 3, 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<sup>0</sup>, а зимой 13-14<sup>0</sup>. Удельная ЭПР территории на этом снимке была усреднена в окне 500\*500 в левой верхней части кадра на рис. 3 слева. График вариаций УЭПР из 12 снимков на интервале 3.5 года представлен на рис. 3 справа. Среднее значение УЭПР -15.0 дБ, с.к.о. 0.52 дБ.

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 в год и практически постоянной температуре воздуха 27-28<sup>0</sup>, они оказываются привлекательным объектом калибровки и интеркалибровки космических РСА. На рис.4 слева представлен снимок PALSAR с координатами центра 1.57 ю.ш., 62.543 з.д. Находящаяся в пределах кадра область расположена в бассейне реки Рио-Негро, в 300 км к северо-западу от Манауса. Удельная ЭПР территории на снимке была усреднена в окне 500\*2000 в левой нижней части кадра. График вариаций УЭПР из 12 снимков представлен на рис. 4 справа. Среднее значение УЭПР -7.2 дБ, с.к.о. 0.22 дБ.

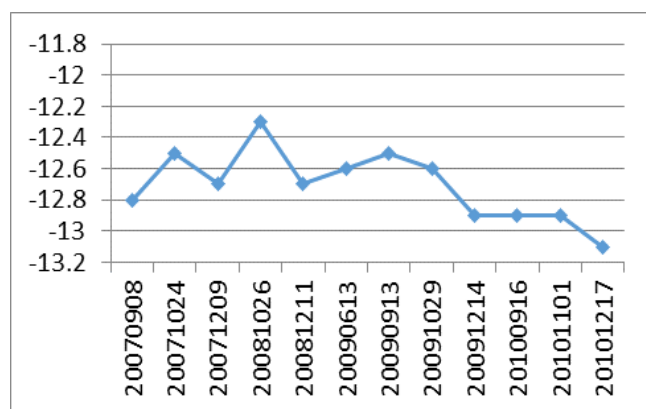


**Рис. 3** Снимок PCA PALSAR района пустыни Атакама (слева) и график временного хода УЭПР фрагмента поверхности (справа)



**Рис. 4** Снимок PCA PALSAR тропического леса в бассейне Амазонки (слева) и график временного хода УЭПР леса (справа)

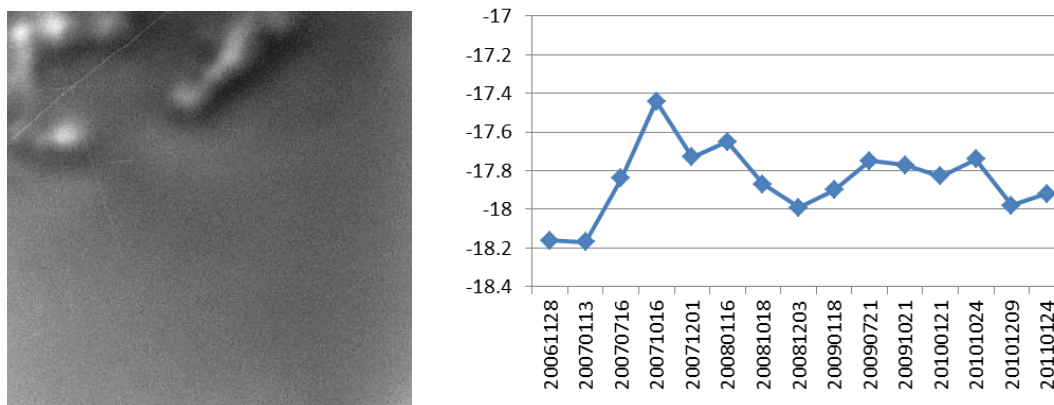
Для тестового участка в восточной Антарктиде с условным названием Купол С (координаты центра снимка на рис. 5: 75.016 ю.ш., 118.162 в.д.), как и для всей высокоширотной территории на этом материке, типичны экстремальные погодные условия – крайне низкое годовое количество осадков 18 мм, температура зимой  $-65^{\circ}$ , летом  $-35^{\circ}$ .



**Рис. 5** Снимок PCA PALSAR В районе купола С, Антарктида, (слева) и график временного хода УЭПР фрагмента поверхности (справа)

Слабые вариации УЭПР в пределах кадра порядка 0.5 - 1 дБ обусловлены крупномасштабными уклонами рельефа. Чтобы исключить их, удельная ЭПР территории на снимке была усреднена в сравнительно небольшом окне 500\*500 в левой верхней части кадра. График вариаций УЭПР по данным 12 снимков представлен на рис. 5 справа. Среднее значение УЭПР -14.4 дБ, с.к.о. 0.24 дБ.

Наиболее привлекательным тестовым участком может оказаться поверхность высокоширотного озера Восток. На гладкой ледовой поверхности этого озера, лежащего на глубине 4 км под слоем льда, незаметны какие-либо проявления донного рельефа. Для тестового участка в самой южной части озера (координаты центра снимка на рис. 6 - 77.3 ю.ш., 104.8 в.д.), как и для всей высокоширотной территории на этом материке, типичны те же экстремальные погодные условия, что и для недалеко расположенной области Купол С.



**Рис. 6 Снимок PCA PALSAR поверхности озера Восток, Антарктида, (слева) и график временного хода УЭПР фрагмента поверхности озера (справа)**

В верхней части снимка на рис. 6 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. Удельная ЭПР ледовой поверхности озера в нижней части снимка рис. 6 слева была усреднена в окне 500\*5000 пикселей. График вариаций УЭПР из 12 снимков представлен на рис. 6 справа. Среднее значение УЭПР -17.8 дБ, с.к.о. 0.19 дБ.

Серьезным недостатком рассмотренных территорий в Антарктике может быть довольно низкая УЭПР покровов, вследствие чего для радаров со слишком высоким уровнем теплового шума. Отдельная проблема, требующая разрешения - Фарадеевское вращение плоскости поляризации сигнала, приводящее к занижению измерений на согласованной и завышению на ортогональной поляризациях.

### **Заключение**

Исследован ряд естественных протяженных объектов на поверхности Земли с целью выявления поверхностей со стабильными отражательными свойствами. Среди рассмотренных нефтяные платформы Каспия и 4 территории в Антарктике и Южной Америке. В основном, стабильность отражательных свойств, исследованных естественных протяженных объектов не уступает стабильности искусственных калибровочных целей – уголковых отражателей. Наилучшие по стабильности показатели – у ледовой поверхности озера Восток в Антарктике, имеющей круглогодичную стабильность 0.19 дБ на интервале 3.5 года. Протяженные

естественные объекты могут быть рекомендованы в качестве объектов для интеркалибровки и мониторинга стабильности работы космических радаров.

*Авторы признательны Японскому аэрокосмическому агентству JAXA за предоставленные в рамках научного проекта РАБ радарные снимки PALSAR.*

## **Литература**

1. Döring B.J., Schwerdt M., Schrank D. Absolute radiometric calibration approach using different types of ground targets// SAR Calibration and Validation Workshop 2008. 27-28 November 2008. DLR, Oberpfaffenhofen, Germany.

2. M.Shimada, O.Isoguchi, T.Tadono, K.Isono, «PALSAR Radiometric and Geometric Calibration», IEEE Trans. GRS, Vol. 47, No. 12, Dec. 2009, 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. J.Yang, X.Qiu, C.Ding, B.Lei, Identification of Stable Backscattering Features, Suitable for Maintaining Absolute Synthetic Aperture Radar (SAR) Radiometric Calibration of Sentinel-1// Remote Sens. 2018, 10, 1010; doi:10.3390/rs10071010 .

5. А.И. Захаров, Л. Н. Захарова, М.В. Сорочинский, В.П. Синоло, Е.Е. Иванычев. Исследование отражательных свойств нефтяных платформ на Каспии как стабильных радиолокационных отражателей по данным радиолокатора PALSAR//Труды Всероссийской научной конференции «Практическая радиолокация» в рамках V Всероссийских Армандовских чтений «Муром`2015», 29.06-1.07. 2015г., Муром, С. 110-114.

6. A. Zakharov, L. Zakharova, M. Sorochinsky, “*Study of Scattering Properties of Oil platforms in Caspian Sea as Stable Radar Scatterers according to PALSAR Data*”, Proceedings of EUSAR 2016 - 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Hamburg, Germany, June 06-09, 2016, pp. 331-333, 2016.

7. Alexander Zakharov, Ludmila Zakharova, Mark Sorochinsky, Tumen Chimitdorzhiev, “*Oil platforms in Caspian Sea as stable distributed radar scatterers for PALSAR calibration*”, Proceedings of IGARSS2016, Beijing, China, July 06-13, 2016, pp. 3859-3862, 2016.