

## Применение естественных точечных и протяженных объектов для радиометрической калибровки РСА

А.И. Захаров, М.В. Сорочинский, Л.Н. Захарова, Е.Е. Иваницhev

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 141190, г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1, [aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru](mailto:aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru)

*Проведен анализ стабильности отражательных свойств различных естественных целей в различных регионах России на радарных снимках японского космического радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) PALSAR. Среди них хозяйственные постройки в Подмоскowie и Нижегородской области, элементы конструкций магистральных газопроводов в Приобье, мачты линий электропередач в Забайкалье, элементы нефтедобывающей инфраструктуры в прибрежной зоне на Каспии и др.*

*An analysis of backscatter stability for various natural targets on Japanese PALSAR images of different Russian territories was conducted. Among them are economic buildings in Moscow and Nizhniy Novgorod regions, structural elements of main gas pipelines in Ob gulf area, masts of power lines in Transbaikalia, elements of oil infrastructure in the Caspian Sea coastal zone, etc.*

1. Существующая в настоящее время обширная группировка радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) аэрокосмического базирования открывает широкие возможности по исследованию характеристик земной поверхности по ее отражательным свойствам в радиодиапазоне. Наиболее полно отражательные свойства описываются соответствующей матрицей рассеяния поверхности [1], элементы которой и измеряются с помощью РСА. Достоверность измеряемых радаром отражательных характеристик поверхности, являющихся входными параметрами в радиофизических моделях рассеяния, обеспечивается калибровкой РСА. Последняя преследует две цели: во-первых, первоначальное уточнение сквозного коэффициента передачи РСА после выхода носителя на орбиту и, во-вторых, отслеживание изменений этого параметра в процессе эксплуатации сенсора.

Для измерения всех элементов матрицы рассеяния необходимо применение поляриметрических РСА, калибровку которых осуществляют с помощью нескольких специально подобранных искусственных эталонных отражателей, расположенных на специальных калибровочных полигонах [2]. Создание и эксплуатация таких полигонов весьма затратны и, к тому же, даже в мировом масштабе их число ограничено, в связи с чем возникает интерес к поиску и использованию для целей калибровки естественных природных отражателей со стабильными характеристиками, в частности, протяженных объектов [3,4]. Следует отметить, что мониторинг отдельных параметров РСА может быть выполнен и при ограниченном числе эталонных отражателей, в том числе и с применением естественных целей [5].

2. В практике дистанционного зондирования Земли среди действующих сенсоров аэрокосмического базирования полнополяриметрические РСА представлены единичными экземплярами. Подавляющее же большинство составляют радиолокаторы, работающие на одной или двух поляризациях, что не позволяет получить полную матрицу рассеяния того или иного элемента земной поверхности, а приходится ограничиваться измерением лишь ее удельной эффективной отражающей поверхности (ЭПР)  $\sigma_0$  на отдельных поляризациях. С другой стороны, калибровка таких РСА существенно упрощается и теоретически для ее выполнения достаточно одного эталонного отражателя. В этом случае типовыми контролируемыми параметрами являются: определение сквозного коэффициента передачи для измерения ЭПР объектов

поверхности, контроль стабильности коэффициента передачи, оценка разрешающей способности измерений РСА по поверхности, оценка максимального уровня боковых лепестков двумерной автокорреляционной функции зондирующего сигнала и интегрального уровня её боковых лепестков.

3. Вместе с традиционно используемыми эталонными уголковыми отражателями интерес представляет применение для целей калибровки параболических антенн, в фокальной плоскости которых расположены дифракционные решетки. Такие цели обладают высокой яркостью и стабильными характеристиками [6]. Динамика изменений ЭПР трех антенн полигона ОКБ МЭИ «Медвежьи озера» в L-диапазоне в 2006-2010 гг. по данным РСА ALOS PALSAR приведена на рис. 1. При этом стабильность отражательных свойств антенны №1 по результатам 37 сеансов составляет 0.64 дБ.

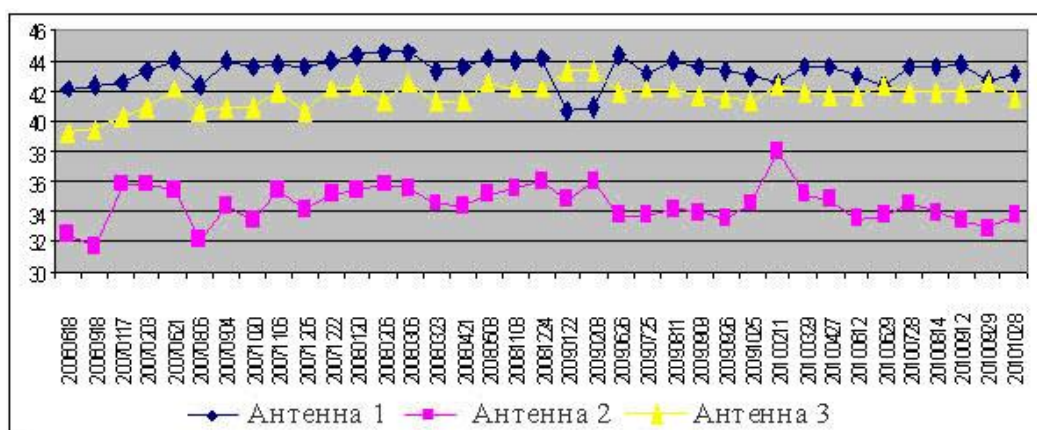


Рис. 1. Изменение во времени ЭПР отражателей на основе параболических антенн в L-диапазоне в 2006-2010 гг.

4. Наряду с искусственными эталонными отражателями представляется весьма перспективным использование для целей калибровки естественных стабильных отражателей. Причиной появления ярких точечных откликов на снимках РСА могут быть разнообразные объекты, расположенные на поверхности Земли, как правило, элементы хозяйственной инфраструктуры. К типичным механизмам, вызывающим рассеяние на таких объектах, можно отнести двойное переотражение (стена здания – земная поверхность), однократное отражение (крыши зданий), уголковое отражение (стены внутреннего угла дома - земная поверхность), дипольное рассеяние (элементы конструкции опор ЛЭП). Обнаружено, что на стабильность уровня эхо-сигнала точечных целей могут существенно влиять вариации состояния подстилающей поверхности из-за метеоосадков и механизм отражения. Тем не менее, на урбанизированных территориях встречаются весьма стабильные отражатели. ЭПР обнаруженных нами отражателей превосходила  $44 \text{ дБм}^2$  в L-диапазоне, нестабильность отражения лучше 0.4 дБ, что делает эти объекты удобным средством контроля стабильности РСА.

Абсолютное значение эффективной площади рассеяния естественных объектов, как правило, непредсказуемо, вследствие чего они непригодны для контроля абсолютного значения коэффициента передачи измерительной системы, но вместе с тем, они могут быть полезны для контроля стабильности работы аппаратуры.

На рис.2. приведено радиолокационное изображение в L-диапазоне окрестностей полигона «Медвежьи озера», где выделяются яркие точки, обведенные кружками, которые при стабильности отражений от них могли бы служить в качестве эталонных

целей. Изменения ЭПР во времени двух ярких точек, одна из которых находится вблизи полигона, а другая на территории промзоны г. Фрязино, представлены на рис. 3. Окрестности точек изображены на карте Google на рис. 4. Как видно из сравнения рис. 1 и 3, ЭПР и стабильность естественных ярких точек сопоставима с отражением от антенн.

Большое количество ярких точек может быть найдено в местах расположения хозяйственной инфраструктуры, например, вдоль трассы газопровода Ямбург-Ныда (рис. 5а), или высоковольтной линии электропередач, как это показано на рис. 5б, где основным источником отражений являются опоры ЛЭП, проходящей вблизи озера Байкал. Количественные значения ЭПР для десяти точек, находящихся на трассе газопровода, приведены в таблице 1.

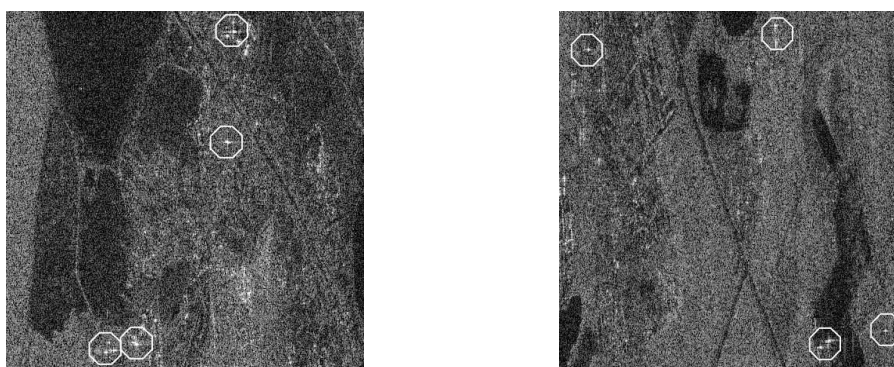


Рис. 2. Поиск ярких стабильных отражателей на изображении PALSAR (режим FBS34.3)

Таблица 1. ЭПР десяти ярких целей на газопроводе Ямбург-Ныда

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЭПР, дБм <sup>2</sup>	19.5	17.2	17.7	18.7	20.6	17.9	20.8	19.5	18.9	18.7
Ст.откл., дБм <sup>2</sup>	4.9	3.9	4.2	4.6	4.4	3.9	4.4	5.2	4.1	3.4

Нефтяные промыслы в Каспийском море - это обширная инфраструктура, включающая морские платформы, нефтепроводы, нефтяные терминалы, различные портовые сооружения на побережье (рис. 6). Обилие металлических конструкций приводит к появлению многочисленных ярких целей, которые могут быть использованы для калибровки РСА. ЭПР некоторых из объектов приведена в таблицах 2 и 3.

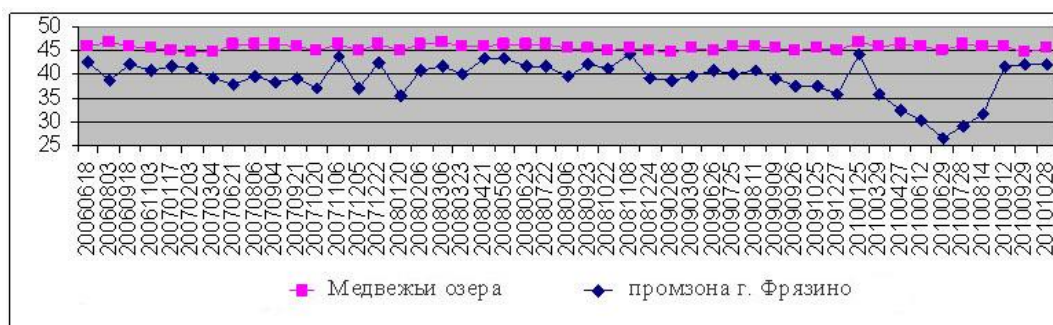


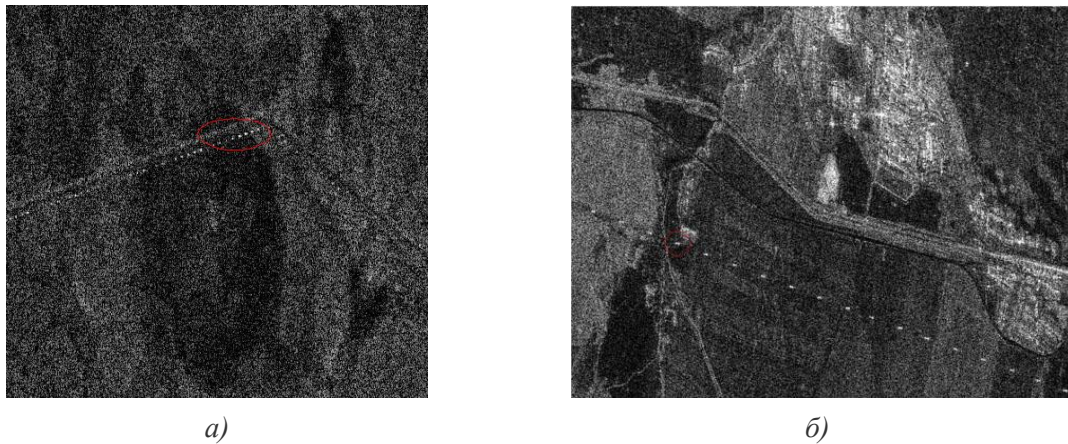
Рис. 3. ЭПР двух стабильных естественных целей

5. Проведенные нами исследования показали, что существует множество ярких точек на земной поверхности, которые могут рассматриваться как кандидаты в калибровочные цели, однако большинство из них показывает сезонную нестабильность ЭПР. Тем не менее, в отдельных регионах можно найти стабильные отражатели с нестабильностью порядка 0.5 дБ. Предположительно наиболее стабильный механизм отражения естественных пассивных отражателей – угловое отражение.

Обнаружено, что на урбанизированных территориях и в промышленных зонах существуют естественные точечные объекты, имеющие стабильность уровня отражения, сравнимую со стабильностью антенн полигона ОКБ МЭИ.



**Рис. 4. Яркие цели в окрестности полигона «Медвьи озера» (а) и в промзоне г. Фрязино (б) на карте Google**



**Рис. 5. Яркие цели вдоль трассы газопровода Ямбург-Ныда (а) и высоковольтной линии электропередачи около озера Байкал (б)**



**Рис. 6. Яркие точечные цели на каспийском побережье (Сангачальский нефтяной терминал)**

Среди исследованных объектов в других регионах наиболее стабильным отражением обладают, по всей видимости, нефтяные платформы в районе месторождения Нефтяные Камни на Каспии. Наилучший показатель нестабильности для нефтяных платформ на Каспии составляет 0.3 дБ.

Таблица 2. ЭПР двадцати нефтяных платформ в Каспийском море

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЭПР, дБм <sup>2</sup>	36.6	42.3	39.9	37.2	35.3	43.4	37.1	37.3	38.9	36.4
Ст.откл., дБм <sup>2</sup>	0.7	0.9	0.4	0.7	0.7	1.4	0.8	0.7	0.5	0.7
N	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ЭПР, дБм <sup>2</sup>	35.8	37.7	41.8	38.9	37.9	37.1	28.2	39.8	39.3	42.0
Ст.откл., дБм <sup>2</sup>	0.7	0.3	1.7	0.3	0.5	0.5	1.2	0.9	0.6	1.9

Таблица 3. ЭПР двадцати стабильных точечных целей на каспийском побережье (Сангачальский нефтяной терминал)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЭПР, дБм <sup>2</sup>	--	48	37.5	35.7	--	38.3	11.3	38.1	41.2	39.5
Ст.откл., дБм <sup>2</sup>		3.4	1.8	2.7		5.1	5.2	4.3	2.6	4.3
N	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ЭПР, дБм <sup>2</sup>	38	33	38.7	33.7	43	45.9	37.7	47.7	42.2	28.9
Ст.откл., дБм <sup>2</sup>	1.7	1,0	1.3	5.6	6.0	2.6	3.1	1.6	2.7	4.7

Проведенные исследования позволяют считать изученные объекты хорошим средством калибровки РСА. Несмотря на то, что абсолютное значение ЭПР большинства пассивных отражателей зачастую оказывается неизвестным, это не мешает их применению в качестве хорошего средства для контроля стабильности радаров L-диапазона типа PALSAR, а также взаимной калибровки РСА PALSAR с другими сенсорами, например, ALOS-2.

### Литература

1. Радиолокационные методы исследования Земли. / Ю.А. Мельник, С.Г. Зубкович, В.Д. Степаненко и др. Под ред. Ю.А. Мельника. – М: Советское радио, 1980.

2. Wiesbeck W. and Riegger S. A complete error model for free space polarimetric measurements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation.—1991.—Vol.39, № 8.—P. 1105-1111.
3. Sarabandi K. Calibration of a polarimetric synthetic aperture radar using a known distributed target // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.—1994.—Vol.32, № 3.—P. 575-582.
4. Quegan S. A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data – theory and observation // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.—1994.—Vol.32, № 1.—P. 89-99.
5. Захаров А.И., Сорочинский М.В. Внешняя калибровка поляриметрического радиолокатора с синтезированной апертурой при ограниченном числе типов эталонных отражателей // Радиотехника и электроника.—2010.—Т. 55, №10.—С. 1178-1184.
6. Захаров А.И., Жердев П.А., Борисов М.М., Соколов А.Б. Радиометрическая и фазовая стабильности зеркальных антенн как калибровочных целей для космических РСА // Радиотехника. - 2003. - № 8. – С.60-62.