

## КАЛИБРОВКА СПУТНИКОВЫХ РСА С ПОМОЩЬЮ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ СТАБИЛЬНЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

**А.И.ЗАХАРОВ<sup>1</sup>, М.В.СОРОЧИНСКИЙ<sup>1</sup>, П.А.ЖЕРДЕВ<sup>2</sup>, А.Б.СОКОЛОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

E-mail: [aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru](mailto:aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru)

<sup>2</sup>ОКБ МЭИ

*Описана методика радиометрической калибровки космического радара с помощью радиоярких стабильных объектов на земной поверхности, называемых постоянными отражателями. Обсуждается природа естественных постоянных отражателей и показано, что использование таких отражателей может быть хорошим дополнением к искусственным постоянным отражателям типа угловых отражателей или активных приемо-передатчиков. На примере серии калибровочных съемок японского РСА L-диапазона PALSAR по территории подмосковного калибровочного полигона за 2006-2008 годы продемонстрирована возможность выбора естественных постоянных отражателей и проведено сравнение долговременной стабильности отраженных этими отражателями сигналов космического радара PALSAR по сравнению с искусственными постоянными отражателями.*

Рассчитывать на наиболее полное извлечение радиолокационного материала в целях исследования геофизических параметров подстилающих покровов, получать прогнозируемые результаты при проведении измерений в одних и тех же условиях, выявлять временные вариации геофизических параметров за время между измерениями, а также сравнивать и обрабатывать совместно данные различных систем дистанционного зондирования можно при условии обеспечения надежного соответствия между интенсивностью деталей на изображении и эффективной площадью рассеяния соответствующих элементов поверхности, что обеспечивается калибровкой радиолокационных данных. В общем случае термин “калибровка” предполагает сравнение результата измерения с некоторой эталонной величиной с тем, чтобы обеспечить независимость данных от характеристик измерительного средства и метода измерений. В радиолокации под калибровкой понимают процедуру, обеспечивающую методически правильное и точное определение характеристик радиолокационного датчика и, следовательно, измеряемых характеристик объекта наблюдения.

Внешняя калибровка считается наиболее эффективным методом, так как учитывает влияние всех возможных факторов, влияющих на передаточный коэффициент системы. Основу метода внешней калибровки составляет использование пассивных или активных эталонных средств или объектов, располагающихся в пределах снимка или в непосредственной близости от объекта, характеристики которого подлежат измерению.

При обеспечении требуемой стабильности работы бортовой аппаратуры внешняя калибровка, проводимая непосредственно во время измерений, позволяет достичь требуемых точностей измерений. Этот способ калибровки с помощью активных или пассивных эталонных средств рассматривается в качестве универсального при получении наиболее полной информации о характеристиках, как самого датчика, так и снимаемой сцены. В этом случае предполагается размещение эталонов внутри или в непосредственной близости от сцены измерений. Типовыми контролируемыми параметрами являются: определение сквозного коэффициента передачи для измерения эффективной площади обратного рассеяния (ЭПР) объектов поверхности, контроль стабильности коэффициента передачи, оценка разрешающей способности измерений РСА по поверхности, оценка максимального уровня боковых лепестков двумерной автокорреляционной функции и интегрального уровня боковых лепестков. В качестве эталонов применяют точечные пассивные отражатели, поверхностные распределенные цели с известной УЭПР, а также активные устройства, принимающие и/или излучающие калибровочный сигнал со строго определенными параметрами. Целью данной работы является анализ возможностей пассивных средств калибровки применительно к радиометрической калибровке космического РСА PALSAR L-диапазона (длина волны 23 см), запущенного в январе 2006 года на борту спутника ALOS. Нами исследованы искусственные и

естественные постоянные отражатели, как возможные объекты для контроля стабильности коэффициента передачи.

В качестве искусственных постоянных отражателей были использованы параболические антенные рефлекторы с диаметром зеркала 4.7 метра, расположенные на полигоне ОКБ МЭИ «Медвежьи Озера». Калибровочный полигон «Медвежьи Озера» расположен на северо-востоке Московской области, недалеко от МКАД. Основу калибровочного сценария составили 3 параболические антенны, конструкция которых была доработана путем установки проводящих дисков и дифракционных решеток в фокальной области, что позволило расширить диаграмму антенн до  $5^0$  и снизить требования к точности наведения антенн. Антенны расположены в углах прямоугольного треугольника с длиной катета 50 м.

Важной априорной информацией о радиометрических свойствах калибровочных антенн полигона были данные об уровне ЭПР и стабильности отражения, полученные из серии многолетних измерений с помощью радара ERS-2 в 1999-2003 годах (см. рис. 1). Видно, что стабильность уровня отражения антенны N1 очень высока. Если отбросить измерения зимы 2003-2004 года, искаженные наличием корки льда на зеркале антенны, то средняя ЭПР составляет  $59 \text{ дБм}^2$  со среднеквадратичным отклонением меньше 0.1 дБ. Чтобы получить временное перекрытие измерений ERS-2 и PALSAR, были проведены квазисинхронные съемки ERS-2 в дополнение к PALSAR в 2006 году.

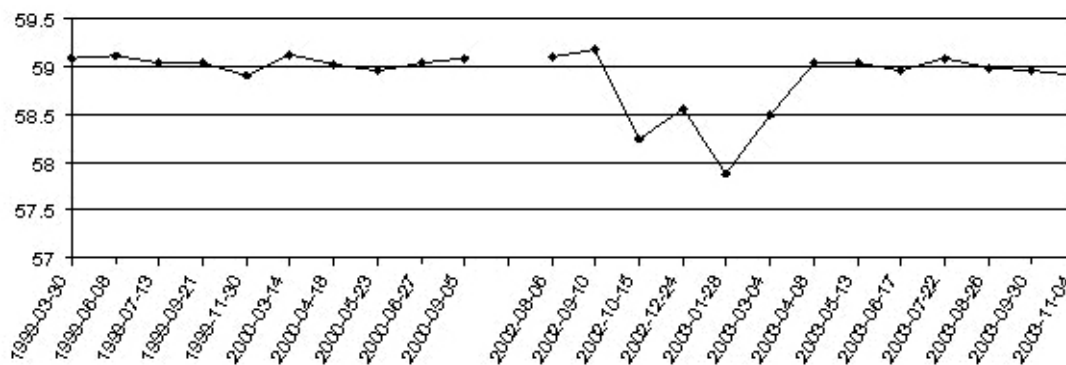


Рис. 1. ЭПР, дБм<sup>2</sup>, антенны №1 по данным радара ERS в 1999-2003 гг.

Измерения ERS для периода 2004-2006 гг. подтверждают повторяемость измерений ЭПР на уровне  $59 \text{ дБм}^2$  со среднеквадратичным отклонением около 0.1 дБ.

Работа с радаром PALSAR началась с мая 2006 года, до настоящего времени проведено более 70 калибровочных съемок. Съемки проводились в различных режимах работы PCA, при различных углах обзора, разрешении по дальности и поляризации сигнала, что неизбежно влияло на стабильность получаемых измерений ЭПР. Кроме того, в ходе работы было обнаружено, что информация о наведении, предоставляемая японской стороной, не всегда достаточно точна, а потому ряд измерений ЭПР оказался недостоверным и не использовался для анализа статистики измерений. На рис. 2 приведены данные об ЭПР антенн №1, №2 и №3 на согласованной горизонтальной поляризации на начальный период работы. Видно, что ЭПР находится в пределах  $41.5-43.5 \text{ дБм}^2$  для антенны №1. Среднеквадратичное отклонение измерений 0.7 дБ. Измерения для антенны №3 менее стабильны из-за более узкой диаграммы направленности и большей чувствительности к ошибкам наведения. ЭПР антенны №3 на 6 дБ ниже из-за влияния  $45^0$  угла ориентации дифракционной решетки, расположенной в фокусе.

Чтобы уменьшить количество влияющих факторов, были выбраны 15 сеансов, проведенных в идентичных условиях – при одной и той же геометрии съемки и режиме работы радара. Съемки с так называемых «повторяющихся орбит», следующих с интервалом 46 дней для японского спутника, обеспечили вариации угла места спутника от съемки к съемке полигона в пределах  $0.5^0$ . Измерения ЭПР для съемок в одном и том же режиме FBS34.3 (Fine Beam Single polarization, или съемка на согласованной горизонтальной поляризации с высоким разрешением и углом обзора  $34.3^0$ ) приведены на рис. 3.

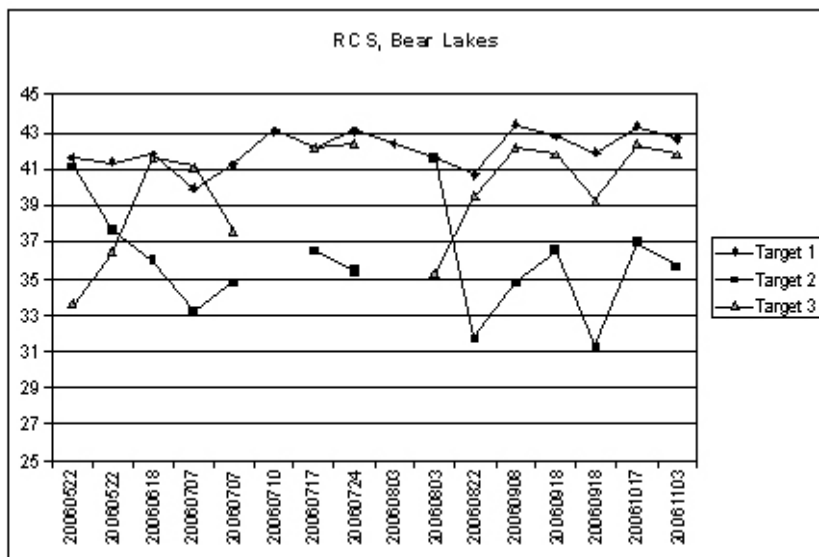


Рис. 2. ЭПР, дБм<sup>2</sup>, целей №1, №2 и №3 на ГГ поляризации (различные режимы.)

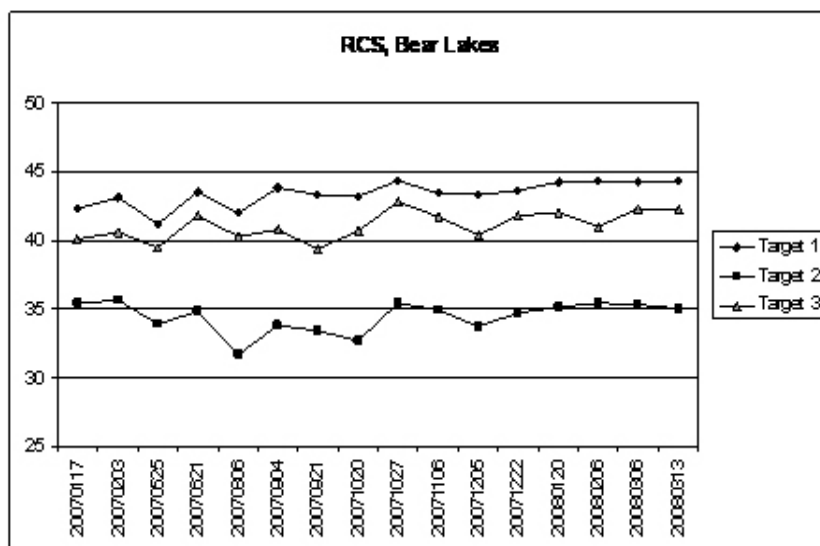


Рис. 3. ЭПР, дБм<sup>2</sup>, целей №1, №2 и №3 на ГГ поляризации (единый режим).

Здесь для антенны №1 ЭПР находится в пределах 41.5-43.5 дБм<sup>2</sup>, среднеквадратичное отклонение измерений 0.4. дБ.

Повторяющиеся условия наблюдений привели к тому, что на серии повторяющихся изображений выявились стабильные яркие точечные объекты. Примером нескольких таких ярких точечных объектов могут быть точки, обведенные красными кружками на рис. 4 ниже. Три яркие точки в нижнем кружке являются искусственными отражателями – антенными рефлекторами полигона «Медвежье Озеро».

Возможные механизмы формирования отражения других ярких отражателей, это однократное отражение (крыши домов), двойное переотражение (стена дома + поверхность земли), угловое отражение трехгранным угловым отражателем (стены внутреннего угла дома + поверхность земли), дипольное рассеяние (линейные элементы конструкции мачт ЛЭП).

Приняв максимальный размер отражателя по наземной дальности 10 м (что сравнимо с разрешением радара PALSAR), оценим ширину диаграммы обратного рассеяния такой цели. На длине волны 23 см она составит 1.5°, что в 3 раза больше угла, в пределах которого меняется положение радара в съемках с повторяющихся орбит. Отсюда следует, что сравнительно

небольшие изменения в геометрии съемки с повторяющихся орбит не должны приводить к заметным вариациям ЭПР естественных отражателей.

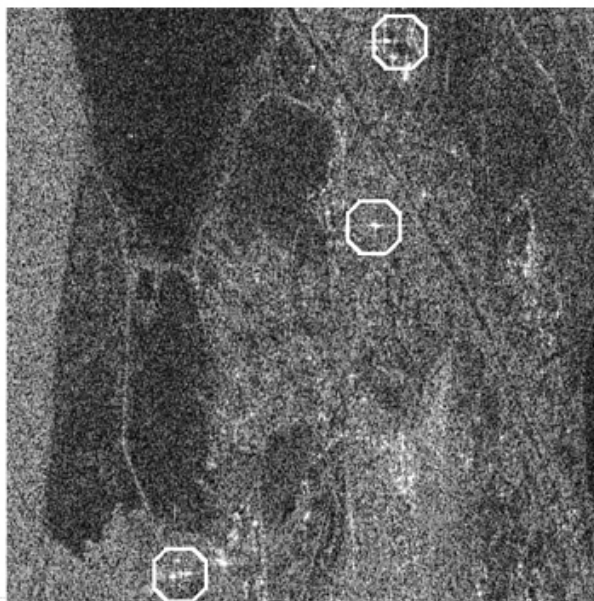


Рис. 4. Яркие точечные цели, выбранные для анализа стабильности коэффициента передачи РСА системы.

Для 11 пассивных отражателей, отобранных с учетом высокого уровня отражения сигнала (сравнимого с уровнем отраженного сигнала калибровочных антенн ОКБ МЭИ) и их присутствия на всех анализируемых изображениях на интервале в 2 года, были проведены измерения ЭПР, а также проанализирована стабильность отражения. Оказалось, что разные яркие точечные объекты нестабильны в разной степени и в разные сезоны года. Исключив влияние меняющейся геометрии съемки, можем предположить, что изменение условий отражения является главной причиной вариаций ЭПР большинства этих ярких точечных целей. Это предположение находит подтверждение на рис. 5, где приведены графики измерений ЭПР в весенне-осенние периоды года, в сухую погоду в дни съемки. Наиболее вероятной причиной изменения ЭПР конструкций типа уголкового отражателя может быть изменение коэффициента отражения нижней грани, образованной почвой.

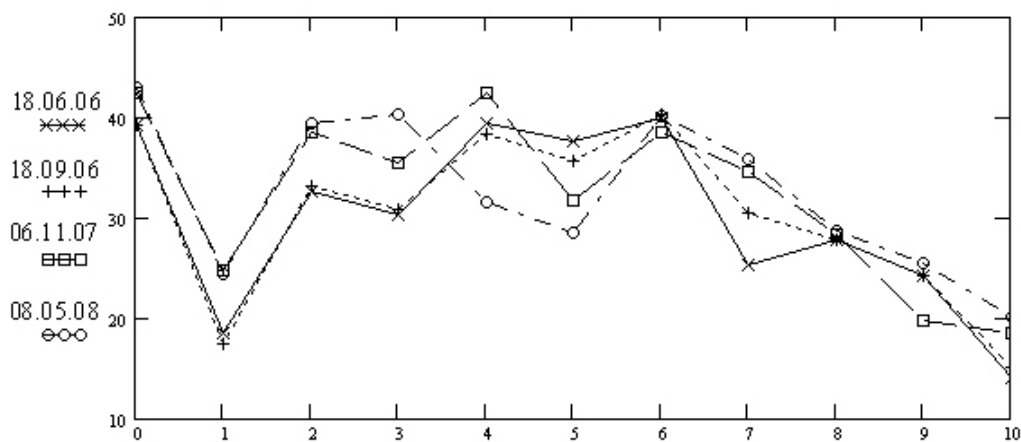


Рис. 5. ЭПР, дБм<sup>2</sup>, 11 точечных целей в двухлетнем интервале наблюдений, по данным съемок, проведенных в весенне-осенние периоды года.

Завершающий график на рис. 6 дает сведения об ЭПР наиболее стабильных точечных целей, найденных в пределах снимка. Две естественные цели (на территории промзоны во Фрязино и коттеджного поселка в Медвежьих Озерах) демонстрируют лучшую стабильность, чем калибровочная антенна полигона. Небольшой провал ЭПР этих целей 6 марта 2008 года может быть объяснен искажающим влиянием мокрого снега на синфазность отражения сигнала поверхностью земли. Эти же два естественных отражателя позволили контролировать стабильность работы радара 23.09.08 и 08.11.08, когда антенна полигона не выставлялась (см. провал в измерениях ЭПР для антенны).

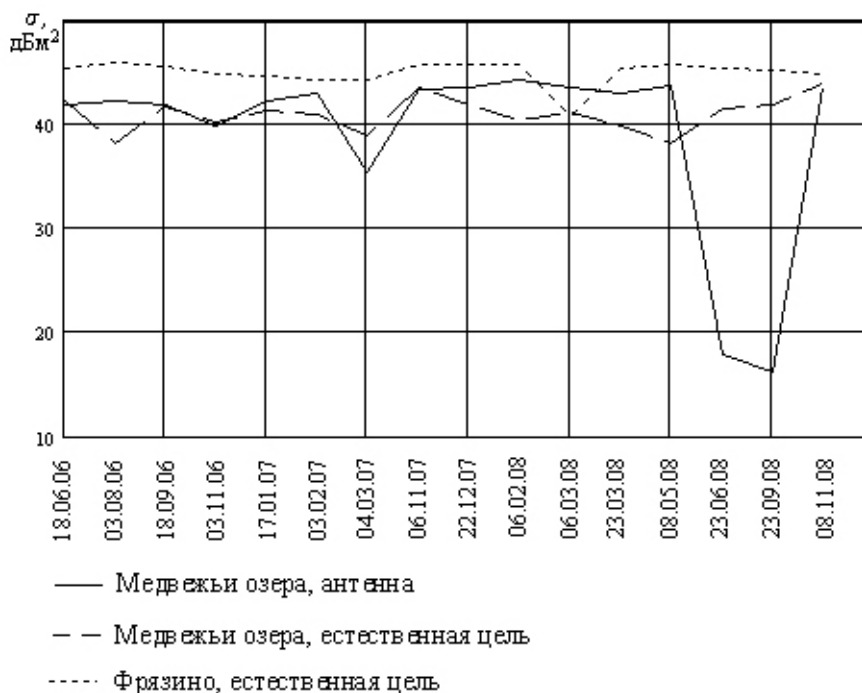


Рис. 6. Измерения ЭПР наиболее стабильных естественных целей в районе полигона ОКБ МЭИ «Медвежьи Озера».

В результате можно сделать следующее предварительное заключение:

- Пассивные отражатели могут быть хорошим средством контроля стабильности радаров L-диапазона типа PALSAR. Антенные отражатели ОКБ МЭИ имеют высокую ЭПР 44 дБм² и радиометрическую стабильность 0.4 дБ для антенны N1.
- Существует множество ярких точек на поверхности, которые могут рассматриваться как кандидаты в калибровочные цели, однако большинство из них показывает сезонную нестабильность ЭПР. Обнаружено несколько естественных целей на урбанизированных территориях, имеющих уровень ЭПР и стабильность уровня отражения, сравнимый с антеннами ОКБ МЭИ.
- Вероятный механизм отражения естественных пассивных отражателей – уголковое отражение.
- Требуется наращивание статистики и дальнейшее уточнение механизмов отражения стабильных естественных отражателей.

Авторы признательны японскому аэрокосмическому агентству JAXA за предоставленные данные радара PALSAR.