

# Эффективная площадь рассеяния наземных сооружений, используемых в качестве радиолокационных реперов

Л.М. Атрошенко, Н.Н.Горобец, А.Н.Горобец, Л.П.Сафронова

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина*

*61077 Украина, г. Харьков, пл. Свободы,4,*

*E-mail: [Nikolay.N. Gorobets@univer.kharkov.ua](mailto:Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua)*

На основе метода электродинамического подобия в бэховой камере измерены эффективные площади рассеяния моделей металлических наземных объектов хозяйственного назначения, использующихся в качестве реперов в период эксплуатации РСА космического базирования. Исследована зависимость ЭПР от угла скольжения, вида поляризации зондирующего сигнала и азимута локации. Показано, что объекты, модели которых исследованы, могут использоваться для полетной калибровки аппаратуры РСА.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, радиолокация, полетная калибровка, репер.

## Введение

С бурным развитием рынка услуг дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и одновременным непрекращающимся расширением круга тематических задач, решаемых с применением средств ДЗЗ, резко возрастают требования к точностным параметрам получаемых от сенсоров космического базирования результатов, равно как и к уровню достоверности конечного продукта ДЗЗ, полученного, в частности, путем зондирования земных покровов в радиодиапазоне с использованием радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). В таблице 1 приведены некоторые характеристики действующих на орбите и перспективных РСА.

Таблица 1. Характеристики некоторых радиолокаторов космического базирования

<i>Название</i>	<i><math>\lambda</math>, см</i>	<i>Элемент разрешения, м</i>	<i>Угол съемки от надира, град</i>
SkyMed 1-4	3,1	$\leq 1 \div 100$	20 - 50
RadarSat -2	5,6	$8 \div 100$	$10 \div 60$
TerraSAR	3,1	$1 \div 16$	$20 \div 55$
ENVISAT	5,6	$30 \div 1000$	$15 \div 45$
PalSAR	23,5	$7 \div 100$	$10 \div 51$
Кондор - Э	9,6	$1 \div 20$	$30 \div 50$

Созданный в 1984 году Комитет по спутниковым наблюдениям Земли (CEOS), координирующий наблюдения Земли из космоса в гражданских целях, особое внимание уделяет координированию работ по калибровке и валидации РСА [1].

В рамках повышения качества продукции ДЗЗ всесторонне и подробно рассматривается вопрос о количестве реперов, необходимом для точной географической привязки [2], тщательно прорабатываются вопросы верификации и валидации.

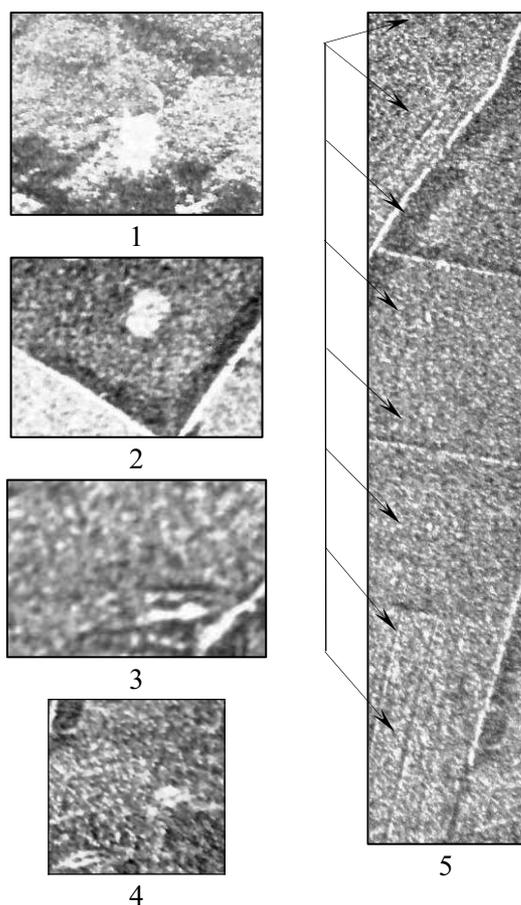


Рис. 1. Радиолокационные изображения наземных объектов, полученные с разрешением 1м под углом зондирования  $30^\circ$  от горизонтали.

1. - Зеркальная антенна  $\varnothing 100\text{м}$ , ориентированная в зенит;
2. - Металлическая водонапорная башня;
3. - Цистерна, расположенная перпендикулярно направлению зондирования;
4. - Цистерна, расположенная под углом к направлению зондирования;
5. - Опоры ЛЭП;

густонаселенных территориях таких объектов в рамках сцены РСА насчитывается значительное количество (до 20 - 25 единиц), что удовлетворяет самым высоким требованиям к количеству реперов даже в местностях с очень сложным рельефом.

На рис. 1 представлены фрагменты радиолокационных снимков РСА (S - диапазон, поддиапазон S; элемент разрешения  $\sim 1$  м, угол скольжения  $\sim 30^\circ$ ), содержащие радиолокационные сигналы от зеркальной антенны  $\varnothing 100\text{м}$ , водонапорной башни, цистерн ирригационной системы, опор линии электропередач. Как видно, все они хорошо идентифицируются на РЛ изображении.

В данной работе изучается возможность использования таких объектов в качестве калибровочных средств в процессе эксплуатации радиолокаторов высокого разрешения космического базирования, в частности, уровень вариабельности характеристик таких наземных объектов как радиолокационных целей в зависимости от погодных условий и типа поляризации сенсора. Поскольку организация большого количества летных экспериментов крайне нерентабельна, исследования проводились методом электродинамического моделирования.

Поскольку калибровка космических сенсоров является важнейшей задачей после запуска носителя, разрабатываются методы их калибровки в период эксплуатации КА. Большое внимание уделяется инструментальной полетной калибровке. Однако, организация большого количества калибровочных средств и реперов, необходимого для повышения качества конечного продукта ДЗЗ, связана с большими материальными затратами и организационными трудностями (отводы земель и т.п.). В связи с этим намечается тенденция (см. напр., [3 - 5]) использования в качестве реперов и эксплуатационных калибровочных средств отражателей параболических антенн наземного базирования различного назначения с диаметром зеркал  $25 \div 100$  м. и других типов антенн [5].

Нами в качестве реперов для РСА космического базирования кроме антенн использовались повсеместно распространенные объекты хозяйственного назначения, надежно идентифицируемые на космических снимках, как то: металлические водонапорные башни, металлические цистерны для хранения химических удобрений и воды, опоры линий электропередач, трубы ТЭЦ и ГРЭС и т.п. Абсолютная географическая привязка таких реперов осуществляется на местности с использованием GPS «Garmin» с точностью определения местоположения до 10 см. При решении задач, связанных с изучением динамики наземных процессов, даже без географической привязки они эффективно выполняют роль опорных точек для совмещения одновременных снимков [6]. Как правило, на

## Эффективные площади рассеяния моделей наземных металлических объектов хозяйственного назначения

Эксперименты проведены на моделях наземных объектов хозяйственного назначения, одиночно стоящих (удаленность от других объектов и древесной растительности - не менее  $5l$ , где  $l$  - максимальный линейный размер изучаемого объекта) на территории Скрипаевского подспутникового полигона кафедры прикладной электродинамики радиофизического факультета Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина и прилегающих к нему территориях. Исследовались эффективные поверхности рассеяния моделей двух видов широко распространенных металлических наземных объектов, хорошо идентифицирующихся на космических снимках РСА и использующихся для географической привязки результатов ДЗЗ [5,6]: водонапорной башни и цистерны. Типичный внешний вид одного из них - металлической водонапорной башни показан на рис. 2. Высота ее составляет 14м, диаметры и высоты нижнего и верхнего цилиндров равны соответственно 2 и 10м, 3,5 и 4м. Линейные размеры цистерны составляют 2м и 6м, форма ее близка к форме цилиндра.



Рис. 2. Типичный вид наземного объекта «водонапорная башня»

Эксперименты проведены в безэховой камере с коэффициентом безэховости  $-40\text{дБ}$  методом электродинамического подобия [7]. В эксперименте использовались серийные генераторы стандартных сигналов и пирамидальные рупорные антенны с одинаковой шириной главного лепестка диаграммы направленности в Е- и Н-плоскостях наблюдения. Углы раствора рупоров близки к  $40^\circ$ .

Как известно [7], использование метода электродинамического подобия диктует выполнение следующих требований: пропорциональное уменьшению размеров объекта уменьшение длины волны и линейных размеров шероховатости самого объекта и подстилающей поверхности, неизменность диэлектрических характеристик и магнитной проницаемости объекта и подстилающей поверхности как на натурной частоте, так и на частоте модели. После измерения геометрических параметров объекта в натуре изготавливается его уменьшенная модель. В безэховой камере измеряется ЭПР модели под разными углами визирования и при разных типах поляризации.

Для измерения геометрических размеров исследуемых объектов в натуре применялись лазерный дальномер BOSCH DLE 70 (точность 1,5мм) и теодолит УОМЗ ЗТ2КА (точность 2"). Модели водонапорной башни и цистерны изготавливались с сохранением их точной геометрической формы в масштабе 1:10 (1,4 м x 0,2 ÷ 0,35 м и 0,6м x 0,2м соответственно). В целях достижения масштабирования шероховатости при сохранении проводимости металла модели обклеивались металлической фольгой.

Для проведения модельного эксперимента была выбрана длина волны 9 мм как модельный аналог длины волны радиолокатора, равной 9 см. В качестве подстилающих поверхностей были выбраны почвы, распространенные на территории полигона: суглинок и лесная оподзоленная почва с линейными размерами шероховатости, не превышающими соответственно 0,5 и 1,0 мм. Диэлектрические характеристики почв на длине волны 9 см в условиях различной влажности были измерены *in situ* радиометрическим методом [8] и приведены в таблице 2. В качестве модельного аналога почв для эксперимента были взяты электротехнические стекла с комплексными диэлектрическими проницаемостями, близкими к измеренным характеристикам почв [9] и параметрами шероховатости, не превышающими 0,05 мм. Магнитная проницаемость почв и стекол равна 1.

Таблица 2. Комплексная диэлектрическая проницаемость используемых видов подстилающих поверхностей

Вид поверхности		Влажность 1 %	Влажность 20 %
Почвы	Суглинок	3,72 - <i>i</i> 0,35	17,08 - <i>i</i> 0,88
	Лесной подзол	3,94 - <i>i</i> 0,27	14,76 - <i>i</i> 0,73
Электро-технические стекла [9]		C5-1	C77 -1
		3,80- <i>i</i> 0,03	13,00- <i>i</i> 0,13

Измерены модули коэффициентов рассеяния почв и их модельных аналогов в зависимости от угла зондирования и типа поляризации. Измерение коэффициентов рассеяния почв проводилось на длине волны 9 см, электротехнические стекла исследовались на длине волны 9 мм под углами зондирования (от горизонтали)  $30^0$  и  $75^0$  при вертикальной и горизонтальной поляризации. Результаты экспериментов приведены в таблице 3.

Таблица 3. Модуль коэффициента отражения почв и электротехнических стекол

Вид поверхности		Влажность 1%				Влажность 20%			
		Вертик.		Гориз.		Вертик.		Гориз.	
		$30^0$	$75^0$	$30^0$	$75^0$	$30^0$	$75^0$	$30^0$	$75^0$
Почвы	Суглинок	0,01	0,25	0,52	0,28	0,32	0,62	0,79	0,62
	Лес.подзол	0,01	0,25	0,52	0,30	0,25	0,57	0,75	0,57
Электротехнические стекла		C5-1				C77-1			
		0,00	0,28	0,53	0,30	0,29	0,60	0,76	0,58

Как видно, значения модулей коэффициентов отражения электротехнического стекла C5-1 под обоими углами зондирования и на обеих поляризациях близки к значениям таковых для сухих почв, а стекло марки C77 - 1 в этом отношении может служить аналогом исследуемых почв с влажностью 20%. На вертикальной поляризации при угле зондирования  $30^0$  коэффициент отражения сухих почв и аналога близок к нулю. У влажных почв и аналога при том же угле зондирования на горизонтальной поляризации его модуль составляет порядка 0,8. При угле же зондирования  $75^0$  модули коэффициентов отражения на вертикальной и горизонтальной поляризации близки при схожих диэлектрических параметрах. Таким образом, выбор именно этих углов зондирования для экспериментального исследования не только перекроет практически весь диапазон используемых на практике углов (см.табл.1), но и даст возможность наиболее полно рассмотреть влияние на результат эксперимента типа поляризации зондирующего сигнала. Приведенные в таблице 3 результаты измерений в пределах ошибки эксперимента совпадают с полученными расчетными данными для модуля коэффициентов отражения полупространства с соответствующими электродинамическими характеристиками и данными литературы [15].

Исследовались эффективные площади рассеяния моделей наземных объектов. Калибровка аппаратуры производилась с использованием набора уголковых отражателей. Погрешность измерения эффективной площади рассеяния на  $\lambda = 9$ мм составляла  $0,1 \text{ м}^2$ , что в натуре соответствует  $10 \text{ м}^2$ .

Эффективная площадь рассеяния модели цистерны в свободном пространстве составляла  $0,4 \text{ м}^2$ , что соответствует эффективной поверхности рассеяния самого объекта, равной  $40 \text{ м}^2$ . ЭПР модели башни и самой башни составляли соответственно 1,2 и  $120 \text{ м}^2$ .

Модели располагались на разных подстилающих поверхностях. Если рассматривать схему эксперимента как изучение ЭПР идеально проводящих объектов, находящихся на границе диэлектрического полупространства, из физических соображений [10 - 11] следует ожидать, что их эффективная площадь рассеяния увеличится в  $k$  раз, где  $k$  - коэффициент, сопоставимый по величине с квадратом диэлектрической проницаемости полупространства.

На диэлектрическую площадку из электротехнических стекол радиусом 2,8м по аналогии с *Top-hat reflector* [12] помещалась проводящая модель изучаемого металлического объекта. Для обоих видов моделей исследовалась зависимость от азимута зондирования.

Несмотря на наличие мелких металлических деталей (модель лестницы, молниеотвода) для модели водонапорной башни ни под одним из углов зондирования результаты не зависели от азимута зондирования.

Для модели цистерны под углами зондирования, близкими к  $30^0$  и  $75^0$  от горизонтали наблюдались различия в ЭПР на 1 -2 порядка в зависимости от азимута зондирования, который отсчитывался от оси цилиндра.

В эксперименте моделировались, кроме различной влажности почв, различные погодные условия, а именно наличие осадков. При имитации дождя (точнее, состояния непосредственно после дождя) и росы исследуемые модели устанавливались на подстилающую поверхность, имитирующую влажную почву (электротехническое стекло С77 - 1), и вместе с ней смачивались тонким слоем воды. При имитировании рыхлого снега (по данным [13] диэлектрические характеристики такого покрытия близки к приведенным для С5 - 1) и слоя пыли модели располагались на «пьедестале» из стекла С5 - 1 и покрывались тонким слоем его же. При этом изменения в величинах ЭПР исследуемых объектов имеют место лишь для горизонтальных цилиндров.

Данные результатов зондирования под углом  $30^0$  приведены в табл. 4, результаты зондирования под углом  $75^0$  сведены в таблицу 5.

Таблица 4. ЭПР ( $m^2$ ) исследуемых объектов при угле зондирования  $30^0$  от горизонтали

Почва	Цистерна				Башня	
	Гориз. поляризация		Вертик. поляризация		гориз.	вертик.
	бок	торец	бок	торец		
сухая	990	10	20	10	2000	3700
влажная	2500	10	630	10	2000	3700

При исследовании зависимости от азимута зондирования данные усреднялись по 20-тиградусным диапазонам реализаций (бок: 80 - 100 град, торец: 0 - 20 град).

Усреднение всех данных эксперимента проводилось по двадцати разнесенным во времени измерениям. Все наблюдаемые от позиции к позиции изменения ЭПР статистически достоверны. Видно, что ЭПР объекта «водонапорная башня» не зависит от влажности почвы, и наличия/отсутствия слабо проводящих покрытий, имитирующих осадки, однако изменяется в зависимости от типа поляризации зондирующего сигнала и угла зондирования.

Таблица 5. ЭПР ( $m^2$ ) исследуемых объектов при угле зондирования  $75^0$  от горизонтали

Тип подстил. пов-сти, погодные условия	Цистерна				Башня	
	поляризация				Поляризация	
	Гориз.		Верт.			
	бок	торец	бок	торец	Гор	Верт
сухая почва	1800	10	60	10	3840	3990
влажн. почва	3050	250	870	90	3840	3990
дождь	3030	220	850	80	3840	3990
снег	2220	40	610	20	3840	3990

Результаты проведенных экспериментов качественно совпадают с данными расчетов для цилиндра конечной длины [14], данными для объектов другого назначения, близких по форме к исследуемым [15] и по порядку величин соответствуют представлениям, развитым в [10 - 11].

Эффективная площадь рассеяния участка с линейными размерами элемента разрешения, на которой расположены описываемые объекты, будет определяться соотношением площадей

объекта и элемента разрешения и ЭПР объекта и окружающей его подстилающей поверхности. Так, например, усредненная по элементу разрешения 20м x 20м ЭПР водонапорной башни при  $\lambda = 9\text{см}$  даст отраженный сигнал в  $\sim 10$  раз большей интенсивности, чем сигнал от этого же участка при условии, что он не содержит ничего, кроме почвы.

Отсутствие в пределах погрешности эксперимента зависимости ЭПР водонапорной башни от влажности почвы, на которой она расположена, и наличия слоя слабо проводящих покрытий (влаги, снег, пыль) дает основания рассматривать такой объект не только как надежный репер, но и как возможное средство калибровки радиолокаторов высокого разрешения в период эксплуатации их на орбите.

Вследствие изменений соотношения  $\delta/\lambda$ , где  $\delta$  - характерные линейные размеры неровностей поверхности объекта, ЭПР в значительной степени зависит от длины волны. Иными словами, значения ЭПР исследуемых наземных объектов близки лишь в таком диапазоне длин волн, где соотношение  $\delta/\lambda$  для объекта и подстилающей поверхности, равно как и диэлектрические характеристики подстилающей поверхности существенно не отличаются друг от друга. Полученные в работе результаты вследствие удовлетворительно малой вариабельности указанных величин в пределах погрешности эксперимента могут быть распространены на весь поддиапазон А диапазона S. Для других частот зондирующего сигнала необходимо проводить дополнительные модельные эксперименты.

### Заключение

Для повышения точности и обеспечения сопоставимости данных радиолокации высокого разрешения с аэрокосмических носителей, полученных в различные временные промежутки и при разных погодных условиях, а также для технического обеспечения нормативной базы ДЗЗ предложено в качестве реперов и средств калибровки датчиков в процессе эксплуатации, при обработке результатов ДЗЗ использовать элементы хозяйственной деятельности человека, что дает возможность обеспечения заданной точности конечных результатов обработки данных для представления их потребителю. Подробно рассмотрены возможности использования в таком качестве двух видов хозяйственных объектов - вертикально стоящих металлических водонапорных башен и расположенных горизонтально квазицилиндрических емкостей - резервуаров воды ирригационных систем и контейнеров для хранения химических удобрений, географическая привязка которых осуществляется в наземных условиях GPS.

В модельном эксперименте исследованы ЭПР металлических башен и цистерн в зависимости от погодных условий. Типовые водонапорные башни в условиях эксплуатации космических средств ДЗЗ высокого разрешения радиодиапазона применимы не только как репера, но и как калибровочные средства. Цистерны же целесообразно использовать лишь в качестве реперов при отсутствии достаточного количества более подходящих объектов и только в случаях расположения их квазиперпендикулярно направлению зондирования.

Применение рассмотренных наземных объектов для привязки данных ДЗЗ и эксплуатационной калибровки аппаратуры удобно из-за сравнительной простоты экспериментального определения их ЭПР методами, достаточно хорошо апробированными на практике. Это позволяет значительно уменьшить объемы натурных полетных экспериментов.

Значительное количество рассмотренных элементов в рамках одной сцены, что часто имеет место на практике, позволяет добиться высокой точности конечного продукта ДЗЗ, необходимой для его практического использования.

### Литература

1. CEOS SAR Workshop/ European Space Agency and CNES, FRANCE. 26-29 October 1999, Toulouse, France. Proceedings. 730 p.
2. *Kosaman S., Gruen A.* Orientation and calibration of ALOS/PRISM imagery // ISPRS Workshop "High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information", 29 May - 1 June, 2007. Hannover, Germany, (proceedings on CD - ROM).

3. *Захаров А.И., Жердев П.А., Соколов А.Б., Дарижанов Д.Д.* Результаты первого года калибровки японского РСА PALSAR // Пятая Юбилейная Открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2007 г. Тезисы докладов - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://d902.iki.rssi.ru/theses-cgi/thesis.pl?id=991>
4. *Смирнов А.С., Сидоренко А.В.* Використання контрольно - калібрувального полігона для покращення якості розв'язання тематичних задач ДЗЗ. Матеріали доповідей Першої Всеукраїнської конференції «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки GEO-UA 2008». Київ, 3-5 червня 2008 р., Київ, «Наукова думка», 2008. с. 96- 97.
5. *Атрошенко Л.М., Горобец Н.Н., Костяшкин С.И., Сафронова Л.П.* Подспутниковые полигоны Украины // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. Сборник научных статей. Институт космических исследований РАН. Москва 2008. Вып. 6, т. II. с. 265-271.
6. *Atroshenko L.M., Gorobets N.N., Safronova L.P.* Application of synthetic-aperture radar (SAR) data in tackling the problems of land inventory, diagnosis of crops condition, gullyng processes and hydrology. Telecommunications and Radio Engineering – 2006. Vol. 65. № 18. pp. 1729-1737.
7. *Стрэттон Дж.А.* Теория электромагнетизма. М. - Л., Гостехиздат. 1948. – 456 с.
8. *Atroshenko L.M., Gaikovich K.P., Gorobets N.N.* Soil absorption profiling and complex dielectric permittivity based on microwave radiometry. //2006 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MM'ET 2006). Kharkov. Ukraine. June 26-29. 2006. pp. 366-367.
9. Физические величины. Справочник. // Под редакцией И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова. Москва. Энергоатомиздат. 1991. 1232 с.
10. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. Москва. Гос. изд. физико-математической литературы. 1959. 532 с.
11. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Теория поля. Москва. Наука. 1967. т.2. 460 с.
12. *Carrara W.G., Goodman R.S., Majeovsky R.M.* Spotlight synthetic aperture radar signal processing algorithms. Boston, London, Artech House, 1995. 554 p.
13. *Ulaby F.T.* Handbook of radar scattering statistics for terrain. University of Michigan. Artech House. 1976. 360 p.
14. *Ross R.A.* Scattering by finite cylinder. Proc. IEE (London), 1967. Vol. 114. № 7. pp. 864 - 868.
15. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами // Под редакцией О.И. Сухаревского. - Харьков. 2009. 468 с.

## **Radar cross-section of ground objects used as radar-reference points**

**L.M. Atroshenko, N.N. Gorobets, A.N. Gorobets, L.P. Safronova**

*V.N. Karazin Kharkov National University  
4, Svobodi sq., Kharkov, Ukraine, 61077  
E-mail: [Nikolay.N. Gorobets@univer.kharkov.ua](mailto:Nikolay.N. Gorobets@univer.kharkov.ua)*

On the basis of a method of electrodynamics similarity in compact antenna range the radar cross-section of models of metal ground objects used as reference points during operation SAR of space basing are measured. Dependence RCS on a kind of polarization of a probing signal, corners of sliding and an azimuth of a location is investigated. It is shown, that, objects which models are investigated, can be used for flight calibration of equipment SAR.

**Keywords:** remote sensing, a radar-location, flight calibration, radar cross-section, reference point.