

Исследование факторов, влияющих на точность измерения смещений методом радарной интерферометрии с использованием уголковых отражателей

И. И. Добрынин, А. И. Савин, Н. Н. Севастьянов

*АО «Газпром космические системы», Королёв, 141070, Россия
E-mail: info@gazprom-spacesystems.ru*

Работа посвящена исследованию точности измерения смещений методом радиолокационной интерферометрии с применением уголковых отражателей (УО) и использованию для этих целей космических радиолокационных снимков различных частотных диапазонов. В настоящее время на рынке космического дистанционного зондирования Земли представлен широкий выбор радиолокационных космических аппаратов (КА), осуществляющих съёмку в различных частотных диапазонах. Использование данных от нескольких КА может существенно увеличить оперативность, достоверность измерений и снизить риски, связанные с возможной неоднородностью съёмки с того или иного радиолокационного КА. Технология радарной дифференциальной интерферометрии с использованием УО позволяет избавиться от декорреляции радиосигнала в X- и C-диапазонах, связанной с растительностью, осадками и др. Однако в зависимости от частотного диапазона съёмки накладываются определённые требования к размерам и форме УО, требуемому пространственному разрешению снимков и т. д. В данной статье проведена оценка вклада различных параметров в точность измерения смещений, а также приводятся рекомендации по повышению точности измерения смещений методом радарной дифференциальной интерферометрии с применением УО.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, радиолокационная интерферометрия, дистанционное зондирование Земли, дифференциальная интерферометрия, мониторинг смещений земной поверхности, уголковый отражатель

Одобрена к печати: 21.05.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-29-36

Введение

Обеспечение технологической надёжности и экологической безопасности протяжённых объектов газовой промышленности, таких как магистральные газопроводы (МГ), на сегодняшний день является актуальной задачей. Для её решения создаются системы геотехнического мониторинга, позволяющие оперативно обнаружить опасные геодинамические процессы в коридоре прохождения трассы МГ. Одним из эффективных методов обнаружения и измерения подвижек земной поверхности является радарная интерферометрия.

Метод дифференциальной радарной интерферометрии позволяет обнаруживать миллиметровые смещения земной поверхности на больших территориях (Rosen et al., 2000). Однако точность измерения смещений существенно зависит от свойств подстилающей поверхности. Для локального повышения точности измерений применяется метод постоянных отражателей радиосигнала. Постоянные отражатели радиосигнала представляют собой яркие точечные радиолокационные цели, стабильно отражающие радиолокационный сигнал на протяжении серии измерений.

Роль постоянных отражателей могут выполнять как естественные природные объекты, сооружения и конструкции, так и искусственные отражатели радиосигнала, такие как уголковые отражатели (УО) (Добрынин и др., 2017; Захаров и др., 2010; Михайлов и др., 2013; Aguado et al., 2015).

В статье представлен теоретический анализ точности измерения смещений УО для снимков в X-, C-, S- и L-диапазонах для задачи радиолокационной интерферометрии с применением УО. Рассматриваются факторы, вносящие наиболее существенный вклад в погрешности измерения смещений данным методом.

Исходные данные

Начальные условия для приведённого в статье исследования следующие:

1. Частотные диапазоны радиолокационной съёмки:

- X — от 9,3 до 9,8 ГГц (длина волны λ — 3,1 см);
- C — от 5,35 до 5,47 ГГц (λ — 5,6 см);
- S — от 3,1 до 3,3 ГГц (λ — 9,4 см);
- L — от 1,215 до 1,300 ГГц (λ — 25 см).

2. Необходимое минимальное отношение сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR — отношение эффективной площади рассеяния (ЭПР) УО к ЭПР фона, попавшего в тот же элемент пространственного разрешения снимка, что и УО) должно составлять не менее 10 дБ для уверенной идентификации УО на радиолокационных изображениях.

3. Расчёты проводятся для УО с треугольными гранями, с длиной внутреннего ребра 1 м, с установленными на внешние грани радиопрозрачными пластинами для защиты от влияния снега, дождя и других атмосферных осадков.

Выбор треугольной формы граней УО связан с тем, что такие УО обладают наиболее широкой диаграммой обратного рассеяния (Sarabandi, Chiu, 1996) — это налагает менее жёсткие требования на ориентацию УО в пространстве для обеспечения необходимого отношения сигнал/шум на входе радиолокатора.

Длина ребра в 1 м выбрана как наиболее технологически оптимальная, позволяющая обеспечить максимальное отношение сигнал/шум при сохранении жёсткости и устойчивости конструкции.

Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) для УО с треугольной формой граней определяется как (Верба и др., 2010):

$$\sigma = \frac{4\pi}{3\lambda^2} a^4.$$

В табл. 1 приведены рассчитанные теоретически значения ЭПР для УО с длиной внутреннего ребра 1 м для приведённых частотных диапазонов.

Таблица 1. ЭПР УО с ребром 1 м в разных частотных диапазонах

	Частотный диапазон			
	X	C	S	L
ЭПР УО с ребром 1 м, $\sigma_{УО}$, дБ·м ²	36,39	31,26	26,76	18,26

4. При проведении расчётов учитывается вклад условий, при которых производятся измерения смещений УО (табл. 2).

Таблица 2. Вклад условий, при которых производятся измерения смещений УО

Параметр, дБ	Вклад в ЭПР
Удельная ЭПР фона местности, на которой установлен УО ($\sigma_{0\text{фона}}$) (Верба и др., 2010)	–10
Падение ЭПР УО при отклонении максимума диаграммы обратного рассеяния УО от направления на КА в момент съёмки на 20° по углу места (Sarabandi, Chiu, 1996)	не более 3
Падение ЭПР УО при отклонении максимума диаграммы обратного рассеяния УО от направления на КА в момент съёмки на 10° по азимуту (Sarabandi, Chiu, 1996)	не более 2
Запас на погрешности изготовления УО	3
Затухание сигнала при прохождении через радиопрозрачные панели	3

Расчёт ошибки измерения смещений УО

Измерение смещений УО основано на вычислении разности фаз радиолокационных сигналов, отражённых от УО. Составляющие разности фаз сигнала (Bamler, Hartl, 1998):

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_{topo} + \Delta\Phi_{atm} + \Delta\Phi_{noise} + \Delta\Phi_{disp},$$

где $\Delta\Phi_{topo}$ — разность фаз, обусловленная топографией местности; $\Delta\Phi_{atm}$ — разность фаз из-за различия длин оптических путей за счёт преломления в среде распространения сигнала; $\Delta\Phi_{noise}$ — разность фаз, возникающая в результате электромагнитного шума; $\Delta\Phi_{disp}$ — разность фаз из-за смещения УО за период между съёмками.

Разность фаз из-за смещения УО за период между съёмками Φ_{disp} является искомой величиной. Значение смещения УО в проекции наклонной дальности вычисляется по формуле (Ketelaar, 2009):

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\Phi_{disp}.$$

Разность фаз, обусловленная топографией местности, определяется по формуле (Ketelaar, 2009):

$$\Delta\Phi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp} \Delta h}{R \sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp} \Delta s}{R \tan \theta},$$

где B_{\perp} — длина перпендикулярной составляющей пространственной базы интерферометрической съёмки; Δh — точность используемой при обработке снимков опорной цифровой модели местности (ЦММ); θ — угол падения радиоволны; R — наклонная дальность от космического аппарата до снимаемого УО; Δs — точность совмещения радиолокационных снимков.

Вторым слагаемым в данной формуле можно пренебречь, так как при обработке радиолокационных снимков в современных программных пакетах можно совместить изображения с точностью порядка одной сотой элемента пространственного разрешения Δr , т. е.

$$\Delta s \leq \frac{\Delta r}{100}.$$

Разность фаз из-за различия длин оптических путей за счёт преломления в среде распространения сигнала $\Delta\Phi_{atm}$ является случайной величиной. При относительно стабильном состоянии атмосферы и ионосферы для УО, установленных на малом расстоянии (не более 200 м) друг от друга, можно считать, что среда распространения сигнала для всех УО даёт одинаковый вклад в изменение фазы. Таким образом, данную составляющую интерферометрической фазы можно исключить, установив заведомо стабильные УО в непосредственной близости от подвижных УО (Добрынин и др., 2017).

Однако такие погодные явления, как гроза или сильный ливень, могут существенно повлиять на значения $\Delta\Phi_{atm}$, измеренные в процессе обработки радиолокационных снимков, вплоть до потери информации о смещениях, особенно в коротковолновых диапазонах X и C (Добрынин и др., 2017).

Разность фаз, возникающая в результате электромагнитного шума $\Delta\Phi_{noise}$ в случае использования УО, зависит от отношения сигнал/шум (Захаров и др., 2018):

$$\delta_{\psi} = \frac{1}{\sqrt{2SNR}}.$$

Ошибка измерения фазы принятого радиосигнала, в свою очередь, связана с ошибкой измерения смещения УО:

$$\Delta\rho_{\psi} = \frac{\lambda}{4\pi} \delta_{\psi}.$$

В табл. 3 приведены оценённые теоретически значения ошибки измерения смещений УО при отношении сигнал/шум, равном 10 дБ, в различных частотных диапазонах.

Таблица 3. Ошибка измерения смещений УО

	Частотный диапазон			
	X	C	S	L
Ошибка измерения смещения УО, мм	0,6	1	1,7	4,4

Таким образом, основными слагаемыми интерферометрической фазы, определяющими погрешность измерения смещений УО, становятся:

- 1) $\Delta\Phi_{topo}$, зависящая от перпендикулярной составляющей пространственной базы и точности используемой при обработке снимков опорной ЦММ;
- 2) $\Delta\Phi_{noise}$, зависящая от пространственного разрешения радиолокационных снимков и размера УО.

Исходя из этого, рассмотрим требования к геометрии радиолокационной съёмки и пространственному разрешению радиолокационных снимков.

Геометрия радиолокационной съёмки

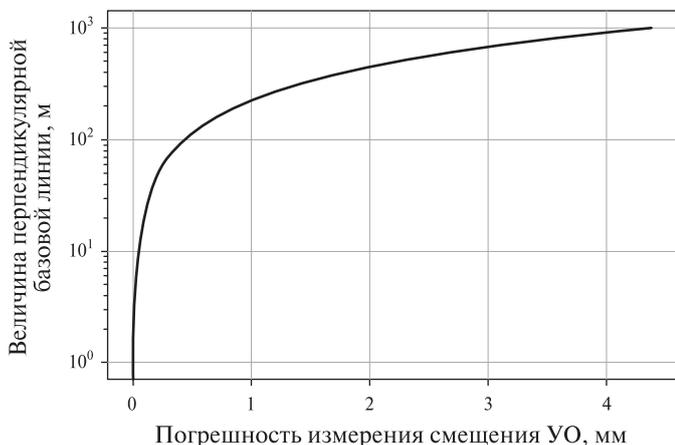
Вклад $\Delta\Phi_{topo}$ в погрешность измерения смещений УО определяется как (Ketelaar, 2009):

$$\Delta\rho_B = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\Phi_{topo} = \frac{B_{\perp} \Delta h}{R \sin\theta}.$$

Как видно из приведённой формулы, ошибка измерения смещений, обусловленная вкладом топографической составляющей местности, не зависит от длины волны радиолокатора.

Принятая в расчётах высота орбиты спутников ДЗЗ составляет 620 км, диапазон углов съёмки (углов между лучом радиолокатора и надиром) лежит в пределах от 20 до 60°. Наибольший вклад геометрии съёмки в погрешность измерений смещений УО будет при угле падения 20°. Наклонная дальность до снимаемого УО при $\theta = 20^\circ$ составит 664 км.

В расчётах необходимо учитывать точность ЦММ в точке установки УО. Следовательно, для учёта составляющей Δh достаточно определить положение УО в пространстве, что позволяют сделать современные GPS-приёмники с вполне высокой точностью (1 м и выше). Примем в расчётах значение $\Delta h = 1$ м.



На рисунке изображён график зависимости погрешности измерения смещений УО ($\Delta\rho_B$) от величины перпендикулярной базовой линии (B_{\perp}).

Для современных систем ДЗЗ перпендикулярная базовая линия лежит в пределах от 10 до 500 м, что позволяет обеспечить вклад в ошибку измерения смещений не более 2,2 мм.

График зависимости погрешности измерения УО от величины перпендикулярной базовой линии

Пространственное разрешение радиолокационных снимков

Значение геометрической площади элемента радарного изображения, обеспечивающей требуемое превышение полезного сигнала над фоновым, определим выражением: $\sigma_{\text{фона}} [\text{дБ} \cdot \text{м}^2] = \sigma_{\text{УО}} [\text{дБ} \cdot \text{м}^2] - \sigma_{\text{зап}} [\text{дБ}] - \sigma_{\text{фона}} [\text{дБ}] - \text{SNR} [\text{дБ}]$, где под $\sigma_{\text{зап}}$ подразумевается сумма значений по пунктам 2–5 *табл. 2*.

Площадь элемента пространственного разрешения радиолокационного снимка связана с $\sigma_{\text{фона}}$ следующим выражением:

$$S = 10^{\sigma_{\text{фона}}/10}.$$

Для того чтобы обеспечивалось значение SNR не менее 10 дБ и вклад $\Delta\Phi_{\text{noise}}$ в ошибку измерения смещений УО не более указанных в *табл. 3* значений, пространственное разрешение радиолокационных снимков должно быть не хуже значений, приведённых в *табл. 4*.

Таблица 4. Пространственное разрешение радиолокационных снимков

	Частотный диапазон			
	X	C	S	L
Площадь элемента пространственного разрешения, м ²	346	106	37,6	6,7
Пространственное разрешение (\sqrt{S}), м (при квадратном элементе разрешения)	18,5	10,3	6,1	2,6

Как следует из результатов расчётов, для достижения требуемого значения SNR для УО с указанными характеристиками в L-диапазоне пространственное разрешение радиолокационных снимков должно быть не хуже $2,6 \times 2,6$ м. Однако разрешённая в РФ для космической радиолокации полоса частот в L-диапазоне позволяет получать снимки с наилучшим пространственным разрешением от 4,3 до 11 м в зависимости положения луча радиолокатора в пределах полосы обзора. На снимках с таким пространственным разрешением параметр SNR будет составлять соответственно от –3,5 до 4,6 дБ, что не позволит обнаруживать и уверенно идентифицировать УО принятого в статье размера на радиолокационных снимках.

Экспериментальное исследование, проведённое компанией «Газпром космические системы» в 2016–2017 гг. с применением УО с описанными в статье характеристиками, показало невозможность определения положения УО по радиолокационным снимкам в L-диапазоне с КА ALOS-2.

Результаты теоретического расчёта ошибки измерения смещений УО

Результаты теоретического расчёта суммарных значений ошибки измерения смещений УО ($\Delta\rho = \Delta\rho_{\psi} + \Delta\rho_B$) представлены в *табл. 5*.

Таблица 5. Суммарные значения ошибки измерения смещений УО

	Частотный диапазон			
	X	C	S	L
Пространственное разрешение съёмки, м, не хуже	18,50	10,30	6,10	2,60
$\Delta\rho$, мм при $B_{\perp} = 100$ м	5,06	5,46	6,16	8,86
$\Delta\rho$, мм при $B_{\perp} = 500$ м	2,83	3,23	3,93	6,63
$\Delta\rho$, мм при $B_{\perp} = 200$ м	1,49	1,89	2,59	5,29

Заключение

Точность измерения смещений методом радиолокационной интерферометрии с применением УО существенно зависит от топографической и шумовой составляющих фазы радиолокационного сигнала.

В задачу повышения точности измерения смещений наиболее существенный вклад вносят следующие параметры:

1. *Геометрические характеристики применяемых УО.* Для повышения точности измерения смещений необходимо повышать отношение сигнал/шум. Этого можно достигнуть, повышая ЭПР УО за счёт изменения его формы и размеров. Однако при изменении формы УО могут налагаться более жёсткие требования к ориентации УО, а при увеличении размеров УО ухудшаются его прочностные качества. Предложенными оптимальными характеристиками УО являются треугольная форма граней и длина внутреннего ребра 1 м.
2. *Пространственное разрешение радиолокационных снимков.* Для обеспечения значения *SNR*, позволяющего уверенно идентифицировать УО на радиолокационных снимках, пространственное разрешение для различных диапазонов длин волн должно быть не больше значений, приведённых в табл. 4.
3. *Точность применяемой при обработке ЦММ.* Нужно отметить, что в случае радиолокационной интерферометрии с применением УО не требуется точное знание топографии местности для всего участка, достаточно повысить точность применяемой ЦММ в точках установки УО.

Литература

1. *Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под ред. В. С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
2. *Добрынин И. И., Песяк Ф. В., Савин А. И., Севастьянов Н. Н.* Измерение смещений земной поверхности методом радиолокационной интерферометрии с применением уголкового отражателя радиосигнала // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 113–121.
3. *Захаров А. И., Захарова Л. Н., Лебедева М. А.* Применение РСА-интерферометрии для мониторинга транспортной инфраструктуры в зонах с опасной динамикой земных покровов // Российская научная конф. «Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой»: эл. сб. докл. Улан-Удэ, 2010. С. 32–38. URL: http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdf/c1_4.pdf.
4. *Захаров А. И., Захарова Л. Н., Красногорский М. Г.* Мониторинг оползневой активности методами радарной интерферометрии с помощью трехгранных УО // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3 (в печати).
5. *Михайлов В. О., Киселева Е. А., Смольянинова Е. И., Дмитриев П. Н., Голубева Ю. А., Исаев Ю. С., Дорохин К. А., Тимошкина Е. П., Хайретдинов С. А., Голубев В. И.* Мониторинг оползневых процессов на участке северокавказской железной дороги с использованием спутниковой радарной интерферометрии в различных диапазонах длин волн и уголкового отражателя // Геофизические исследования. 2013. Т. 14. № 4. С. 5–22.
6. *Aguado V., Vink A., James B., Biescas E.* An improved combination of Natural Reflectors and Corner Reflectors to monitor surface heave generated by SAGD operations using InSAR satellite technology // World Heavy Oil Congress. 2015. WHOC15-321. URL: http://tre-altamira.com/uploads/2015_03_Aguado-et-al-WHOC15-321.pdf.
7. *Bamler R., Hartl P.* Synthetic aperture radar interferometry // Inverse Problems. 1998. V. 14. No. 4. P. R1-R54.
8. *Ketelaar V. B. H. (Gini)* Satellite Radar Interferometry: Subsidence Monitoring Techniques / Remote Sensing and Digital Image Processing. Berlin: Springer, 2009. 243 p. ISBN 978-1-4020-9427-9.
9. *Rosen P. A., Hensley S., Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodriguez E., Goldstein R. M.* Synthetic aperture radar interferometry // Proc. IEEE. 2000. V. 88. No. 3. P. 333–382.
10. *Sarabandi K., Chiu T.* Optimum Corner Reflectors for Calibration of Imaging Radars // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1996. V. 44. No. 10. P. 1348–1361.

Study of factors affecting displacement measurement accuracy by radar interferometry method in various frequency bands using corner reflectors

I. I. Dobrynin, A. I. Savin, N. N. Sevastiyanov

Gazprom Space Systems JSC, Korolev 141070, Russia

E-mail: info@gazprom-spacesystems.ru

The paper is devoted to the study of displacement measurement accuracy by radar interferometry method using corner reflectors and application of space radar images in different frequency bands. A wide range of synthetic aperture radar (SAR) spacecrafts providing images in different frequency bands is currently available on the Earth remote sensing market. Use of data from several spacecrafts may significantly increase operational efficiency, accuracy of measurements and reduce risks related to the possible unavailability of survey from one or another SAR spacecraft. The technology of differential interferometry using corner reflectors allows to avoid decorrelation of radiofrequency signal in X and C-bands due to vegetation, precipitation etc. However, depending on the frequency band of observation, specific requirements are applied to the sizing and shape of corner reflectors, required spatial resolution of images etc. This paper evaluates the contribution of different parameters in the displacement measurement accuracy and gives recommendations for improving displacement measurement accuracy by radar interferometry method using corner reflectors.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), radar interferometry, Earth remote sensing, differential interferometry, Earth's surface subsidence monitoring, corner reflector

Accepted: 21.05.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-29-36

References

1. Verba V.S., Neronskii L.B., Osipov I.G., Turuk V.E., *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-located Earth's surface radar monitoring systems), Moscow: Radiotekhnika, 2010, 680 p.
2. Dobrynin I.I., Pesyak F.V., Savin A.I., Sevastiyanov N.N., *Izmerenie smeshchenii zemnoi poverkhnosti metodom radiolokatsionnoi interferometrii s primeneniem ugolkovykh otrazhatelei radiosignala* (Measurement of Earth surface displacements by SAR interferometry using corner reflectors), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 113–121.
3. Zakharov A.I., Zakharova L.N., Lebedeva M.A., *Primenenie RSA-interferometrii dlya monitoringa transportnoi infrastruktury v zonakh s opasnoi dinamikoi zemnykh pokrovov* (RSA-interferometry application for transport infrastructure in the areas with dangerous soil dynamics), *Rossiiskaya nauchnaya konferentsiya "Zondirovanie zemnykh pokrovov radarami s sintezirovannoi aperturoi"*. *Elektronnyi sbornik dokladov* (Russian Scientific Conference "Remote Sensing of Earth Covers Using Synthetic Aperture Radars", Proc. Conf.), Ulan-Ude, 2010, pp. 32–38, URL: http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdf/c1_4.pdf.
4. Zakharov A.I., Zakharova L.N., Krasnogorskii M.G., *Monitoring opolznevoi aktivnosti metodami radarnoi interferometrii s pomoshch'yu trekhgrannykh UO* (Monitoring of the landslide activity using radar interferometric observations of trihedral corner reflectors), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 3, in print.
5. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Smol'yaninova E.I., Dmitriev P.N., Golubeva Yu.A., Isaev Yu.S., Dorokhin K.A., Timoshkina E.P., Khairtdinov S.A., Golubev V.I., *Monitoring opolznevykh protsessov na uchastke severokavkazskoi zheleznoi dorogi s ispol'zovaniem sputnikovoi radarnoi interferometrii v razlichnykh diapazonakh dlin voln i ugolkovogo otrazhatelya* (Soil slip monitoring on the North Caucasian railway area using satellite radar interferometry in the different wave bands and corner reflector), *Geofizicheskie issledovaniya*, 2013, Vol. 14, No. 4, pp. 5–22.
6. Aguado V., Vink A., James B., Biescas E., *An improved combination of Natural Reflectors and Corner Reflectors to monitor surface heave generated by SAGD operations using InSAR satellite technology*, *World*

- Heavy Oil Congress*, 2015, WHOC15-321, URL: http://tre-altamira.com/uploads/2015_03_Aguado-et-al-WHOC15-321.pdf.
7. Bamler R., Hartl P., Synthetic aperture radar interferometry, *Inverse Problems*, 1998, Vol. 14, No. 4, pp. R1–R54.
 8. Ketelaar V. B. H. (Gini), Satellite Radar Interferometry: Subsidence Monitoring Techniques, *Remote Sensing and Digital Image Processing*, Berlin: Springer, 2009, 243 p., ISBN 978-1-4020-9427-9.
 9. Rosen P. A., Hensley S., Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodriguez E., Goldstein R. M., Synthetic aperture radar interferometry, *Proc. IEEE*, 2000, Vol. 88, No. 3, pp. 333–382.
 10. Sarabandi K., Chiu T., Optimum Corner Reflectors for Calibration of Imaging Radars, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996, Vol. 44, No. 10, pp. 1348–1361.