



УДК 528.8

## ВНЕШНЯЯ КАЛИБРОВКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РАДИОЛОКАТОРОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

- Л.М. Атрошенко,** кандидат физико-математических наук, директор подспутникового полигона "Скрипалі" ООО "ЛЕС-ИНФОРМ", г. Харьков
- Н.Н. Горобец,** доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина
- А.Л. Костриков,** старший научный сотрудник ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков
- М.Г. Красногорский,** кандидат технических наук, начальник отдела ОАО "Военно-промышленная корпорация "НПО машиностроения", г. Реутов Московской обл., Россия
- В.М. Малюков,** кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник ОАО "Военно-промышленная корпорация "НПО машиностроения", г. Реутов Московской обл., Россия
- И.А. Мель,** директор метрологического учебно-издательского центра ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков



Л.М. Атрошенко



Н.Н. Горобец



А.Л. Костриков



М.Г. Красногорский



В.М. Малюков



И.А. Мель

*Изложен метод внешней калибровки пространственной разрешающей способности радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны высокого разрешения космического базирования с использованием пассивных метрологических средств. Разработаны малогабаритные антенны для транспондеров.*

*External calibration method of space resolving power of radiodetectors with synthesized aperture of high-resolution space based antenna with using passive metrological means is outlined. Mini-antenna for transponders is developed.*

### Введение

Радиолокаторы, как и все средства дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ), по существу являются многофункциональными измерительными приборами. Они измеряют характеристики вторичного излучения наземных объектов, что дает возможность при надлежащей обработке полученного из космоса информационного продукта измерить множество параметров и характеристик природных и антропогенных образований на земной поверхности, а при длинноволновой радиолокации – и близлежащих подповерхностных объектов.

Предполетная калибровка радиолокаторов космического базирования, в частности, радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА), осуществляется на специально разработанных стендах [1]. После запуска, в течение которого аппарат космической системы (КС) подвергается множеству трудно учитываемых внешних воздействий, в период летных испытаний КС осуществляется оценка степени реально произошедших изменений характеристик используемого датчика. В период штатной эксплуатации (ШЭ) КС характеристики антенны и приемопередающего тракта претерпевают естественный временной дрейф и могут существенно изменяться под влиянием различных внешних воздействий в пространстве ближнего космоса. Эти изменения должны быть точно определены, чтобы не повлиять на качественные характеристики конечного информационного продукта, а следовательно, на его востребованность и конкурентоспособность.

Весь комплекс работ по оценке временного дрейфа целевых характеристик КС и качества выходного продукта ДЗЗ – контроль (валидация) и подтверждение (верификация) целевых характеристик КС вместе с так называемой калибровкой результатов космического землеобзора (позиционное и радиометрическое выравнивание по снимку) –

в литературе получил общее название внешней калибровки КС (Cal/Val).

Мировым сообществом прикладываются серьезные усилия для разработки стратегии обеспечения качества данных ДЗЗ. Так, при Комитете по спутниковым наблюдениям Земли (CEOS) создана специальная рабочая группа по калибровке и валидации (WGCV) [2], конечная цель которой состоит в консолидации усилий ученых разных стран в разработке методов и средств обеспечения долгосрочной достоверности по точности и качеству данных космического землеобзора.

Для проведения работ по внешней калибровке целевых характеристик КС создаются специальные объекты, называемые мишенными или калибровочными комплексами, полигонами и т.п. Ряд национальных космических агентств (ESA, NASA, JAXA, KARI и т.д.) организовали интенсивные калибровочные работы для РСА принадлежащих им космических аппаратов (КА). С целью подтверждения таким образом качества своей продукции ими были организованы международные системы наземных полигонов.

В Украине [3] и в России [4] развиваются концепция сети подспутниковых полигонов и подходы к созданию международной сети подспутниковых полигонов как важнейшего сегмента наземной инфраструктуры космических исследований [5]. Это подтверждает актуальность вопросов разработки и внедрения в повседневную практику новых методик внешней полетной калибровки целевых характеристик РСА космического базирования, а также существенного расширения контролируемых параметров КС и географии полигонного обслуживания с целью интеграции в рамках единого проблемно-ориентированного подхода разных видов деятельности (в частности, научно-методической, информационной, технологической), направленной на гарантированное долгосрочное (на весь срок эксплуатации КС) обеспечение качества конечного продукта ДЗЗ.

Для решения как научных, так и практических задач космического землеобзора первостепенную роль играет точность оценки пространственной разрешающей способности (ПРС) сенсора. Эта целевая характеристика во многом определяет перечень доступных решению тематических задач, а точность ее оценки фактически определяет степень достоверности их решения. В практике внешней калибровки радиолокаторов космического базирования принято оценивать этот параметр по ширине отклика на точечную цель [1].

Однако в задаче определения разрешающей способности РСА космического базирования с помощью наземных пассивных метрологических средств возникает противоречие, суть которого в следующем. Для обеспечения высокой надежности работы радиолинии РСА КС – наземный отражатель величина отраженного сигнала должна быть достаточно большой. Выполнение этого требова-

ния обеспечивается за счет использования пассивных самофазированных трехгранных уголкового отражателей (ТУО), которые отражают электромагнитную волну в направлении ее прихода. При этом мощность отраженной волны определяется формой и площадью граней ТУО [6]. Для увеличения мощности отраженной волны необходимо увеличивать размеры ТУО. Поскольку в радиолокации мощность отраженной волны обратно пропорциональна четвертой степени расстояния, ясно, что требуются значительные размеры ТУО. При использовании ТУО, линейные размеры эквивалентной апертуры которых существенно больше линейных размеров элемента разрешения РСА (то есть в случае применения радиолокаторов высокого и сверхвысокого разрешения), точечные источники ( $l \ll L$ , где  $l$  – линейные размеры источника обратного рассеяния,  $L$  – линейные размеры элемента разрешения) имеют малые значения эффективной площади рассеяния (ЭПР), что исключает их идентификацию на радиолокационном изображении (РЛИ).

Электродинамическое моделирование этих источников обратного рассеяния в данном случае также не дает сколько-нибудь полезных для оценки разрешающей способности РСА результатов, поскольку  $l \cong \lambda$ , где  $\lambda$  – длина рабочей волны радиолокатора. Иными словами, моделирование должно реализовываться в самой сложной для моделирования – резонансной области. В этом случае принципиально неприменимы асимптотические методы – метод квазиоптики и длинноволновое приближение, и задачу рассеяния электромагнитных волн необходимо решать строгими методами физической теории дифракции. До настоящего времени эти методы отличаются серьезными математическими и вычислительными трудностями. Точное решение удается получить только для случаев так называемых координатных поверхностей, когда можно решать уравнения Максвелла методом разделения переменных.

Существующие в настоящее время антенны активных анализаторов – ретрансляторов (транспондеров), использующихся, в частности, для оценки разрешающей способности радиолокаторов, также имеют размеры, не позволяющие рассматривать их как точечные источники излучения в случае высокого и сверхвысокого разрешения радиолокатора [7].

Решению задачи эффективной внешней калибровки ПРС радиолокаторов высокого и сверхвысокого разрешения с применением пассивных и активных метрологических средств и посвящена настоящая статья.

### **1. Оценка линейного разрешения на местности с использованием миры пассивных РЛЮ больших размеров**

Трудоемкая внешняя калибровка по пассивным радиолокационным отражателям (ПРЛЮ) имеет це-

льный ряд неопределимых преимуществ. Так, ПРЛО могут быть изготовлены с высокой радиометрической точностью, не задерживают отраженный сигнал. При условии точного выбора типа, конструкции и материала для их изготовления пассивные отражатели обладают не зависящей от погодных условий эффективной площадью рассеяния (ЭПР), вследствие чего могут быть аттестованными как эталоны ЭПР. ПРЛО достаточно удобны для работы в полевых условиях, что важно при долгосрочном многократном штатном использовании их для контроля временного дрейфа целевых характеристик РСА. При точном выполнении правил эксплуатации и разработанной программы обеспечения надежности надежность таких метрологических средств близка к единице. Еще одним преимуществом является их низкая стоимость, а следовательно, доступность тиражирования, что обеспечивает гарантию получения репрезентативных данных и надежную статистику измерений в течение одного сеанса радиолокационной съемки.

Однако ПРЛО с размерами, позволяющими считать их точечными, при разрешающей способности меньше метра имеют ЭПР значительно меньше 0 дБ. Так, наиболее распространенные и употребляемые ПРЛО – трехгранные уголкового отражатели с треугольными гранями и длиной ребра 0,1 м обладают ЭПР –3,32; –8,74, – 8,74 и –13,42 дБ для X-, C-, S- и L-диапазонов соответственно.

Разработан метод оценки ПРС радиолокаторов с высокой разрешающей способностью с использованием ПРЛО с большими значениями ЭПР. Фактически метод сводится к представлению главного лепестка диаграммы обратного рассеяния РЛО в виде кривой Гаусса и разложения его на составляющие кривые Гаусса, центрами которых являются центры пикселей:

$$A(x) = \frac{1}{v\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2v^2}}, \quad (1)$$

где  $A(x)$  – уровень отраженного сигнала;  $a$  – сдвиг;  $v^2$  – дисперсия.

Как известно, сумма кривых Гаусса представляет собой также гауссиану со средним значением, отклонением и дисперсией, равными сумме соответствующих величин слагаемых гауссиан.

Амплитуда  $NA_{\max}(x)$  и дисперсия суммарной гауссианы  $Nv^2$  рассчитываются по точкам центров

пикселей и соответствующих им значений амплитуды, вследствие чего полученная кривая практически полностью совпадает с формой главного лепестка диаграммы направленности обратного рассеяния РЛО. Здесь  $N$  – количество пикселей, взятых для расчета, равное количеству слагающих суммарную гауссиан – гипотетических диаграмм обратного рассеяния точечных источников, находящихся в центре каждого пикселя. Значение сдвига  $a=0$  присваивается как суммарной гауссиане, наблюдаемой на РЛИ, так и центральной из слагающих ее гауссиан. У остальных кривых-слагаемых сдвиги  $a_i = \pm n_i l$ , где  $l$  – линейные размеры элемента разрешения по заданному направлению,  $n_i$  – его порядковый номер, считая от центрального пикселя. Значение амплитуды, равное амплитуде пикселя, присваивается центральной точке пикселя.

Для контрольно-калибровочного комплекса (ККК) [8], расположенного на подспутниковом полигоне “Скрипалі”, была создана пространственная мира, состоящая из 17 сертифицированных трехгранных уголкового отражателей с треугольными гранями, состав которой приведен в табл. 1.

Внешний вид миры в рабочем положении приведен на рис. 1.

РЛИ миры, полученное в ходе летно-экспериментальных испытаний (ЛЭИ) ККК 14.02.2012 г. с использованием РСА КА “RadarSat-2”, приведены на рис. 2.

Линейные размеры элемента разрешения определялись в прямом эксперименте путем сопоставления РЛИ и данных измерения на местности. Измерения проводились двумя независимыми методами измерений – лазерной рулеткой D8 и приемниками ГНСС GX 1230GG, производства фирмы “Leica Geosystems AG”, Швейцария. Приборы занесены в Государственный реестр средств измерительной техники Украины и имеют действующие свидетельства о поверке. Работа с этими приборами, а также сама методика проведения таких измерений в полевых условиях требуют определенных теоретических знаний и практических навыков. В течение 2011–2012 гг. в рамках кроссобразования персонала в метрологическом учебно-издательском центре ННЦ “Институт метрологии” было обучено 11 сотрудников полигонно-калибровочного комплекса, квалификация которых позволила измерить рас-

Таблица 1

Характеристики РЛО в составе миры оценки разрешающей способности

№ п/п	Кол-во, шт.	$a^*$ , м	ЭПР, м <sup>2</sup>			
			X-диапазон $\lambda=3$ см	C-диапазон $\lambda=5,6$ см	S-диапазон $\lambda=9,6$ см	L-диапазон $\lambda=23$ см
1	6	1,218	10246,55	2940,66	1000,64	174,33
2	11	0,862	2573,24	738,49	251,29	43,78

\*  $a$  – длина внутренних сторон ребер трехгранных уголкового отражателей с треугольными гранями (способ изготовления обеспечил точность не хуже 0,1 мм).



Рис. 1. Пространственная мира оценки разрешающей способности РСА на ККК "Скрипалі" в ходе ЛЭИ 14.02.2012 г.

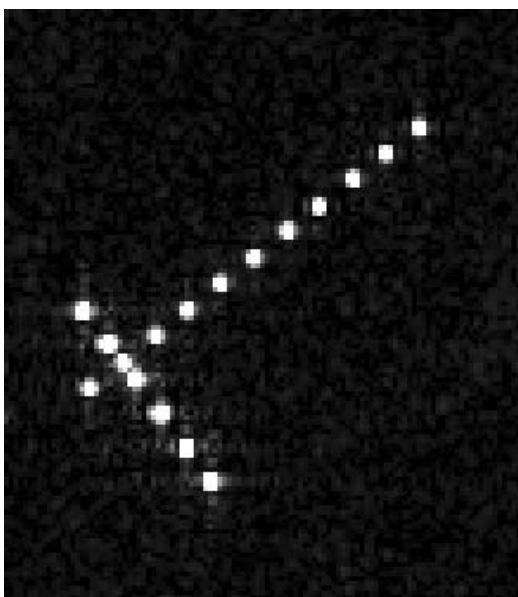


Рис. 2. РЛИ пространственной мира оценки разрешающей способности, РСА КА "RadarSat-2"

стояние между центральными точками пар ТУО (вершины пирамид) в пространственной мире (соответственно 10 и 5 пар измерений) с точностью не хуже 0,01 м. В дальнейших расчетах использовались средние каждой пары полученных значений. Среднее значение измеренных расстояний составило  $(14,10 \pm 0,12)$  м. Проведенная статистическая обработка результатов измерений, полученных двумя указанными путями и показавших их фактически полное совпадение (в среднем отличия в парах измерений составляли 3...5 мм, они не значимы на уровне  $p > 0,99$ ), позволяет сделать следующие выводы:

- при должном уровне точности измерений расстояний между центрами ТУО их ошибки можно не учитывать при расчетах точности оценки пространственной разрешающей способности;
- поскольку измерения с применением приемника ГНСС весьма трудоемки, в соответствии с

полученными результатами при использовании этой методики можно рекомендовать ограничиваться измерениями расстояний только с помощью лазерной рулетки;

- полученные результаты свидетельствует о достаточном уровне квалификации, приобретенной персоналом.

В радиолокации под угловой разрешающей способностью радиолокатора понимают ширину главного лепестка диаграммы направленности его антенны по половине мощности в главном максимуме. Поэтому ПРС РСА рассчитывалась по уровню 0,707 от максимума амплитуды гауссиан-слагаемых решением (1) при  $A(x) = 0,707A_{\max}(x)$ . Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка линейной разрешающей способности РСА

№ ТУО	a, м	Разрешающая способность Sr, м	
		Sr <sub>x</sub>	Sr <sub>y</sub>
1	1,218	1,51	2,75
2	1,218	1,61	2,92
3	1,218	1,43	2,84
4	1,218	1,78	2,87
5	1,218	1,53	2,76
6	1,218	1,63	2,94
7	0,862	1,50	2,68
8	0,862	1,58	2,86
9	0,862	1,52	2,73
10	0,862	1,58	2,84
11	0,862	1,52	2,72
12	0,862	1,59	2,89
13	0,862	1,58	2,84
14	0,862	1,56	2,84
15	0,862	1,56	2,84
16	0,862	1,48	2,65
17	0,862	1,65	2,96
Среднее		1,56	2,82

Таким образом, получены две малых выборки (6 и 11 вариант соответственно), образованных результатами оценки характеристик обратного рассеяния ТУО с различающимися параметрами, а именно: линейными размерами и ориентировкой относительно азимута съемки.

Для расчета достоверности отличий по критерию Стьюдента в этом случае справедливо следующее соотношение:

$$t_{\beta} = \frac{|\bar{X} - \bar{Y}| \sqrt{n_{\bar{x}} \cdot n_{\bar{y}} \cdot (n_{\bar{x}} + n_{\bar{y}} - 2)}}{\sqrt{[\sum (x_i - \bar{X})^2 + (y_i - \bar{Y})^2] (n_{\bar{x}} + n_{\bar{y}})}}, \quad (2)$$

где  $n_x, n_y$  – количество элементов в выборках (в данном случае 11 и 6);  $\bar{X}, \bar{Y}$  – среднее в первой и второй выборках.

Согласно расчетам, различия между двумя выборками как для  $Sr_x$ , так и для  $Sr_y$  недостоверны на уровне  $p > 0,99$ , что позволяет объединить все данные в одну выборку (17 вариант).

В результате расчетов на основании данных, полученных в ходе летно-экспериментальных испытаний ККК, получены следующие значения разрешающей способности РСА “RadarSat-2”:

по дальности с вероятностью 95 % –  $(1,56 \pm 0,016)$  м;

по дальности с вероятностью 99,9 %  $(1,56 \pm 0,030)$  м;

по азимуту с вероятностью 95 %  $(2,82 \pm 0,009)$  м;

по азимуту с вероятностью 99,9 %  $(2,82 \pm 0,017)$  м.

Таким образом, по закону “трех сигм” [9] разовое наблюдение описываемой миры с вероятностью  $p > 0,99$  % даёт ошибки в оценке пространственной разрешающей способности РСА не более 2,0 % по дальности и 1,0 % – по азимуту.

По формуле (2) рассчитывались доверительные интервалы генерального среднего неполной выборки (случай выхода из строя по каким-то причинам одного из ТУО). Согласно  $t$ -критерию Стьюдента, различия в полной и неполной мирах недостоверны на уровне  $p > 0,99$ . Иными словами, отсутствие одного из ТУО (падение из-за ветровой нагрузки, механические повреждения при транспортировке и пр.) не окажет ощутимого влияния на результаты Cal/Val пространственной разрешающей способности: пространственная мира будет по-прежнему выполнять свое целевое назначение.

Использование такой миры дает возможность получить достоверные данные в течение одного сеанса радиолокационной съемки, что не только экономит время и ресурсы, но и обеспечивает высокую точность оценки за счет идентичности условий распространения радиоволн (РРВ). Вследствие этого появляется реальная возможность отслеживать естественный временной дрейф характеристик антенны РСА и оперативно оценивать резкие изменения в них в случае появления таковых при каких-либо негативных внешних воздействиях. Все это в совокупности обеспечивает точную оцен-

ку качества информационного продукта по данному параметру и дает возможность его сертифицировать с гарантией параметров на срок между двумя сеансами съемки ККК.

При заявленном пространственном разрешении по дальности и азимуту соответственно 1,6 и 2,8 м приведенные результаты, по-видимому, следует считать вполне удовлетворительными, методику – успешно апробированной, а пространственную разрешающую способность РСА “RadarSat-2” – соответствующей заявляемой.

## 2. Антенны для активных средств оценки пространственной разрешающей способности

Одним из способов решения задачи эффективной внешней калибровки пространственной разрешающей способности радиолокаторов высокого и сверхвысокого разрешения с применением активных ретрансляторов-анализаторов является использование в составе транспондеров слабонаправленных приемной и передающей антенн, линейные размеры которых значительно меньше линейных размеров элемента разрешения ( $l \ll L$ ).

Рассмотрим антенны, отвечающие заданным условиям, созданные на основе полуволновых резонансных вибраторов.

Если полуволновый вибратор расположить над плоским металлическим экраном на высоте, равной четверти длины рабочей волны радиолокатора, такая приемопередающая антенна обеспечивает однонаправленное излучение с максимумом, направленным вдоль нормали к экрану. Диаграмма направленности во всем переднем полупространстве описывается формулой

$$F(\theta, \varphi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta \cos \varphi\right)}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}} \sin\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right).$$

Здесь угол  $\theta$  отсчитывается от нормали к экрану (ось  $z$ ), а угол  $\varphi$  отсчитывается от оси  $x$  в плоскости  $xOy$ , как обычно в правой сферической системе координат. Если вибратор расположен вдоль оси  $Ox$ , диаграмма направленности в плоскости электрического вектора поля вибратора равна

$$F^E(\theta, \varphi = 0) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right)}{\cos \theta} \sin\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right).$$

Ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны по половинной мощности в этой плоскости равна  $2\Delta\theta_{0,5P} = 72,6^\circ$ . В плоскости магнитного вектора поля рассматриваемой вибраторной антенны диаграмма направленности шире и описывается соотношением

$$F^H(\theta, \varphi = 90^\circ) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right).$$

Отметим, что, как показывает эксперимент, приведенные формулы, полученные для случая

бесконечного идеального проводящего экрана, обеспечивают удовлетворительную точность расчетов при использовании дискового экрана диаметром  $D \geq (0,6-0,7)\lambda$  (здесь  $\lambda$  – длина волны). В случае экрана прямоугольной формы большая сторона его должна быть параллельна вибратору и удовлетворять такому же соотношению  $l_1 \geq (0,6-0,7)\lambda$ . Меньшая сторона экрана, перпендикулярная вибратору, должна удовлетворять условию  $l_2 \geq (0,5-0,6)\lambda$ .

Из физических соображений следует, что уменьшить ширину главного лепестка диаграммы направленности антенны вибраторного типа в плоскости магнитного вектора поля можно путем использования двух линейных вибраторов, параллельных друг другу и размещенных на высоте  $\lambda/4$  над экраном и расстоянии  $d$  между собой. В этом случае диаграмма направленности описывается соотношением

$$F^H(\theta) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right) \cos\left(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta\right).$$

Очевидно, что ширина диаграммы направленности  $F^H(\theta)$  тем меньше, чем больше расстояние  $d/\lambda$  между вибраторами.

Расчеты показали, что при использовании экранов достаточно больших электрических размеров, когда в электродинамической модели экран можно считать бесконечным и идеально проводящим, одинаковая ширина главного лепестка диаграммы направленности по половине мощности в обеих главных плоскостях наблюдения и, следовательно, близкая к осесимметричной форме имеет место при расстоянии между вибраторами около половины длины волны.

Более точные расчеты, проведенные для случая конечных экранов прямоугольной или квадратной формы методом геометрической теории дифракции, показали, что осесимметричная диаграмма направленности получается при расстояниях  $d \approx (0,42-0,55)\lambda$  между вибраторами [10].

Отметим, что при использовании экрана квадратной или круглой формы предложенная антенна может быть модернизирована для двухканального транспондера, работающего в ортогональном линейно поляризованном базисе. Для этого антенна должна представлять собой решетку четырех взаимно перпендикулярных резонансных вибраторов.

Поскольку вибраторные антенны имеют малый коэффициент усиления, уровень ретранслированного сигнала, достаточный для работы радиолокатора, следует обеспечивать высоким усилением входного малошумящего усилителя высокой частоты и выходного усилителя мощности транспондера.

Транспондеры, снабженные разработанными антеннами, могут быть изготовлены в носимом варианте, что может значительно расширить без дополнительных затрат географию процесса Cal/Val радиолокаторов высокого и сверхвысокого разре-

шения космического базирования и обеспечить возможность синхронных с рабочими сеансами оценок их пространственной разрешающей способности непосредственно в местах рабочей съемки (то есть в тех же условиях РРВ), что значительно повысит гарантии качества информационного продукта.

### Заключение

Таким образом, решена задача разработки эффективных способов внешней калибровки пространственной разрешающей способности радиолокаторов космического базирования с высоким и сверхвысоким разрешением с применением как пассивных, так и активных метрологических средств. Реализована пространственная мира для оценки пространственной разрешающей способности РСА высокого разрешения, состоящая из пассивных метрологических средств – сертифицированных трехгранных уголкового отражателей с треугольными гранями. Разработан и апробирован простой полуэмпирический метод расчета ПРС радиолокатора по отклику от сосредоточенной пассивной цели. Это дает возможность с высокой достоверностью результатов проводить калибровку ПРС в один сеанс и оперативно отслеживать ее изменения в течение всего периода штатной эксплуатации КС.

Разработаны малогабаритные антенны на основе полуволновых вибраторов, которые, вследствие малых линейных размеров, могут быть эффективно использованы как точечные источники излучения в активных средствах оценки ПРС радиолокаторов высокого разрешения.

Предложены вибраторные антенны, расположенные над экранами, с осесимметричной диаграммой направленности как на одной линейной поляризации излучения, так и на двух ортогональных.

Конструктивно разработанные антенны могут быть использованы в носимых приборах, что повышает их эксплуатационные возможности.

### Список литературы

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук. – М.: Радиотехника, 2010. – 676 с.
2. [http://www.ceos.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=75&Itemid=113](http://www.ceos.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=75&Itemid=113).
3. Network of complete ground support of spaceborne synthetic aperture radars / L.M. Atroshenko, N.N. Gorobets, S.I. Kostyashkin, L.P. Safronova // Telecommunications and radio engineering. – 2009. – Vol. 68, № 4. – P. 361–369.
4. Карелин А.В. Валидация данных и калибровка целевой аппаратуры КА / А.В. Карелин [Электронный ресурс] // Радиофизические методы в

- дистанционном зондировании сред: V Всерос. науч. конф., 26–28 июня 2012 г., Муром: труды. – Электрон. дан. – Муром, 2012. – Режим доступа: <http://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/index.htm>.
5. Принципы организации и обслуживания международной системы подспутниковых полигонов / А.К. Черкашин, Н.Н. Горобец, С.И. Смирнов [и др.] // Четвертый белорусский космический конгресс, 27–29 октября 2009 г., Минск: материалы. Т. 2. – Минск, 2009. – С. 12–19.
  6. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели / В.О. Кобак. – М.: Сов. радио, 1975. – 248 с.
  7. Small D. Synthetic aperture radar (SAR) – geometric calibration / D. Small, Er. Meier // *Microwaves, antennas & propagation*, IET. – August 2008. – Vol. 2. – P. 451–458.
  8. Мобильный контрольно-калибровочный комплекс для РСА космического базирования / Л.М. Атрошенко, Н.Н. Горобец, А.Н. Горобец [и др.] // Вестник Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина. – 2012. – № 110, вып. 20. – С. 3–9. – (Сер. “Радиофизика и электроника”).
  9. Гутер Р.С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта / Р.С. Гутер, Б.В. Овчинский. – М.: Наука, 1970. – 432 с.
  10. Gorobets N.N. Optimized vibrator radiator with flat finite size screen / N.N. Gorobets, N.P. Yeliseyeva // 8<sup>th</sup> International conference on antenna theory and techniques, 20–23 September 2011, Kyiv, Ukraine. – P. 205–207.