

DOI 10.24412/2221-2574-2024-4-56-66

УДК 621.396.96: 528.855

## СОЗДАНИЕ И ОСНАЩЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПОДСПУТНИКОВЫХ ПОЛИГОНОВ ДЛЯ ЛЁТНЫХ ИСПЫТАНИЙ, КАЛИБРОВКИ И ВАЛИДАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ РСА

**Алексеева Анна Максимовна**

кандидат технических наук, ведущий инженер АО «Концерн радиостроения «Вега».

E-mail: [asianna@list.ru](mailto:asianna@list.ru)

**Лепёхина Татьяна Александровна**

кандидат технических наук, начальник отдела АО «Концерн радиостроения «Вега».

E-mail: [tatonika@inbox.ru](mailto:tatonika@inbox.ru)

**Николаев Вадим Игоревич**

начальник лаборатории АО «Концерн радиостроения «Вега».

E-mail: [vnikolaev65@inbox.ru](mailto:vnikolaev65@inbox.ru)

Адрес: 140180, Российская Федерация, Москва, Кутузовский проспект, д. 34.

*Аннотация:* Проведён анализ основных характеристик и требований, которые предъявляются к испытательным полигонам для калибровки и аттестации радиолокаторов с синтезированием антенны космического базирования. Предложена классификация радиолокационных полигонов и используемого на них оборудования. Показана необходимость создания в России подспутниковых полигонов различных классов на основе мирового опыта эксплуатации подобных систем. С учётом национальных условий разработаны общие требования к тестовому полигону.

*Ключевые слова:* радиолокатор с синтезированием апертуры (РСА), калибровка, валидация, подспутниковый полигон, углоковый отражатель, транспондер, радиолокационные миры.

### Введение

В настоящее время на орбите работает радиолокатор с синтезированием апертуры (РСА) высокого разрешения S-диапазона, разработанный АО «Концерн радиостроения «Вега», в составе космического аппарата (КА) «Кондор-ФКА»; запуск второго аналогичного спутника ожидается в ноябре нынешнего года. Проходят наземные испытания радиолокатор с синтезированной апертурой X-диапазона в составе КА «Обзор-Р», разрабатывается РСА S-диапазона с гибридной зеркальной антенной для КА «Кондор-ФКА-М». АО «ВПК «НПО машиностроения» также ведёт разработку миниспутника с РСА X-диапазона «Diamond-X», что позволит за счёт одновременного вывода на орбиту нескольких КА с РСА оперативно создать космическую многоспутниковую группировку, обеспечивающую высокую периодичность съёмки земной поверхности.

В нашей стране ведутся научно-исследовательские работы по созданию бортовых радиолокационных комплексов для использова-

ния в составе геосинхронной космической системы радиолокационного наблюдения ГЕО-САР [1], а также многодиапазонного радиолокационного комплекса наблюдения Земли в X-, L- и P-диапазонах и группировки РСА на малых космических аппаратах в рамках проекта «Сфера» [2]. Наземные испытания РСА производятся, в первую очередь, с использованием пилот-сигналов, однако результаты таких испытаний не всегда объективно отражают реальные сквозные характеристики космических РСА, особенно в случае сверхвысокого разрешения. Мощные каскады, антенная система и среда распространения при широкой полосе вносят принципиально другие искажения в траекторный сигнал [3], которые нужно корректировать при настройке всего комплекса.

В качестве реперов и калибровочных средств часто используются искусственные объекты: зеркальные антенны, водонапорные башни, опоры линий электропередач, нефтяные платформы [4]. Такие объекты могут рассматриваться как удобное средство радиомет-

рической калибровки РСА космического базирования, поскольку, например, некоторые нефтяные платформы имеют при круглогодичном радиолокационном наблюдении стабильность отражения лучше 0,5 дБ [4]. Вместе с тем такие измерения метрологически не обеспечены и не могут охватить всех характеристик РСА, поэтому для проведения лётных испытаний и в процессе эксплуатации необходима съёмка полигона со специальными радиолокационными мирами.

Существующие в России подспутниковые радиолокационные испытательные полигоны «Качалинский», в районе аэропорта Монино и др. имеют пространственную и потенциальную миры и обеспечивают измерение радиометрических и координатных характеристик, но нуждаются в существенной модернизации. Некоторые подспутниковые полигоны становятся недоступными.

Кроме того, нужно учитывать, что полигоны, оснащённые современным метрологическим оборудованием и мирами, методики измерения сквозных характеристик космических РСА должны быть разработаны, введены в эксплуатацию и готовы к работе до запуска КА. При этом следует принимать во внимание, что Россия обладает весьма протяжённой территорией и многообразием природных зон. Это даёт возможность выбора региона размещения полигонов с учётом требований как достоверной оценки характеристик РСА в ходе эксплуатации, калибровки и валидации их информационного продукта, так и для решения широкого круга тематических задач.

Целью данной статьи является анализ технических характеристик и опыта эксплуатации известных полигонов, разработка на его основе классификации полигонов и предложений, направленных на своевременное создание отечественных радиолокационных подспутниковых полигонов.

#### **Показатели качества ДЗЗ с РСА**

К современным РСА предъявляется ряд требований, которые должны быть подтверждены

при лётных испытаниях:

- ширина полосы обзора и захвата;
- ошибка реализации положения границ кадра относительно заданной точки местности;
- точность определения планового положения объекта и привязки РЛИ;
- пространственное разрешение по азимуту и дальности;
- относительный и интегральный уровень боковых лепестков импульсного отклика;
- радиометрическое разрешение РСА;
- радиометрическая чувствительность (шумовой эквивалент) РЛИ;
- динамический диапазон и радиометрическая нелинейность;
- точность определения абсолютной величины эффективной площади рассеяния;
- производительность наблюдения;
- оперативность получения информации.

Для интерферометрических режимов съёмки дополнительно требуется подтвердить точность формирования цифровых моделей рельефа, а также точность определения смещений поверхности [5]. Для подтверждения сквозных характеристик и калибровки РСА рекомендуется использовать наземные калибровочные средства в соответствии с таблицей 1 [6].

Согласно этим рекомендациям, активные транспондеры необходимы для подтверждения сквозных характеристик и калибровки космических РСА. Для решения требуемых задач они должны выполнять функции имитации дискретного отражателя с большой ЭПР и равномерной диаграммой рассеяния в большом диапазоне углов при небольших собственных размерах, селекции и формирования сигналов с требуемой поляризацией, в том числе с поляризацией возвращённой волны, отличающейся от падающей; при этом должны обеспечиваться широкий диапазон регулировки, высокая точность установки и стабильность имитируемой ЭПР. Заметим, что количественно требования по точности поляризационной калибровки в [5, 6] не установлены и находятся в стадии разработки.

**Таблица 1.** Рекомендации по применению наземных калибровочных средств

Характеристика	Контролируемый параметр	Тестовый объект	Требуемая точность
Отклик на точечную цель	- коэффициент усиления - ширина импульсного отклика - пиковый уровень боковых лепестков - интегральный уровень боковых лепестков	Транспондер или уголкового отражатель	1 дБ 10% 1 дБ 0,5 дБ
Диаграмма направленности антенны	- азимутальная плоскость - угломестная плоскость	- Транспондер - Тропические леса Амазонки	1 дБ 0,5 дБ
Радиометрия	Постоянство коэффициента усиления	Транспондер	0,5 дБ
Поляризация: V — вертикальная H — горизонтальная	Радиолокационные отражаемости $ S_{HH} ,  S_{HV} ,  S_{VH} ,  S_{VV} $	Тропические леса Амазонки и транспондер	Подлежит определению
Географическое положение	Положение точечной цели	- транспондер или уголкового отражатель - точно расположенный природный объект	5 м

**Обзор принципов построения полигонов**

Рассмотрим некоторые существующие радиолокационные полигоны, чтобы, учитывая опыт их создания и эксплуатации, выработать требования к отечественным полигонам и местам их размещения. Калибровка и валидация космических радиолокаторов ALOS/PALSAR и KOMPSAT-5 проводилась на монгольских полигонах, поскольку Монголия разнообразна по рельефу, составу почвы и климатическим условиям. Угловые отражатели размещались на пустынной плоской местности (плато), поверхность которой покрыта невысокой травой (рис. 1), а состояние грунтовой влаги на территории полигона контролировалось с помощью георадара. В качестве метрологических средств использовались несколько типов пассивных угловых отражателей с двухосевыми опорно-поворотными устройствами, размещённых на тщательно подготовленных фундаментах (рис. 2).

Канадский полигон, предназначенный для калибровки и валидации спутника

RADARSAT-2, показан на рис. 3. Территория полигона небольшая, прямоугольной формы, находится на ровном участке местности.

Метрологические средства полигона — это активные отражатели (транспондеры) (рис. 4), расположенные по периметру площадки и установленные на специально сконструированном фундаменте. Для осуществления сбора данных на тестовом калибровочном полигоне были установлены четыре угловых отражателя, ориентированных вдоль прямой, параллельной линии полёта КА, таким образом, что все угловые отражатели были отделены друг от друга минимальным расстоянием 100 м. Для задач калибровки и валидации использовались угловые отражатели трёх типов: двугранные, уменьшенные трёхгранные и средние трёхгранные.

Для лётных испытаний и внешней калибровки отечественных космических РСА «Меч-КУ», а впоследствии и «Кондор-Э», использовался полигон «Скрипали» (рис. 5) [7].



**Рис. 1.** Местность в окрестности полигона Корейского института аэрокосмических исследований



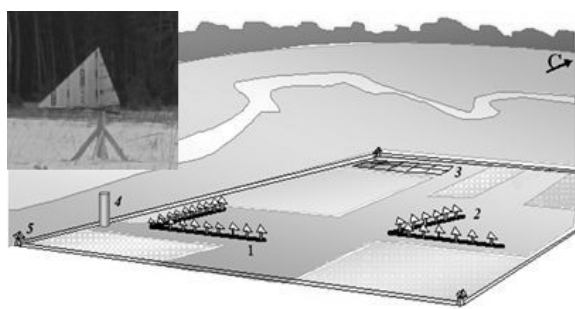
**Рис. 2.** Угловые отражатели для калибровки КОМPSAT-5



**Рис. 3.** Полигон, предназначенный для калибровки и валидации РСА «RADARSAT-2»



**Рис. 4.** Транспондер на полигоне в Оттаве для РСА «Radarsat-2»



**Рис. 5.** Схема размещения радиолокационных мишеней на полигоне «Скрипали»

Близкий по условиям размещения полигону «Скрипали» стационарный подспутниковый полигон «Западная Березина» расположен на территории учебной станции Белорусского университета и занимает площадь 100 кв. км. В настоящее время он используется для калиб-

ровки оптических средств ДЗЗ, однако его размеры позволяют установить пространственные и потенциальные миры для лётных испытаний и калибровки космических РСА.

На рис. 6 представлено РЛИ полигона с установленными на нём угловыми отражателями. На РЛИ видна потенциальная мишень для определения радиометрических характеристик (в виде линейки) и пространственная мишень в виде квадрата для оценки пространственной разрешающей способности. Этот полигон расположен в Нидерландах и использовался для задач калибровки и валидации самолётных РСА в рамках программы «Открытое небо», в выполнении которой принимал участие д.т.н., профессор Е.Ф. Толстов. В России для испытаний самолётных РСА по методикам программы «Открытое небо» организовывались

временные полигоны с аналогичными мирами, например, на территории аэродрома вблизи посёлка Монино.

Таким образом, в нашей стране имеется опыт проведения испытаний для подтверждения сквозных характеристик самолётных РСА. Данный опыт использован при создании подспутникового радиолокационного полигона «Качалинский», который может обеспечить наземное сопровождение процесса внешней калибровки РСА космического базирования. На территории тестового участка «Качалинский» в качестве метрологических средств используются отработанные на практике радиолокационные миры (пространственная и потенциальная) [8]. Кроме того, разрабатываются и проходят апробацию поляриметрические и интерферометрические миры.

#### Классификация полигонов

В зависимости от объёма и сложности решаемых задач, а также необходимой периодичности работ по проверкам и калибровке космических средств ДЗЗ для их наземного обеспечения создаются подспутниковые полигоны нескольких классов.

На начальном этапе лётных испытаний космического РСА для решения координатных задач, настройки системы управления КА и контроля параметров орбиты используются реперные подспутниковые полигоны (полигоны первого класса — РПП1). Это простейшие полигоны, не требующие существенных материальных затрат для их создания и поддержания. Их целесообразно использовать для лётных испытаний и калибровки различных систем ДЗЗ. Для организации таких полигонов можно приспособить территории, используемые для сельскохозяйственных нужд (поля, луга, пастбища), а также другие площади, где расположены легко распознаваемые природные и антропогенные объекты, координаты которых известны с высокой точностью. Желательно наличие искусственных ориентиров либо установка реперов. Ещё одним важным требованием является доступность срочных



Рис. 6. РЛИ голландского калибровочного полигона

метеорологических и ионосферных данных. Для полигонов первого класса требуется описание границ между участками подстилающей поверхности.

Для подтверждения сквозных характеристик КС ДЗЗ и периодического их контроля, а также для внешней калибровки КС используются полигоны второго класса (РПП2) — калибровочные. К ним предъявляются все требования, определённые для РПП1. Кроме того, они должны быть оборудованы специально подготовленными площадками для установки тест-объектов, к которым относятся пространственная, динамическая (потенциальная) миры, состоящие из определённым образом расположенных уголкового отражателей с калиброванными ЭПР. Такой полигон должен быть обеспечен аттестованными метрологическими средствами и помещениями для хранения уголкового отражателей, которые должны проходить периодическую поверку. Желательно установить на РПП2 активный транспондер и контрольную станцию. По границам РПП2 должны быть установлены геодезически привязанные реперы. РПП2 должен быть сертифицирован, для его эксплуатации необходимо наличие инфраструктуры и специально обученного персонала.

Для решения задач калибровки, валидации,

а также определения точности определения протяжённых и распределённых объектов и измерения их характеристик обустривают полигоны третьего класса (РППЗ) — эталонные. К этим полигонам предъявляются все требования, выдвигаемые для РПП2, кроме этого, требуется организация большого количества опорных точек, координаты которых известны с высокой точностью, для установки метрологических средств и средств наблюдения. Под эти полигоны выделяется значительная площадь (не менее  $10 \times 10$  км<sup>2</sup>). Они содержат эталонные участки природного и антропогенного происхождения с известными при любых условиях съёмки характеристиками [9]. Для эталонных участков необходимо наличие их описания и картосхемы, сверка с которой проводится ежегодно. Подспутниковый полигон третьего класса — это необходимый минимум для лётных испытаний, калибровки и валидации КС ДЗЗ в радиолокационном диапазоне.

Для оперативного решения большого круга тематических задач, разработки и применения новых методик описания тестовых объектов и эталонных участков, а также новых методик валидации информационных продуктов обустривают тематические полигоны и полигоны-стационары четвёртого класса (РПП4). Это объекты, на которых постоянно работают квалифицированные специалисты и научные сотрудники, организован полный цикл метеорологических и фенологических наблюдений, имеется регулярно пополняемая база данных, в которой хранятся результаты наблюдений, снимки полигона и его эталонных участков. РПП4 обладают всеми возможностями полигона третьего класса. Такими полигонами обладают далеко не все страны, эксплуатирующие группировки космических РСА. Однако известны тематические полигоны, ориентированные на съёмку датчиками ДЗЗ в оптическом диапазоне. К таким относятся 8 полигонов сельскохозяйственного назначения в Казахстане, основными задачами которых является валидация спутниковых данных о состоянии сельскохозяйственных культур и снежного по-

крова, а также наблюдение за процессами вегетации и созревания посевов, ходом посевных и уборочных работ. Результаты анализа данных, полученных при спутниковом наблюдении за сельскохозяйственных культур, возделываемыми на территории полигона, распространяется на значительные территории, занимаемые посевами этих культур в республике. Здесь для мониторинга были использованы данные оптических датчиков, но этот опыт может быть распространён на данные, получаемые радиолокационными системами ДЗЗ.

К полигонам пятого класса (РПП5) относятся многодиапазонные полигоны-стационары, которые способны обеспечить потребителя данными о составе и состоянии объектов, почвы, растительности на территории РПП5 и данными измерения радиометрических и поляриметрических характеристик интересующих объектов в различных частотных диапазонах для возможности последующего комплексирования. Эти полигоны обладают всеми свойствами полигонов четвёртого класса. На таких полигонах устанавливаются миры для измерения сквозных характеристик не только РСА различных частотных диапазонов, но также оптических и других датчиков ДЗЗ. РПП5 обладает большим количеством тестовых участков, в том числе покрытых растительностью, характерной для данного климатического пояса. Многократная съёмка таких участков в различных диапазонах частот датчиками разных стран с последующим сравнением полученных снимков, их изучением, научным анализом позволит выработать рекомендации для решения задач валидации. Таким образом, потребитель получает подсказку, в каком диапазоне частот, каком режиме съёмки, с какой поляризацией ему требуется заказать снимок интересующего его объекта и как интерпретировать полученные результаты, как применить их для решения своих задач. РПП5 обладает большими базами данных, где классифицирует и хранит подробные описания своих тестовых объектов и тестовых участков, а также результаты их съёмки в различных диапазонах частот.

На основании вышеизложенного можно сформировать облик радиолокационного полигона для калибровки и валидации современных и перспективных космических РСА и сформулировать этапы его создания.

#### **Предложения по созданию РЛ полигона**

Создание радиолокационного полигона состоит из следующих этапов: обоснование выбора и описание территории полигона, определение состава, схем размещения и технических характеристик метрологических средств; разработка конструкторской документации, изготовление реперов, уголкового отражателя, активных отражателей и транспондеров и комплектование оценочных мишеней (тест-объектов); сертификация метрологических средств, разработка эксплуатационной документации; создание инфраструктуры полигона, обучение персонала, аттестация и паспортизация полигона и сдача его в эксплуатацию [10].

Радиолокационный полигон должен обеспечивать формирование метрологической мишенной обстановки для проверки сквозных характеристик РСА, радиометрической калибровки РСА, геометрической коррекции и топографической привязки РЛИ. Этими задачами обусловлен его состав. Следует отметить, что речь идёт об оснащении полигонов 2 и 3 классов. К основным составным частям оборудования этих полигонов относятся:

- специальные площадки и фундаменты (пилоны) для размещения радиолокационных отражателей, имеющих геопривязку;
- комплект метрологических средств (пассивные и активные радиолокационные отражатели, активные транспондеры, контрольная станция);
- миры для определения пространственного разрешения, радиометрических, поляризационных характеристик, интерферометрических измерений;
- безэховая камера для периодической поверки метрологических средств;
- измерительное оборудование для пери-

одической поверки характеристик отражателей;

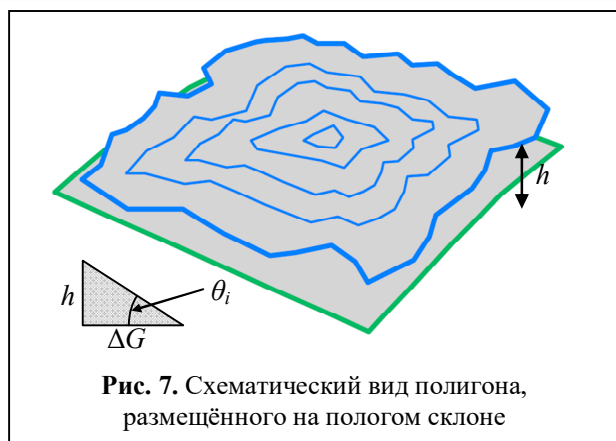
- приборы для предварительного ориентирования ОПУ, юстировки радиолокационных отражателей (РЛО).

Важной задачей при создании радиолокационного подспутникового полигона является выбор места для его размещения. При выборе места размещения полигона или заблаговременного выбора полигона для калибровки конкретного РСА большое внимание следует уделить возможным сценариям калибровки, размерам территории полигона и климатическим ограничениям. Например, рассматривался вариант размещения полигона на Шпицбергене, который обеспечивал бы, благодаря расположению зоны покрытия в полярных широтах, проведение до 34 измерений за цикл. Однако этот вариант был отклонён из-за неблагоприятных климатических условий.

При обустройстве РПП 2, 3 классов следует учесть, что территория полигона должна иметь ограждение и быть охраняемой для предотвращения хищения или повреждения установленного на нём оборудования. На территории РПП не должно быть крупных строений, лесных участков и высокой растительности, линий электропередач. Полигон должен располагаться в долине либо на пологом склоне, отделённом от холмов и гор, являющихся причинами неоднозначности полученного результата калибровки, а также прочих искажающих воздействий. Территория должна быть ровной, перепады высот рельефа должны быть не более 2 м.

При использовании пологого склона требуется учесть следующие параметры:

- уровень подъёма текущей координаты относительно точки отсчёта;
- ожидаемую ошибку по дальности, обусловленную неравномерностью рельефа местности, желательную в виде прогнозируемой регулярной составляющей и гистограммы случайной составляющей смещения от расчётной координаты в горизонтальной системе; при



этом зависимость регулярной составляющей ошибки горизонтальной дальности  $\Delta G$  от угла наклона  $\theta_i$  определяется по формуле:  $\Delta G = h \cdot \text{ctg } \theta_i$  (рис. 7) [11].

Площадки для размещения радиолокационных отражателей, с целью обеспечения стабильно малых значений удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) подстилающей поверхности практически в любую погоду, должны быть забетонированы или заасфальтированы. Если это технически затруднено, то в качестве слабоотражающей поверхности можно использовать сухие ровные поверхности (песчаные или покрытые низкой травой).

УЭПР территории, на которой размещается РПП, должна быть по возможности однородной. Величина УЭПР территории РПП и его окрестностей, попадающих в зону радиолокационной съёмки при проведении калибровочных и валидационных работ, не должна превышать значений минус 25...30 дБ, достаточных для обеспечения требуемого соотношения сигнал/шум откликов от одиночных точечных целей, при углах падения волн 35...55° в течение большей части года [12].

Общая площадь участка РМК должна обеспечивать размещение полного комплекта метрологических средств. При выборе места расположения РПП должны приниматься во внимание, в первую очередь, ландшафтно-климатические особенности территории, поскольку местный климат, характерная растительность и рельеф определяют структуру полигона и состав тестовых объектов.

Уровень влажности почвы подстилающей поверхности оказывает непосредственное влияние на качество получаемых радиолокационных космических изображений, поскольку коэффициент рассеяния становится нестабильным. Исходя из этого, местоположение искусственного тестового полигона следует выбирать с известным постоянным уровнем влажности почвы. Предпочтение должно отдаваться географическим районам с климатом, обеспечивающим всесезонность осуществления наблюдений и измерений, на удалении от техногенных зон.

Для размещения РПП необходимо выбирать участок, позволяющий избегать зон, характеризующихся частыми дождями и снегопадами, в противном случае должно быть предусмотрено соответствующее дополнительное обслуживание. Не менее важно учитывать как среднегодовое количество осадков, так и среднегодовую температуру в области расположения радиолокационного полигона.

При выборе территории для размещения РПП следует избегать ветреных областей, так как в этом случае потребуются предъявлять к радиолокационным метрологическим средствам повышенные требования на устойчивость к ветровым нагрузкам и проведение соответствующих испытаний в специально разработанной камере. Для учёта влияния ветровых нагрузок на радиометрические параметры уголкового отражателя требуется проведение измерений ЭПР и диаграммы обратного рассеяния (ДОР) при скоростях ветрового потока от 0 до 200 км/ч. При испытаниях в аэродинамической камере (рис. 8) уголкового отражателя устанавливается раскрытием по направлению, против или перпендикулярно воздушному потоку.

Все метрологические средства РПП должны иметь паспорт, подтверждающий их аттестацию заводом-изготовителем по метрологическим параметрам. На сам РПП также должен быть оформлен паспорт и сертификат. В паспорте уголкового отражателя должны быть



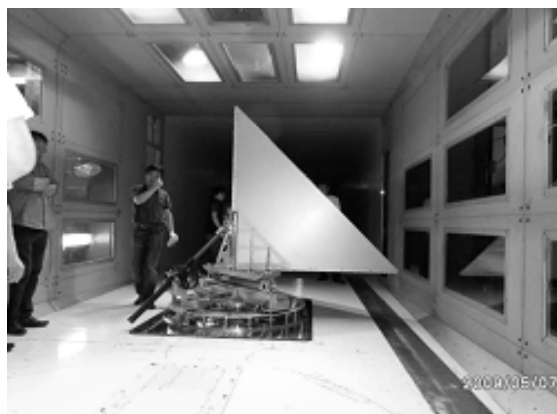
приведены данные измерений его основных характеристик:

- значение ЭПР в максимуме диаграммы обратного рассеяния для горизонтальной и вертикальной поляризации;
- форма главного лепестка ДОР (относительное значение ЭПР для углов отклонения от оси в пределах главного лепестка) для горизонтальной и вертикальной поляризации в рабочих диапазонах частот и температур.

Экспериментальная проверка значения ЭПР отражателей в реальных условиях полигона и ее зависимость от фактических углов наблюдения может проводиться с помощью эталонного авиационного РСА. В результате съёмки с помощью эталонного радиолокатора реперных объектов полигона, а также объектов естественного происхождения, формируется аттестованное (калиброванное) радиолокационное изображение полигона.

Немаловажное значение при выборе места для обустройства РПП имеет наличие инфраструктуры. Вблизи территории полигона должны быть проложены дороги, помещения оборудованы водопроводом и канализацией, инженерными сетями тепло- и энергоснабжения, сетями внутренней и внешней связей. К местам установки активных транспондеров должно быть подведено электропитание. С целью предотвращения заноса снегом РЛЮ транспондеры должны устанавливаться на железобетонных пилонах высотой 1...1,5 м над поверхностью земли. Пилоны должны иметь геодезическую привязку с ошибкой не более 0,1 м.

Для обслуживания полигона и проведения измерений необходимо наличие квалифицированного персонала и обеспечение комфортных условий для его работы. Это особенно важно при обустройстве полигонов 4 и 5 классов, которые являются постоянно действующими и требуют регулярного наблюдения за тестовыми участками и обслуживания тестовых объектов. На этих полигонах проводятся научные исследования, разрабатываются методики описания тестовых участков, а также создаются и уточняются методики калибровки и валидации



**Рис. 8.** Контрольное измерение углового отражателя Корейского Института Аэрокосмических Исследований (KARI) при воздействии ветровых нагрузок

космических средств ДЗЗ и их информационных продуктов.

### Заключение

Таким образом, с учётом планов развития отечественных систем ДЗЗ в радиолокационном диапазоне, создание подспутниковых полигонов для обеспечения лётных испытаний, калибровки и валидации космических систем ДЗЗ становится насущной задачей. Создание полигонов класса РПП1 не требует существенных материальных затрат, таких полигонов должно быть как минимум десять, размещённых на всей территории нашей страны.

Для калибровки и валидации современных отечественных КС РСА необходим радиолокационный подспутниковый полигон не ниже третьего класса, для которого требуется создание базы данных для хранения описаний тестовых участков и снимков полигонов, полученных средствами ДЗЗ в различных диапазонах. При отсутствии радиолокационных подспутниковых полигонов выше третьего класса необходимые тестовые объекты для съёмки в различных диапазонах могут быть размещены на РПП3.

Для снижения затрат по обслуживанию подспутниковых радиолокационных полигонов предлагается совмещать их с подспутниковыми полигонами для калибровки других

средств ДЗЗ (оптических, инфракрасных). В частности, целесообразно рассмотреть возможность предоставления услуг дружественным странам по подтверждению характеристик, калибровке и валидации создаваемых ими космических систем ДЗЗ средствами отечественных радиолокационных подспутниковых полигонов.

### Литература

1. В России разработают новую всепогодную спутниковую систему наблюдения [Электронный ресурс]. РИА Новости. URL: <https://ria.ru/20200626/1573492820.html> (дата обращения 26.09.2024).

2. В «Роскосмосе» назвали сумму, необходимую для реализации проекта «Сфера». [Электронный ресурс]. РИА Новости. URL: <https://ria.ru/20220529/kosmos-1791512141.html> (дата обращения 26.09.2024).

3. *Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Толстов Е.Ф.* и др. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06.2016 г., Муром). Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2016. С. 16–36.

4. *Захаров А.И., Захарова Л.Н., Сорочинский М.В., Синило В.П., Иванычев Е.Е.* Исследование отражательных свойств нефтяных платформ на Каспии как стабильных радиолокационных отражателей по данным радиолокатора PALSAR // V Всероссийские Армандовские чтения: Практическая радиолокация. Материалы Всероссийской научной конференции (Муром, 29.06.–1.07.2015 г.). Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2015. С. 110–114.

5. ГОСТ Р 59476-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса.... М.: Стандар-

тинформ, 2021. 8 с.

6. *Gray R.* External Calibration of Space-borne Microwave Remote Sensing System Sensors // Report CALIB-TN-WP120-001-BRIX. Iss. P4. Ottawa, Canada. 2001. 9 p.

7. *Атрошенко Л.М., Горобец Н.Н., Красногорский М.Г., Малюков В.М.* Опыт создания полигонно-калибровочного комплекса для радиолокатора с синтезированной апертурой космического базирования // Вестник СибГАУ. № 5. 2013. С. 30–32.

8. *Атрошенко Л.М., Горобец Н.Н., Васильев А.Ф., Костриков А.Л., Малюков В.М.* Принципы работы подспутникового испытательного полигона радиолокационного диапазона «Качалинский» // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КРЫМИКО'2019). Севастополь, Крым. 2019. С. 171–172.

9. *Черкашин А.К., Горобец Н.Н., Смирнов С.И., Атрошенко Л.М., Попов М.А., Лялько В.И., Сафронова Л.П., Костяшкин С.И.* Принципы организации и обслуживания международной системы подспутниковых полигонов // Четвёртый Белорусский космический конгресс. Материалы конгресса. Минск, 27–29 октября 2009. Т.2. С. 12–19.

10. *Алексеева А.М., Лепёхина Т.А., Макаров В.П.* Организация и оснащение радиолокационного полигона для калибровки и валидации космических РСА // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли. Материалы XIX научно-технической конференции. М., Зеленоград: 2023. С. 104–111.

11. *Schubert A., Small D., Miranda N.* Geometric Quality Indicators for SAR Products // CEOS SAR Cal/Val Workshop 2010. Zurich, Switzerland (August 25–27, 2010). 38 p.

12. *Grenier C., Barnard I., Arsenault P.* The RADARSAT 2 Synthetic Aperture Radar Phased Array Antenna Performance Analysis Methodology. EMS Technologies // EUSAR 2004, Ulm, Germany. DOI:10.1109/PAST.2003.1256989.

Поступила 9 октября 2024 г.

English

## CREATION AND EQUIPPING OF RADAR SUBSATELLITE PROVING GROUND FOR FLIGHT TESTS, CALIBRATION AND VALIDATION OF SPACE SAR

**Anna Maksimovna Alekseeva** — PhD in Engineering, Lead Engineer of JSC “Radio Engineering Concern Vega”.

E-mail: [asianna@list.ru](mailto:asianna@list.ru)

**Tatyana Alexandrovna Lepekhina** — PhD in Engineering, Head of the Department of JSC “Radio Engineering Concern Vega”.

E-mail: [tatonika@inbox.ru](mailto:tatonika@inbox.ru)

**Vadim Igorevich Nikolaev** — Head of the laboratory of JSC “Radio Engineering Concern Vega”.

E-mail: [vnikolaev65@inbox.ru](mailto:vnikolaev65@inbox.ru)

Address: 121170, Russian Federation, Moscow, Kutuzovsky Prospekt, 34.

**Abstract:** Scientific research is underway to create air- and space-borne radar complexes for use as part of the geosynchronous space radar surveillance system GEOSAR, as well as a multi-band radar complex for Earth observation in the X, L and P bands and the SAR grouping on small spacecraft within the framework of the “Sphere” project. For flight tests of space radars, their calibration and validation, especially in cases of high and ultra-high resolution, as well as during the operation of all these complexes, the creation of radar subsatellite test ground becomes relevant. The list of the main SAR and space complexes tactical and technical characteristics, which must be confirmed during flight tests and monitored during operation, is considered. Based on the analysis of technical characteristics and operational experience of known proving grounds, the concept of construction and composition of reference subsatellite proving grounds (RSPG) has been developed. It is proposed to divide all types of proving grounds, depending on the tasks to be solved, into 5 classes. It is noted that the main metrologically provided RSPG tools should be a set of evaluation devices in the form of passive corner reflectors, active reflectors and transponders. In addition, RPPS of grades 4-5 operating all year round should have meteorological and ion stations to control the conditions of radio waves propagation and ground-penetrating radars to control humidity and reflectivity of the site. The requirements for the accuracy of the assessment of the main parameters of the radar using ground-based calibration tools are given. The maintenance of RSPG of grades 4 and 5 is carried out by qualified personnel who regularly monitor test sites and facilities, conduct scientific research, develop methods for calibration and validation of remote sensing space assets and their information products. Based on the analysis of the characteristics of modern and projected domestic space systems with SAR, it was concluded that a radar subsatellite test ground of at least the third class is needed.

**Keywords:** synthetic aperture radar (SAR), calibration, validation, subsatellite proving ground, corner reflector, transponder, radar test mirror.

#### References

1. Russia will develop a new all-weather satellite surveillance system [Electronic source]. RIA Novosti. URL: <https://ria.ru/20200626/1573492820.html> (access date 26.09.2024).
2. Roscosmos named the amount needed to implement the project “Sphere”. [Electronic source]. RIA Novosti. URL: <https://ria.ru/20220529/kosmos-1791512141.html> (access date 26.09.2024).
3. Babokin M.I., Efimov A.V., Zaitsev S.E., Tolstov E.F. et al. Results and lessons of flight tests of the SAR of the small spacecraft “Kondor-E”. VI All-Russian Armand readings: Radiophysical methods in remote sensing of environment: VII All-Russian Scientific Conference (31.05–2.06.2016, Murom). Murom, PPC MI VISU, 2016. Pp. 16–36.
4. Zakharov A.I., Zakharova L.N., Sorochinsky M.V., Sinilo V.P., Ivanychev E.E. Investigation of the reflective properties of oil platforms in the Caspian Sea as stable radar reflectors according to PALSAR radar data. V All-Russian Armand readings: Practical radar. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference (Murom, 06.29.2015). Murom: PPC MI VISU, 2015. Pp. 110–114.
5. GOST R 59476-2021 Remote sensing data of the Earth from space. Quality of remote sensing data of the Earth from space. List of quality indicators for remote sensing data of the Earth from space obtained from radar observation satellites. Moscow: Standartinform, 2021. 8 c.
6. Gray R. External Calibration of Space-borne Microwave Remote Sensing System Sensors. Report CALIB-TN-WP120-001-BRIX. Iss. P4. Ottawa, Canada. 2001. 9 p.
7. Atroshenko L.M., Gorobec N.N., Krasnogorskiy M.G., Malukov V.M. Experience of creation of the ground calibration polygon complex for the space synthetic aperture radar testing. Bulletin of the SibSAU. No. 5. 2013. Pp. 30–32.
8. Atroshenko L.M., Gorobets N.N., Vasiliev A.F., Kostrikov A.L., Malyukov V.M. Principles of operation of the subsatellite test site of the Kachalinsky radar range. Microwave technology and telecommunication technologies (KRYMIKO'2019). Sevastopol, Crimea. 2019. Pp. 171–172.
9. Cherkashin A.K., Gorobets N.N., Smirnov S.I., et al. Principles of organization and maintenance of the international system of subsatellite polygons. The Fourth Belarusian Space Congress. Materials of the Congress. Minsk, October 27-29, 2009. Minsk. Vol. 2. Pp. 12–19.
10. Alekseeva A.M., Lepekhina T.A., Makarov V.P. Organization and equipment of a radar range for calibration and validation of space radars. Systems of observation, monitoring and remote sensing of the Earth. Materials of the XIX scientific and technical conference. Moscow, Zelenograd: 2023. Pp. 104–111.
11. Schubert A., Small D., Miranda N. Geometric Quality Indicators for SAR Products. CEOS SAR Cal/Val Workshop 2010. Zurich, Switzerland (August 25–27, 2010). 38 p.
12. Grenier C., Barnard I., Arsenault P. The RADARSAT 2 Synthetic Aperture Radar Phased Array Antenna Performance Analysis Methodology. EMS Technologies. EUSAR 2004, Ulm, Germany. DOI:10.1109/PAST.2003.1256989.