

Возможности мобильного испытательного комплекса для сквозного контроля качества космических РСА

Т.А. Лепёхина¹, В.И. Николаев¹, Е.Ф. Толстов²

¹АО «Концерн «Вега»: 121170, Москва, Кутузовский проспект, д.34; e-mail: tatonika@inbox.ru

²ЗАО «АЭРОКООН», г. Жуковский, МО, ул. Гагарина д.1, e-mail: e_tolstov@mail.ru

Рассматривается возможность и актуальность создания аппаратного комплекса в мобильном контейнерном варианте для испытаний, калибровки валидации космических РСА. Комплекс содержит многодиапазонную активную контрольную станцию для взаимодействия с различными РСА, легко транспортируется и не требует специальной подготовки территории для развёртывания. Предлагается дополнить стационарные радиомишенные полигоны группой мобильных комплексов для повышения оперативности проведения испытаний и калибровки.

A fast deployable shelter-based station for spaceborne SAR calibration, validation and flight tests is introduced. The equipment contains a multi-range wideband active transceiver, supporting most of currently used and perspective SAR's. The station can be easily transported and doesn't require any special site preparation. A set of moving test stations is considered as a complement to stationary test ranges to provide more efficient calibration and validation procedures.

Привлечение космических средств дистанционного зондирования Земли, в том числе радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), к решению научных и народнохозяйственных задач основано на их использовании в качестве измерительных приборов, позволяющих исследовать физические свойства земной поверхности и объектов на ней. Для эффективной эксплуатации космических аппаратов, обеспечения достоверности измерений и полноценного использования полученной информации в практических целях необходима калибровка измерительных средств и валидация комплексов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Несмотря на то, что работы по созданию радиолокационного полигона для калибровки и валидации космических РСА неоднократно инициировались и возобновлялись «Роскосмосом» в течение последних 10 лет, действующего полигона, оснащенного метрологически поверенными измерительными средствами, в России до сих пор нет. Тем не менее, в ходе этих работ проведены теоретические и конструкторские исследования по определению состава и требований к характеристикам измерительных средств, в том числе показана возможность и необходимость дооборудования полигона активной контрольной станцией [1]. В частности, имеется ряд задач, решение которых с помощью пассивных отражателей или естественных целей затруднено или невозможно. К таким задачам можно отнести: а) селекцию и формирование сигналов с требуемой поляризацией, в том числе с поляризацией возвращённой волны, отличающейся от падающей; б) имитацию точечных целей с большими и малыми значениями эффективной площади рассеивания (ЭПР), имеющих при этом равномерную диаграмму рассеяния в широком диапазоне углов при небольших собственных размерах, что необходимо, например, для отработки бистатических РСА; в) регулировку ЭПР имитируемых целей; г) имитацию сложных целей.

Учитывая необходимость использования наземных метрологических средств для лётных испытаний и калибровки космических РСА при текущем состоянии работ по строительству отечественных радиомишенных полигонов, авторы рассматривают возможность создания испытательного комплекса с активной контрольной станцией не

в стационарном варианте, привязанном территориально к полигону и зависящем от его инфраструктуры, а в контейнерном исполнении с возможностью оперативной транспортировки к месту развёртывания. Данное техническое решение при наличии нескольких мобильных комплексов позволит: а) выбирать места для развёртывания наземных испытательных средств в соответствии с расположением планируемых зон обзора, связанных с витками орбиты действующего или вновь запущенного спутника, и с учётом прогнозируемых погодных условий; б) обеспечивать подготовку к лётным испытаниям в короткие сроки, без производства строительных работ; в) опытным путём подтверждать правильность выбора территорий для размещения в дальнейшем стационарных радиолокационных полигонов.

Испытательный комплекс представляет собой комплект оборудования для приёма, передачи, ретрансляции радиолокационных сигналов в требуемых диапазонах частот на линейных поляризациях, дополненный вычислительными средствами для подготовки и обработки данных. Состав мобильного испытательного комплекса (МИК) иллюстрируется структурной схемой, приведенной на рис. 1.

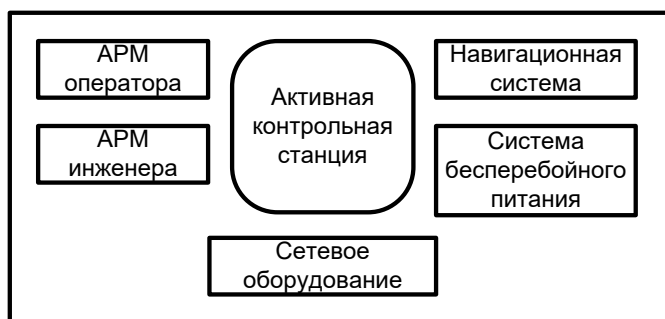


Рис. 1. Структурная схема мобильного испытательного комплекса

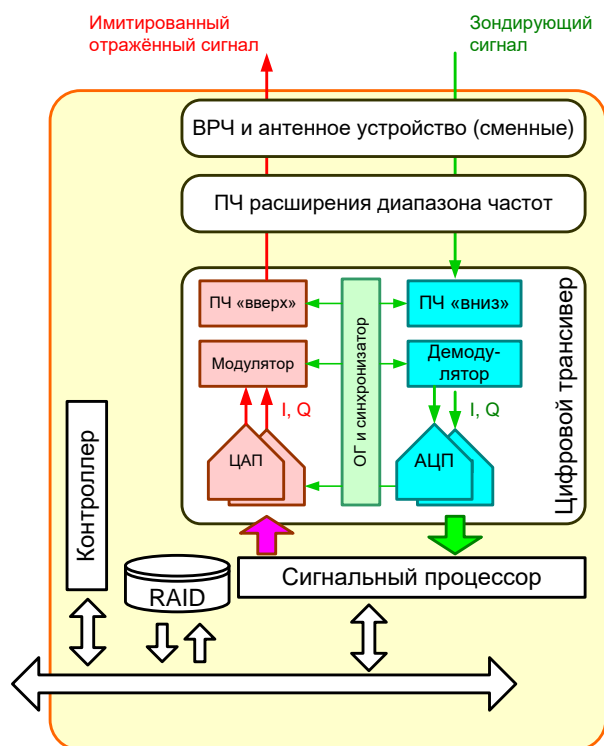


Рис. 2. Структурная схема активной контрольной станции

Всё оборудование размещается в транспортируемом контейнере, оснащённом системой бесперебойного электропитания, средствами горизонтирования и геопозиционирования, а также системой климат-контроля и рабочими местами операторов.

Основным функциональным элементом комплекса является активная контрольная станция (АКС), являющаяся усовершенствованным вариантом активного транспондера [2, 3]. В отличие от существующих активных транспондеров, разработанных и используемых за рубежом для радиометрической калибровки РСА Radarsat, Sentinel, TerraSAR-X, предлагаемая АКС позволяет имитировать не только одиночные точечные цели, но и сложные фоно-целевые обстановки, что обеспечивается преобразованием данных принимаемого сигнала в режиме реального времени с помощью сигнального процессора на базе ПЛИС. Центральным элементом АКС является цифровой трансивер, осуществляющий приём, передачу и цифровую обработку сигналов в диапазоне до 6 ГГц. Учитывая, что многие действующие и большинство перспективных космических РСА являются многодиапазонными, АКС комплектуется переносчиком частот, позволяющим расширить рабочий диапазон до 40 ГГц.

Для измерения сквозных характеристик РСА активная контрольная станция формирует испытательное воздействие, представляющее собой имитацию отражения зондирующего сигнала от фоно-целевой обстановки с известными (калиброванными) характеристиками. На практике часто применяется имитация одиночной точечной цели с заданной ЭПР, для чего зондирующий сигнал принимается активным транспондером и переизлучается с некоторой задержкой в обратном направлении на той же частоте с исходной или ортогональной поляризацией. Регулировка кажущейся ЭПР имитируемой точечной цели осуществляется путём подстройки сквозного коэффициента усиления транспондера с помощью прецизионного аттенуатора.

В рассматриваемой АКС, структурная схема которой приведена на рис. 2, ретрансляция сигналов осуществляется с использованием цифрового трансивера. Сигнал, поступающий на вход приёмника, переносится на промежуточную частоту и с помощью квадратурного демодулятора преобразуется в видеосигналы синфазного и квадратурного каналов, а затем с помощью 14-разрядных АЦП в поток отсчётов видеосигнала, представляемых в комплексной форме. Поток данных записывается в буфер типа FIFO заданной длины, определяющей задержку, и воспроизводится с помощью генератора сигнала произвольной формы, по своей структуре идентичного приёмному каналу трансивера.

В составе цифрового трансивера имеется сигнальный процессор на базе ПЛИС, позволяющий решать ряд задач, связанных с обработкой данных ретранслируемого сигнала в режиме реального времени. Простейшей из них является компенсация неравномерностей комплексного коэффициента передачи антенного и приёмно-усилительного тракта, достигаемая применением цифрового фильтра с характеристикой, формируемой по результатам калибровки. Аналогичным способом может формироваться имитация отражения зондирующего сигнала от групповых и других сложных целей, а также движущихся целей. При этом учитывается, что отражение каждого импульса зондирующего сигнала РСА от поверхности или трёхмерного объекта образуется как суперпозиция отражений от множества элементов, поступающих на вход приёмника с различными амплитудами, фазами и задержками. Процесс формирования суперпозиции математически может быть представлен в виде свёртки комплексной огибающей зондирующего сигнала с некоторой импульсной характеристикой цифрового фильтра, индивидуальной для каждого импульса в сеансе.

При этом для космического РСА, движение носителя которого не подвержено атмосферным возмущениям, в режиме реального времени должно выполняться только

вычисление свёртки зондирующего сигнала с предварительно рассчитанными импульсными характеристиками. Расчёт матрицы импульсных характеристик выполняется путём преобразования модели фоно-целевой обстановки, задаваемой как функция комплексного коэффициента обратного рассеяния $\dot{s}(x, r) = \sqrt{\sigma_0(x, r)} \cdot e^{i\varphi(x, r)}$ от радиолокационных координат наклонной дальности r и путевой дальности x , по алгоритму, обратного сжатию по азимуту [4].

Таким образом, возможности имитации сложных целей (их размеры и количество составляющих цель элементов) с формированием отраженного сигнала в режиме реального времени ограничиваются размерностью матрицы импульсных характеристик и производительностью сигнального процессора, которая может быть определена только экспериментально. Тем не менее, при работе с космическими РСА имеется возможность имитации более сложных фоно-целевых обстановок в разомкнутом режиме: данные имитированного отражённого сигнала также формируются предварительно по известным данным зондирующего сигнала и расчётным параметрам траектории носителя, а имитированный сигнал воспроизводится из этого массива синхронно с приёмом реального зондирующего сигнала от спутника. Реализация этого режима возможна благодаря наличию в АКС накопителя цифровой информации (RAID-массива) с высокоскоростным интерфейсом, а также наличию в цифровом трансивере высокоскоростного информационного интерфейса, позволяющего в режиме прямого доступа к памяти организовать воспроизведение и запись широкополосных сигналов в режиме стриминга в течение длительного времени, ограниченного лишь ёмкостью накопителя и размером хранящегося в нём массива. Режим стриминга для записи и воспроизведения сигналов с шириной спектра до 200 МГц, а в ближайшей перспективе – до 1 ГГц реализован в аппаратуре АКС впервые и является её отличительной особенностью.

Для имитации радиомишеней в разомкнутом режиме, т.е. с заменой ретрансляции зондирующего сигнала воспроизведением имитированного отражённого сигнала из заранее подготовленного массива данных, необходимо обеспечить стабилизацию задержки и разности начальных фаз принимаемых и воспроизводимых импульсов в течение всего сеанса съёмки (времени синтеза апертуры). Для получения изображения имитированной радиомишени с качеством, достаточным для определения сквозных характеристик РСА по результатам его анализа, дискретность установки задержки должна составлять 5...10% периода дискретизации сигнала, а начальной фазы – не более $1,4^\circ$. Серийная аппаратура, использованная в качестве базовой для построения АКС, не содержит технических средств для прецизионной подстройки задержки и начальной фазы каждого импульса. В работе [5] предложен вариант построения АКС, в которой данная задача решается с помощью дополнительных аналоговых элементов – линии задержки и фазовращателя, включаемых в цепи опорного и тактового сигналов в передающем тракте. Для управления этими органами подстройки должна использоваться информация, получаемая в результате корреляционного сжатия каждого принятого импульса зондирующего сигнала в режиме реального времени. В проектируемом комплексе предлагается заменить аналоговую подстройку задержки и фазы цифровой коррекцией данных каждого импульса. Для этого вычисляется свёртка комплексной огибающей модели отражённого импульса с импульсной характеристикой КИХ-фильтра, выбранной для рассчитанной задержки и фазы из предварительно построенной таблицы.

Ниже приведены примеры фоно-целевых обстановок, которые предполагается моделировать с помощью АКС в качестве испытательных воздействий для измерения сквозных характеристик космических РСА.

Одиночные точечные цели и составленные из них фигуры используются для измерения пространственной разрешающей способности по ширине функции отклика, величины боковых лепестков функции отклик, а также поляризационных характеристик. Кроме этого, имитированные точечные цели с прецизионной установкой кажущейся ЭПР используются для радиометрической калибровки РСА и для измерения диаграммы направленности антенны.

Поверхностно-распределённые цели и составленные из них градационные миры с заданными перепадами удельной ЭПР необходимы для экспериментального определения радиометрической разрешающей способности РСА. При этом создание таких радиомишеней натурным способом является пока не решённой технической задачей, но разработана методика их имитации с помощью активной контрольной станции [6].

Модели объектов с известными радиопортретами, которые должны распознаваться бортовыми средствами вторичной обработки радиолокационной информации, необходимы для проведения испытаний с повторяющимися условиями эксперимента и статистической обработкой полученных результатов.

На различных этапах испытаний космического РСА предлагается следующий порядок использования комплекса.

До запуска космического аппарата с РЛС на наземном полигоне проводится предполётная проверка сквозных характеристик РСА. При этом тестовые радиомишени и отражённые от них сигналы имитируются в соответствии с расчётным режимом съёмки и законом движения носителя. Кроме этого, может быть проведена автономная проверка качества зондирующего сигнала и приёмного тракта путём синтеза аппаратной функции отклика по методикам, применяемым на наземных испытаниях [7]. Обработка радиоголограмм и анализ синтезированного изображения выполняется средствами специализированного программного обеспечения на ПЭВМ автоматизированного места инженера, входящего в состав комплекса [8].

Целесообразно применение МИК при проведении лётных испытаний для формирования испытательных воздействий, аналогичных использованным при наземных испытаниях для оценки характеристик РСА по единым методикам. Если задача обработки тестовой цифровой радиоголограмме (ЦРГ) и проведение анализа полученных изображений будет возложена на МИК, то для её решения в составе комплекса имеются необходимые вычислительные средства и специальное программное обеспечение, но при этом необходима организация линии связи для приёма ЦРГ от наземного пункта. МИК может формировать испытательные воздействия для проверки пространственного разрешения, радиометрической разрешающей способности, радиометрической чувствительности, динамического диапазона.

После запуска спутника предполагается использовать МИК для выполнения функций, необходимых как на подготовительных этапах, так и в течение штатной эксплуатации.

Возможность имитации дискретных целей с прецизионной регулировкой кажущейся ЭПР (до 0,1 дБ) средствами АКС используется для радиометрической калибровки РСА по абсолютному значению. В частности, после предварительного определения относительного коэффициента радиометрической коррекции, связанного с диаграммой направленности антенны по углу места, которое обычно выполняется путём съёмки территории лесов бассейна Амазонки, выполняется уточнённое определение абсолютного значения коэффициента путём съёмки точечной цели с калиброванной ЭПР, имитируемой с помощью АКС.

Уменьшение ошибки радиометрической калибровки РСА достигается следующими путями: а) проведением предварительной калибровки сквозного коэффициента усиления ретранслятора АКС с использованием образцового пассивного отражателя [3]; б) применением средств обогрева и осушения антенно-волноводного тракта для улучшения стабильности его характеристик; в) подавлением отклика от подстилающей поверхности путём бинарного (знакового) кодирования последовательности импульсов ретранслируемого сигнала и соответствующей коррекции радиоголограммы при сжатии [2].

В дальнейшем при штатной эксплуатации космического РСА точность измерения коэффициента обратного рассеяния наземных объектов по радиояркости полученного изображения может быть повышена путём проведения радиометрической калибровки непосредственно перед сеансами съёмки, что возможно при наличии группы мобильных испытательных комплексов, развёртываемых в нескольких часовых поясах. При этом работа МИК в нескольких диапазонах частот и полосе до 1 ГГц обеспечивает взаимодействие с большинством действующих и перспективных космических РСА, что делает создаваемую сеть станций универсальной.

Таким образом, создание мобильного комплекса является важной и актуальной задачей для повышения качества выходного продукта космических РСА ДЗЗ, подтверждения возможности использования космического РСА для выполнения требуемого класса задач.

Расширение практики применения активных имитаторов тестовых радиомишеней для лётных испытаний, калибровки и валидации космических РСА должно повлечь за собой совершенствование методик испытаний и их стандартизацию, что является шагом к созданию единой методической системы наземной и лётной отработки РСА с позиций системного подхода.

Литература

1. Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Семенов М.А., Чарыков И.В., Чикачёв В.С. Оборудование радиолокационного полигона для калибровки и валидации космических РСА // Зондирование земных покровов радарными и радиометрами с синтезированной апертурой: Материалы международной научной конференции. Вестник СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнёва. Спец. выпуск 5 (51). – Красноярск: СибГАУ, 2013. – С.26-30.
2. Richard J., Dumper K., Heliere F., Buck C. An innovative calibration concept for space SAR using an active antenna with improved efficiency, reliability and radiometric accuracy // Proc. of EUSAR'2006. May 16-18, 2006. Dresden, Germany, 2006.
3. Döring B.J., Looser P., Jirousek M., Schwerdt M., Peichl M. Highly Accurate Calibration Target for Multiple Mode SAR Systems // Proc. of EUSAR 2010. Aachen, Germany, 2010. – P.1114.
4. Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Алгоритм цифровой имитации траекторных сигналов для испытаний радиолокаторов с синтезированной апертурой высокого разрешения // Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2013 / 15-я Международная конференция. – М.: РНТОРЭС им. А.С.Попова, 2013. – С.418-422.
5. Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Вопросы синхронизации активного имитатора радиомишеней для испытаний радиолокаторов с синтезированной апертурой // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем-2016. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2016. Часть 1. – С.236-239.
6. Захаров В.Д., Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Толстов Е.Ф., Четверик В.Н. Аппаратно-программная реализация методов контроля радиометрических

характеристик космических РСА // Вопросы радиоэлектроники. Сер. СОИУ. 2012. – Вып. 2. – С.182-196.

7. Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Системный подход к разработке единых методик наземных и летных испытаний космических РСА // X Научные чтения, посвященные памяти Н.Е. Жуковского / Материалы всероссийской научно-технической конференции / Сборник докладов. – М.: Издательский дом Академии им. Н.Е. Жуковского, 2013. – С.452-457.

8. Баталов А.А., Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Семенов М.А. Программно-математическое обеспечение для оценки показателей качества радиолокаторов с синтезированной апертурой // II Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред / Материалы V Всероссийской научной конференции (Муром, 26-28 июня 2012 г.) – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2012. – С.471-475.