

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - Муром 2020

Активный транспондер с функцией имитации сложных и поверхностно-распределённых целей для испытаний, калибровки и валидации космических РСА на различных этапах их жизненного цикла

А.М. Алексеева, Т.А. Лепёхина, В.И. Николаев, Л.В. Недро, И.В. Чарыков, В.С. Чикачёв

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

Повышение требований к современным РСА приводит к усложнению как самих радиолокаторов, так и средств контроля их параметров. Активный транспондер предназначен для проверки сквозных характеристик РСА на различных этапах жизненного цикла, начиная с самых ранних и включая штатную эксплуатацию, по единым методикам. В работе приведено описание активного транспондера, который представляет собой устройство для преобразования зондирующих сигналов радиолокаторов с синтезированной апертурой в имитированные отраженные. Отличительной особенностью представленного активного транспондера является возможность имитации точечных, пространственно распределенных целей и произвольных фоно-целевых обстановок для решения задач калибровки и валидации.

Increasing requirements and SAR develops leads to a complication of both the radars and the means of their parameters monitoring. The active transponder is designed to check SARs through characteristics at various phases of the life cycle, starting from the earliest design stage and including operation and maintenance, using the same methods. The paper describes the active transponder, which is a device for converting sounding signals of synthesized aperture radars into simulated reflected ones. A distinctive feature of the presented active transponder is the ability to simulate point and spatially distributed targets for solving SAR calibration and validation problems.

Актуальность

Расширение круга задач, решаемых с помощью РСА, в направлении контроля состояния и исследования свойств наземных объектов через связанные с ними электродинамические характеристики даёт основания предъявлять к РСА требования как к измерительной системе с верифицируемыми и калибруемыми параметрами. Важной задачей является измерение удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) пространственно-распределённых объектов, в частности, определение границы раздела сред с разной УЭПР, таких как вода и лед, влажная и сухая почва, здоровые и повреждённые болезнями, вредителями сельскохозяйственные и лесные угодья [1].

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 активными транспондерами, в России до сих пор нет, что обусловлено, с одной стороны, малым числом функционирующих космических РСА, а с другой – отсутствием в нашей стране активных транспондеров и стандартизированных и унифицированных методик

Каждый год на орбиту выводится около 10 спутников дистанционного зондирования Земли, оснащенных радиолокаторами с синтезированной апертурой, и к настоящему моменту на орбите функционирует более 40 радиолокаторов X, C, S, L, P диапазонов.

Библиографический обзор таких систем РСА, как ENVISAT ASAR, RadarSAT-2, ALOS/PALSAR, TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed, GMES Sentinel-1 и TerraSAR-L, показал, что для внешней калибровки всех этих РСА используются активные транспондеры [2-4].

В настоящее время в России разрабатываются и проходят наземные испытания радиолокаторы с синтезированной апертурой Обзор-Р, Аракс-Р, Кондор ФКА, планируются работы по созданию РСА Кондор ФКА-М с гибридной зеркальной антенной. Эти РСА работают в X и S диапазонах, полоса зондирующего сигнала не превышает 600 МГц. В нашей стране ведутся научно-исследовательские работы по созданию бортовых

радиолокационных комплексов для использования в составе геосинхронной космической системы радиолокационного наблюдения ГЕОСАР, а также многодиапазонного радиолокационного комплекса наблюдения Земли в X, L и P диапазонах и группировки из 23 РСА X-диапазона на малых космических аппаратах в рамках проекта «Сфера».

Так как полигоны, оснащенные современным метрологическим оборудованием, и методики испытаний должны быть созданы, введены в эксплуатацию и готовы к работе до начала запуска космических РСА, разработка активных транспондеров становится важной и актуальной задачей [5, 6].

Назначение и технические характеристики активного транспондера

Предлагаемый активный транспондер (АТ) предназначен для лётных и наземных испытаний, калибровки и валидации радиолокаторов с синтезированной апертурой и представляет собой устройство для преобразования зондирующих сигналов РСА в имитированные отражения этих зондирующих сигналов от наземных объектов и участков земной поверхности с заданными характеристиками обратного рассеяния, составляющих фоно-целевые обстановки требуемых конфигураций, с учётом закона движения носителя и параметров режима съёмки.

Отличительной особенностью транспондера является возможность его использования на этапах разработки составных частей РСА, при этом при испытаниях приёмно-передающей аппаратуры могут проводиться как сквозные проверки, так и отдельно приёмного и передающего трактов.

Функцией активного транспондера как испытательного является формирование и подача на РСА входных воздействий с калиброванными характеристиками. Входным воздействием в данном случае является закон преобразования зондирующего сигнала в отражённый сигнал, определяемый совокупностью характеристик обратного рассеяния наземных объектов, их формы и взаимного расположения, закона движения носителя и параметров режима съёмки.

Имеется ряд задач, связанных с лётными испытаниями и внешней калибровкой РСА, решение которых с помощью пассивных отражателей или естественных целей затруднено или невозможно. К таким задачам можно отнести: селекцию и формирование сигналов с требуемой поляризацией, в том числе с поляризацией возвращённой волны, отличающейся от падающей; имитацию точечных целей с большими и малыми значениями ЭПР, имеющих при этом равномерную диаграмму рассеяния в широком диапазоне углов при небольших собственных размерах, что необходимо, например, для отработки бистатических РСА; регулировку ЭПР имитируемых целей; имитацию сложных и поверхностно-распределённых целей.

Для выполнения перечисленных выше задач АТ должен выполнять следующие функции:

- приём зондирующего сигнала, его демодуляцию и преобразование в поток цифровых данных;
- преобразование цифровых данных принимаемого радиолокационного сигнала в цифровую модель отражённого сигнала, соответствующего моделируемой композиции радиомишеней и фона, в режиме реального времени;
- запись потока цифровых данных комплексной огибающей принимаемого сигнала на твердотельный накопитель в режиме стриминга;
- чтение массивов цифровых моделей отражённых радиолокационных сигналов с твердотельного накопителя и воспроизведение соответствующих сигналов в режиме стриминга на несущих или промежуточных частотах для наземных испытаний.

Для испытаний РСА, обладающих поляриметрическими режимами, приём и передача сигналов может осуществляться на выбранных линейных поляризациях.

Ниже приведены характеристики АТ, рассчитанные для РСА X-диапазона с шириной полосы частот зондирующего сигнала, не превышающей 1 ГГц.

Таблица 1 – Характеристики активного транспондера

Параметр	Значение
Диапазон рабочих частот	X
Ширина полосы частот	1000 МГц
Добротность приёмной системы, не менее	-5 дБ(К ⁻¹)
Минимальное отношение сигнал/шум при приёме зондирующего сигнала	40 дБ
Разрядность АЦП, не менее	14
Динамический диапазон принимаемых зондирующих сигналов	40 дБ
Частота выборок АЦП и ЦАП	1250 МГц
Скорость цифрового потока АЦП	5 ГБ/с
Разрядность ЦАП, не менее	16
Динамический диапазон переизлучаемого сигнала при фиксированном коэффициенте усиления	40 дБ
Диапазон программной регулировки коэффициента усиления	60 дБ

Добротность (параметр качества) приёмной системы определяется из условия, чтобы отношение сигнал/шум при ретрансляции составляло не менее 40 дБ. Необходимое отношение сигнал/шум определяется по формуле

$$Q_{PTP} = \frac{P_{\text{имп}} G_{PL} \cdot \lambda^2 \cdot G_{AO}}{(4\pi)^2 R^2 \cdot k T_{AO} \Delta f_{AO}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{имп}} G_{PL}$ – эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) антенной системы РСА, минимальное значение которой во всех режимах работы, включая электронное перенацеливание (если используется АФАР или гибридная антенна), программное расширение луча и допустимую нестабильность,

R – наклонная дальность, для РСА с орбитой 650 км принимающая значения от 725 до 1290 км во всех режимах съёмки,

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц} \cdot \text{К}} \text{ – постоянная Больцмана,}$$

Δf_{AO} – эффективная шумовая полоса частот радиотракта активного транспондера, оцениваемая как 1250 МГц

G_{AO}/T_{AO} – добротность (параметр качества) приёмной системы активного транспондера, определяемая, главным образом, коэффициентом усиления приёмной антенны и суммарной шумовой температурой антенны, направленной в небо, и малошумящего усилителя (МШУ) приёмного тракта.

Чтобы обеспечить минимальное значение $Q_{PTP} = 40$ дБ при любых условиях съёмки, минимальное значение добротности $\left(G_{AO}/T_{AO}\right)_{\text{min}} = Q_{PTP.\text{min}} \cdot \frac{(4\pi)^2 R_{\text{max}}^2 \cdot k \Delta f_{AO}}{(P_{\text{имп}} G_{PL})_{\text{min}} \cdot \lambda^2}$ должно быть не менее $0,3 \text{ К}^{-1}$, или минус 5 дБ/К.

Шумовая температура МШУ с волноводным вентилем на входе, по результатам испытаний макета, составляет около 100 К. Если, для оценки, ограничить шумовую температуру широконаправленной антенны также величиной 100 К, то минимальный коэффициент усиления антенны должен составлять $G = 60$ единиц, или 18 дБ. При несущей

частоте сигнала $f_0 = 9,5 \cdot 10^9$ Гц и КИП антенной системы не менее $\nu = 0,5$ диаметр приемной антенны, рассчитываемый по формуле $d = \frac{c}{\pi f_0} \sqrt{\frac{G}{\nu}}$, должен быть не менее 0,11 м. Таким образом, в качестве приёмной может быть использована рупорная антенна [7].

Требуемые параметры передающего тракта (диапазон регулировки ЭИИМ и динамический диапазон) задаются исходя из следующих данных:

- максимальной и минимальной ЭПР имитируемой одиночной точечной цели;
- суммарной ЭПР группы имитируемых точечных целей;
- интегральной ЭПР имитируемых распределённых целей;
- динамического диапазона ЭПР или УЭПР имитируемых групповых или распределённых целей.

Если имитируемая сложная цель имеет интегральную ЭПР $\sigma_{инт}$, то ЭИИМ переизлучаемого в обратном направлении сигнала рассчитывается по формуле

$$(P \cdot G)_{обр} = \sigma_{инт} \cdot \frac{(P \cdot G)_{зонд}}{4\pi r_n^2}. \quad (2)$$

Предварительное усиление принимаемых сигналов и усиление имитированного отражённого сигнала осуществляется внешним радиочастотным устройством (ВРЧ), размещаемым в непосредственной близости от антенной системы. Мощность передатчика задаётся из расчёта, что максимальная ЭПР имитируемой точечной цели σ должна достигать 106 м2. При минимальной наклонной дальности r_n 720 км и ЭИИМ зондирующего сигнала $(P \cdot G)_{зонд} = 88$ дБВт переизлучаемый в обратном направлении сигнал должен иметь ЭИИМ $(P \cdot G)_{обр} = \sigma \cdot \frac{(P \cdot G)_{зонд}}{4\pi r_n^2}$ не менее 20 дБВт. Если в качестве передающей и приёмной используются одинаковые антенны с коэффициентом усиления 18 дБ, то мощность на выходе передатчика в линейном режиме должна быть, соответственно, не менее 2 Вт.

По опыту зарубежных разработок, в составе устройств, аналогичных активных транспондеров, применялись одна или две антенны (обычно рупорные). В одной из реализаций активного транспондера для РСА Sentinel предложен вариант устройства с совмещённой приёмо-передающей антенной. Одним из преимуществ этого варианта является уменьшение погрешности калибровки самого транспондера. На основании вышеизложенного был выбран состав активного транспондера [8-13].

Состав и описание режимы работы активного транспондера

Активный транспондер содержит антенную систему, переносчики частот, цифровой приёмопередатчик и специализированный сигнальный процессор, а также накопитель цифровой информации – твердотельный RAID-массив.

Состав активного транспондера иллюстрируется схемами, приведенными на рисунках 1 и 2, где представлены следующие подсистемы:

- антенное устройство с управляемым опорно-поворотным устройством (ОПУ);
- внешнее радиочастотное устройство (ВРЧ);
- устройство имитации и регистрации сигналов (УИРС);
- автоматизированное рабочее место оператора (АРМ) [14].

Приём и генерация сигналов с произвольной формой модуляции и шириной спектра до 1 ГГц осуществляется средствами цифрового векторного приёмо-передающего модуля (цифрового трансивера). Каналы приёма и передачи имеют сходную структуру и содержат соответственно пары аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей синфазного

и квадратурного каналов, квадратурный детектор и векторный модулятор, а также синтезаторы опорных частот [15].

Входные и выходные данные преобразуемых сигналов при максимальной ширине спектра поступают в виде потока парных двухбайтных отсчётов с частотой 1,25 Гвыб/с.

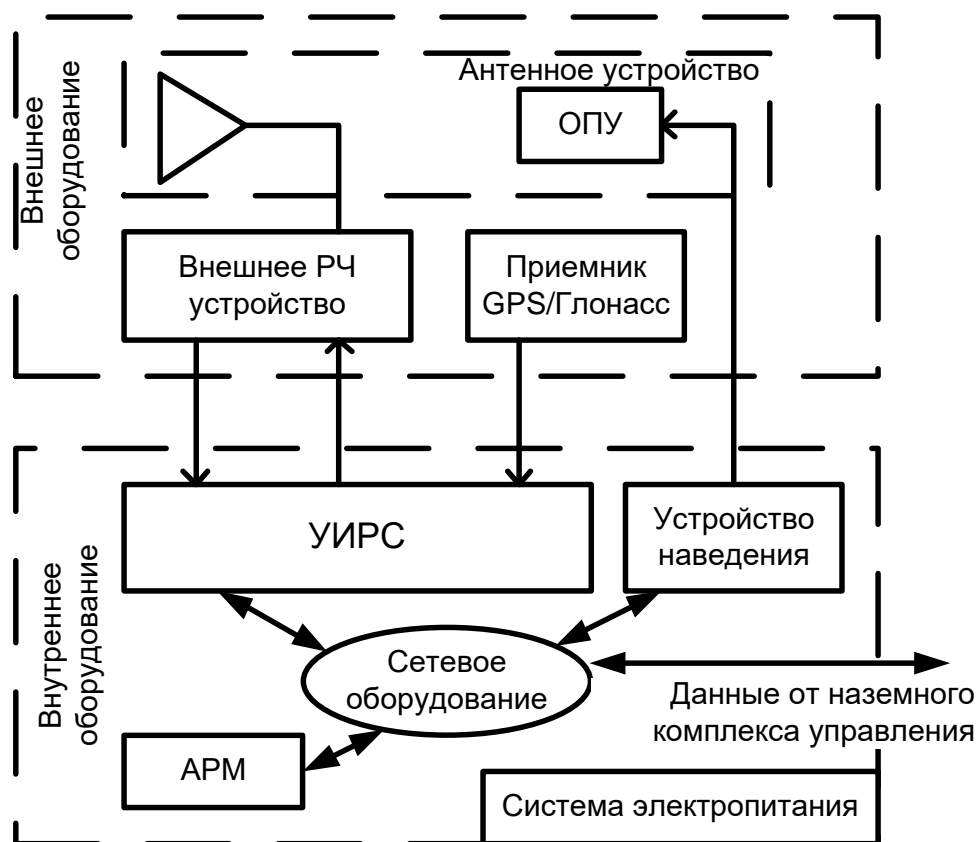


Рис 1. – Структурная схема активного транспондера для испытаний РСА

Приёмо-передающий модуль обеспечивает приём и генерацию сигналов на промежуточной частоте. Для работы в X-диапазоне может быть использован широкополосный переносчик частот, выполненный по схеме с верхней настройкой гетеродина. Схема с двойным переносом при преобразовании частоты «вверх» обеспечит подавление зеркального и побочных каналов свыше 50 дБ. Для преобразования «вниз» применена схема с однократным переносом частоты.

Для синхронизации и формирования сетки опорных и тактовых частот приёмо-передающего модуля используется термостатированный кварцевый генератор с номинальной частотой сигнала 10 МГц, обеспечивающий относительную нестабильность частоты в пределах 10^{-8} за год эксплуатации. В составе переносчика частот используется независимый кварцевый генератор с номинальной частотой 100 МГц, что обеспечивает низкий уровень фазовых шумов в сигналах синтезированных частот [16].

Стробирующие сигналы, обеспечивающие запуск зондирующих импульсов и формирование циклограммы работы в импульсном режиме, генерируются модулем программируемого таймера. Модуль также обеспечивает возможность синхронизации сигналами от спутниковых навигационных систем и внешними импульсными сигналами, что может быть использовано для синхронизации активного транспондера с проверяемой радиотехнической системой [17].

В связи с тем, что активный транспондер предполагается использовать на различных этапах жизненного цикла РСА, в том числе на ранних этапах разработки при независимых проверках приемного и передающего тракта, предусмотрены три основных режима приёма и передачи сигналов.

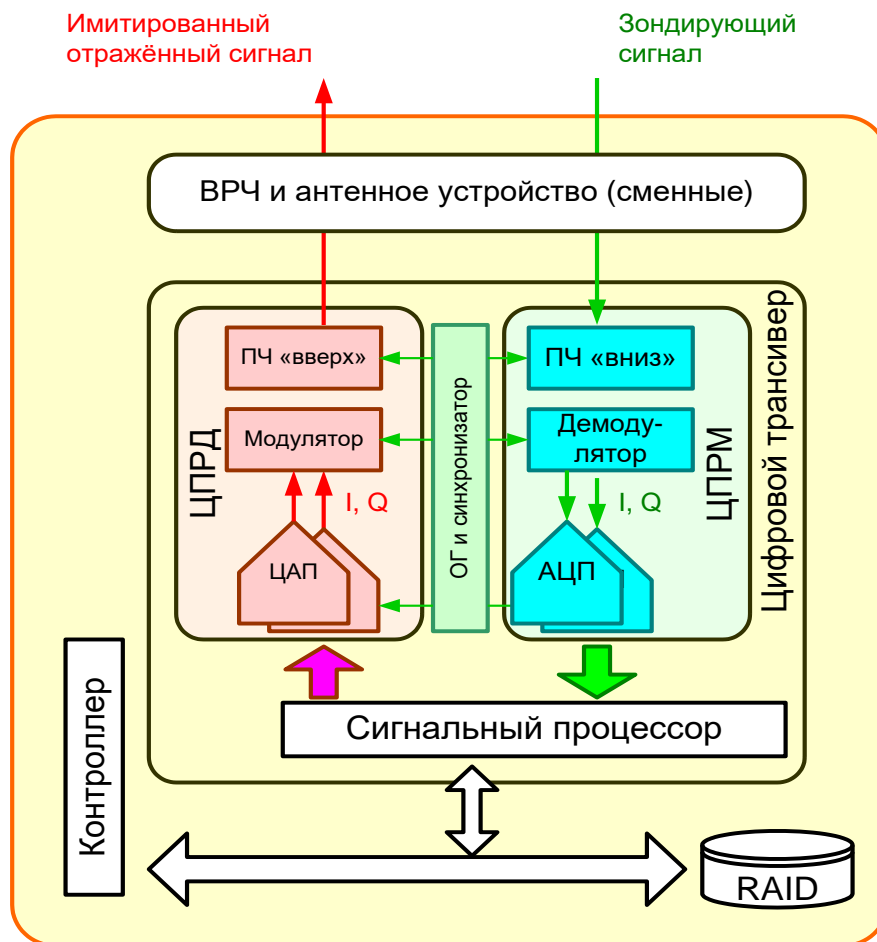


Рис 2. – Структурная схема УИРС

Непрерывный режим (стриминг)

На приём – осуществляется преобразование входного сигнала в поток цифровых данных, производится запись потока данных в единый массив на цифровое хранилище. Начало и конец приёма задаются внешним импульсным сигналом или по команде из управляющей программы.

На передачу – массив данных, предварительно сформированный и записанный на цифровое хранилище, считывается и воспроизводится в непрерывном режиме по аппаратной или программной команде начала передачи и завершается по окончании данных или по команде.

Сегментированный (импульсный) режим

При работе в сегментированном режиме принимаемый и демодулируемый сигнал преобразуется в поток цифровых данных в течение промежутков времени, задаваемых внешними, внутренними импульсными сигналами или программными триггерами и имеющих программно заданную длительность. Данные записываются на цифровое хранилище в массив, в котором порции непрерывно записанных данных (сегменты) размещаются в порядке их формирования с метками номера сегмента и времени начала записи (первого отсчёта в сегменте).

Для генерации или воспроизведения импульсного сигнала массив данных этого сигнала, разделённый на упорядоченные порции (сегменты), предварительно записывается на цифровое хранилище. По внешнему или внутреннему сигналу запуска импульса сигнала на передачу инициируется воспроизведение сигнала из очередного сегмента данных. По окончании данных в сегменте или по сигналу окончания импульса на передачу выход передатчика отключается.

Режим ретрансляции

В режиме ретрансляции принимаемый сигнал преобразуется в поток цифровых данных, передаваемый по информационной шине внутри модуля векторного приёмо-передатчика с выхода приёмного на вход передающего канала. При этом осуществляется временное хранение отсчётов сигнала в буферном запоминающем устройстве, где организуется стек типа FIFO. Синхронизация аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования осуществляется от одного источника тактового сигнала, при этом задержка от момента записи отсчёта входного сигнала до момента воспроизведения этого отсчёта (время нахождения данных в буфере) задаётся программно.

Предусмотрены непрерывный и импульсный подрежимы ретрансляции. В непрерывном режиме единственным программируемым параметром преобразования является задержка, которая является постоянной в течение всего сеанса. В импульсном режиме ретрансляция осуществляется по такой же циклограмме, как в сегментированном режиме записи и воспроизведения, с синхронизацией циклов по программируемому триггеру от модуля таймера или по внешнему импульсному сигналу. Принятый импульс зондирующего сигнала, ограниченный «окном» приёма, преобразуется сигнальным процессором в соответствии с параметрами преобразования, обновляемыми в каждом цикле. Импульсный режим ретрансляции является основным режимом работы АТ при имитации сложных и поверхностно-распределённых целей [18].

Одиночная точечная цель моделируется путём воспроизведения поступающего на вход зондирующего сигнала, записываемого в цифровой буфер и считываемого с фиксированной задержкой в режиме FIFO. Кажущаяся наклонная дальность определяется программно заданной задержкой, коэффициент обратного рассеяния – сквозным коэффициентом усиления аналогового и цифрового тракта приёмопередатчика. Для моделирования смещения по азимуту при цифровой ретрансляции в запись каждого импульса вносится дополнительный фазовый сдвиг по линейному закону.

Для моделирования группы точечных целей записанная огибающая импульса зондирующего сигнала преобразуются в суперпозицию таких же комплексных огибающих с добавлением задержек, начальных фаз и соответствующими коэффициентами по амплитуде.

Моделирование произвольных фоно-целевых обстановок осуществляется также путём аппаратно-программного преобразования принимаемого зондирующего сигнала в суперпозицию его имитированных отражений от всех элементов моделируемой радиолокационной цели. При этом формирование суперпозиции описывается как свёртка исходной комплексной огибающей с некоторой импульсной характеристикой, индивидуально рассчитываемой для каждого импульса в сеансе. Полный набор таких импульсных характеристик представляется в форме матрицы комплексных чисел с количеством строк, равным количеству импульсов в сеансе, и рассчитывается путём применения к модели фоно-целевой обстановки преобразования, обратной операции сжатия по азимуту для заданного закона движения носителя. Моделирование сюжета и расчёт импульсных характеристик выполняется заблаговременно перед началом сеанса, а свёртка – в режиме реального времени после приёма и записи очередного импульса.

Предусмотрены ограниченный и полномасштабный режимы свёртки с импульсными характеристиками, моделирующими произвольные фоно-целевые обстановки. Ограниченный режим имеет более простую программную реализацию и предназначен для проведения сеансов небольшой длительности (менее 10 тысяч импульсов). В этом режиме матрица импульсных характеристик с количеством строк, равным расчётному количеству импульсов в сеансе, полностью загружается в буферную память приёмопередатчика перед началом сеанса. Очередной принятый импульс зондирующего сигнала демодулируется и выполняется свёртка его комплексной огибающей с соответствующей строкой матрицы импульсных характеристик. Результат свёртки может почленно умножаться на весовую функцию и суммироваться с аддитивной имитацией шума, помех (последнее предполагается

использовать при наземных испытаниях). Имитированный отражённый сигнал воспроизводится после программно заданной задержки (рисунок 3).

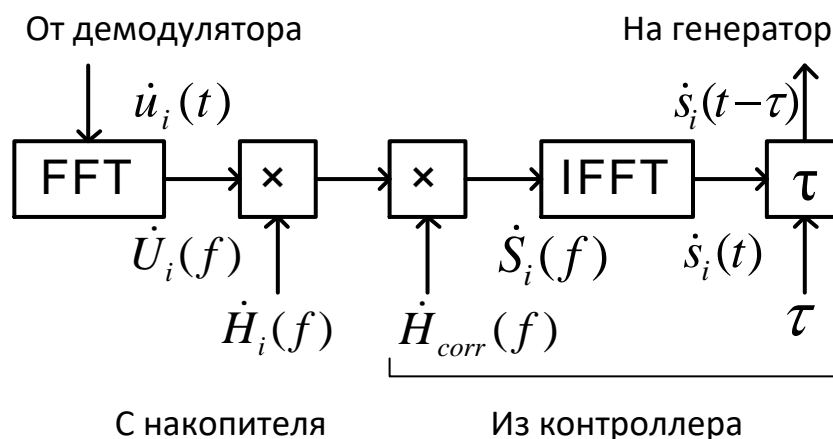


Рис 3. – Организация обмена данными при имитации в режиме реального времени

В полномасштабном режиме матрица импульсных характеристик хранится на твердотельном накопителе и при выполнении сеанса обработки загружается в буферную память трансивера, в которой для этого выделяются две области, частями, не превышающими по размеру выделенной области буфера. Загрузка следующей подматрицы выполняется во время использования ранее загруженной. Таким образом может быть реализовано полунатурное моделирование для обработки длительных сеансов съёмки (десятки минут).

Проблемные вопросы реализации

Активный транспондер имеет две составные части, разработка которых содержит как элементы новизны, так и технические сложности. Внешняя радиочастотная аппаратура должна в несколько раз превосходить по стабильности сигнала и параметрам антенно-волнового тракта характеристики РСА. Требования по поддержанию сквозного коэффициента усиления сигнала за время ретрансляции не хуже 0,1 дБ, высокая равномерность АЧХ в полосе 1 ГГц, поляризационная развязка не хуже 30 дБ – основные проблемные вопросы, которые должны быть решены при разработке внешней радиочастотной аппаратуры. Следует отметить, что лучшие зарубежные активные транспондеры имеют ширину полосы не более 600 МГц, что связано с шириной полосы зондирующих сигналов РСА, для которых они были разработаны.

При создании устройства имитации и регистрации сигналов возникают следующие проблемные моменты. Так как большинство РСА работают в X-диапазоне, то возникает необходимость применять процессор, работающий на частоте порядка 10 ГГц или использовать переносчик частоты. Широкая рабочая полоса порядка 1 ГГц, обусловленная стремлением разработчиков РСА достичь высокой разрешающей способности по дальности (разрешение ГКРЧ на расширение полосы в X-диапазоне до 1,2 ГГц было получено в 2015 году), требует разработки переносчика частоты с неравномерностью АЧХ не хуже 2 дБ.

В отличие от существующих АТ, формирующих отклик только на точечную цель, предлагаемый активный транспондер может формировать сложные и поверхностно-распределенные цели, что особенно важно для определения радиометрических характеристик РСА, в то время как высокая стабильность сигнала и равномерность АЧХ – необходимые условия для радиометрической калибровки.

Заключение

Применение активного транспондера для испытаний, калибровки и валидации космического РСА, измерение сквозных характеристик радиолокатора по единым методикам на соответствие выбранным критериям на различных этапах жизненного цикла является важной задачей, так как от качества и проработки системы испытаний в значительной мере зависит степень выполнения РСА возложенных на него задач.

Создание радиолокационных полигонов, оборудованных активными транспондерами, позволит существенно уменьшить время, затрачиваемое на летные испытания, внешнюю калибровку и валидацию, и, следовательно, максимально эффективно использовать космический РСА в течение всего срока его активного существования.

Так как характеристики радиолокатора могут изменяться за время эксплуатации на орбите, внешняя калибровка является необходимым условием получения высококачественного выходного продукта космических РСА. Она может и должна проводиться с помощью активных транспондеров, которые также позволяют контролировать сквозные характеристики при летных испытаниях и штатной эксплуатации радиолокатора.

Предлагаемый активный транспондер может стать новой ступенью в построении системы испытаний, калибровки и валидации космических РСА благодаря своим характеристикам и ориентированности на современные и перспективные радиолокаторы. Цифровая часть транспондера универсальна, и на её базе могут быть построены активные транспондеры для проверки радиолокаторов P, L, C, S, X диапазонов при использовании соответствующих антенных устройств и внешней радиочастотной аппаратуры.

Литература

1. Döring B., Looser P., Jirousek M., Schwerdt M., Peichl P. Highly Accurate Calibration Target for Multiple Mode SAR Systems. Proc. EUSAR 2010.
2. Snoeij P. Transponder Development for Sentinel-1. Proc. EUSAR 2010.
3. M. Kashanianfard, A.J. Sarabandi, A. Nashashibi, K. Sarabandi, X. Duan, R. Muellerschoen, B. Chapman, Y. Lou L-band Single Antenna Polarimetric Active Radar Calibrator (SAPARC) for Airborne and Spaceborne SAR Calibration [Электронный ресурс]. URL: <http://sarcv.ceos.org/documents/doc/292/> (дата обращения: 18.05.2020)
4. T. Zajc, M. Azcueta, J. Ferreyra, J.P. Cuesta, M. Thibeault SAOCOM Calibration Targets and Sites [Электронный ресурс]. URL: <http://sarcv.ceos.org/documents/doc/291/> (дата обращения: 18.05.2020)
5. Daniel Rudolf, Bjorn Doring, Sebastian Raab, Jens Reimann, Marco Schwerdt Absolute Radiometric Calibration of C-Band Transponders with Proven Plausibility. Proc. EUSAR 2014.
6. Bjorn Doring, Jens Reimann, Sebastian Raab, Matthias Jirousek, Daniel Rudolf, Marco Schwerdt. The Three-Transponder Method: A Novel Approach for Traceable RCS Calibration of SAR Transponders. Proc. EUSAR 2014.
7. Ямпольский В.Г., Фролов О.П. Антенны и ЭМС. – М.: Радио и связь, 1983.
8. Feng Ming, Jun Hong, Liang Li The External Calibration System of GF-3 Satellite. Proc. EUSAR 2018.
9. Sebastian Raab, Daniel Rudolf, Klaus Weidenhaupt, Marco Schwerdt Development of DLR's Innovative Remote Controlled Calibration Targets – Potential of Polarization Sensitive Measurements. Proc. EUSAR 2018.
10. Daniel Rudolf, Bjorn Doring, Matthias Jirousek, Jens Reimann, Marco Schwerdt. A Compact Antenna Rotation Concept for Precise Polarimetric SAR Calibration Transponders. Proc. EUSAR 2016.
11. Klaus Weidenhaupt, Sebastian Raab, Daniel Rudolf, Marco Schwerdt. Innovative Antenna Concepts for DLR's Fully Polarimetric Low-Frequency Transponders. Proc. EUSAR 2018.

12. A. Freeman, Y. Shen, C.L. Werner Polarimetric SAR Calibration experiment using active radar calibrators [Электронный ресурс]. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/46702/authors#authors> (дата обращения:18.05.2020)
13. Shi Longfei, Liu Jian, Liu qiaoling, Pang Chen Active calibration technology for polarimetric radar measurement [Электронный ресурс]. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8265883> (дата обращения:18.05.2020)
14. Matthias Jirousek, Bjorn Doring, Daniel Rudolf, Sebastian Raab, Marco Schwerdt. Development of the highly accurate DLP Kalibri Transponder. Proc. EUSAR 2014.
15. Алексеев С.Б., Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Тарасенко А.М. Аппаратно-программный комплекс для имитации и записи сигналов существующих и перспективных радиоэлектронных средств. – 27-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конференции. Севастополь, 2017.
16. Недро Л.В. Широкополосный переносчик частот X-диапазона. – Научно-техническая конференция, посвященная 75-летию АО «Концерн «Вега». «Радиоэлектронные системы мониторинга и управления». – Москва, 2019.
17. Дьяченко М.А., Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Чарыков И.В., Чикачёв В.С. Основные принципы построения и использования мобильного измерительно-испытательного комплекса для наземной обработки авиационных радиотехнических систем. – XI Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь». – Москва, 2017.
18. Тарасенко А.М. Имитация и анализ сигналов различных радиотехнических систем средствами аппаратно-программного комплекса экспериментальной отработки. – VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем МЭС-2018». – Зеленоград, 2018.