

Имитатор отражённых сигналов для испытаний радиолокаторов с синтезированной апертурой

В.В. Мекекечко, В.А. Михеев, В.И. Николаев

АО «Концерн радиостроения «Вега»
121170, Москва, Кутузовский проспект, д.34
E-mail: vnikolaev65@inbox.ru

Имитатор отражённых сигналов предназначен для наземной обработки и лётных испытаний радиолокаторов с синтезированной апертурой. В работе приведены состав, основные технические характеристики и описание работы имитатора отражённых сигналов. При наземных испытаниях РСА применение имитатора позволяет осуществить проверку качества зондирующего сигнала, а также получить с выхода информационной радиолинии цифровую радиоголограмму для проверки сквозного информационного тракта и оценки разрешающей способности и радиометрических характеристик космической системы. Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), наземная обработка, имитатор отражённых сигналов

Echo signal simulation for SAR tests

V.V. Mekekechko, V.A. Mikheev, V.I. Nikolaev

Joint-Stock Company «Radio Engineering Corporation «Vega».

The reflected signal simulator is designed for ground testing and flight testing of synthetic aperture radars. The paper presents the composition, main technical characteristics and description of the operation of the reflected signal simulator. During SAR ground testing, the use of a simulator makes it possible to verify sounding signal quality, as well as to obtain a digital radio hologram from the output of the information radio line to check the end-to-end information path and evaluate the resolution and radiometric characteristics of the space system.

Keywords: Synthetic Aperture Radar (SAR), ground testing, echo signal simulator

Введение

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) занимают все более весомое положение среди технических средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Этот факт объясняется наличием у РСА целого ряда достоинств, среди которых следует отметить независимость от погодных условий и времени суток, оперативность, гибкость в реализации режимов съемки, возможность применения различных алгоритмов обработки радиолокационных данных, высокая разрешающая способность по обеим пространственным координатам, сравнимая с разрешающей способностью оптических средств ДЗЗ [1].

Современные РСА позволяют определять энергетические, пространственные и электродинамические характеристики снимаемых объектов, поэтому могут использоваться в качестве средств измерений [2].

Идет процесс коммерциализации дистанционного зондирования Земли, и потребителю важно знать, какой точностью обладают предложенные ему результаты ДЗЗ. В связи с вышесказанным, задачи измерения сквозных характеристик, калибровки и валидации РСА становятся особенно актуальными.

Назначение и технические характеристики устройства имитации отражённых сигналов

Предлагаемое устройство предназначено для лётных и наземных испытаний, калибровки и валидации радиолокаторов с синтезированной апертурой и осуществляет преобразование 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.

Функцией имитатора отражённых сигналов (ИОС) как испытательного средства является формирование для РСА входных воздействий с калиброванными характеристиками. Входным воздействием в данном случае является ретрансляция зондирующего сигнала РСА с преобразованием по определённому закону, определяемому совокупностью характеристик обратного рассеяния имитируемых 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 [3]. 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 устройство должно 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 поляризационными режимами, приём и передача сигналов может осуществляться на выбранных линейных поляризациях [3, 6].

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

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

Чтобы обеспечить минимальное значение сигнал/шум при ретрансляции не менее 40 дБ при любых условиях съёмки, минимальное значение добротности приёмной системы должно быть не менее $0,3 \text{ К}^{-1}$, или минус 5 дБ/К.

Шумовая температура МШУ с волноводным вентилем на входе 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 [4].

Таблица 1. Характеристики устройства имитации отражённых сигналов

Параметр	Значение
Диапазон рабочих частот	Х
Ширина полосы частот	1000 МГц
Добротность приёмной системы, не менее	-5 дБ/К
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

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, то ЭИИМ переизлучаемого в обратном направлении сигнала рассчитывается по формуле:

$$(P \cdot G)_{обр} = \sigma_{инт} \cdot \frac{(P \cdot G)_{зонд}}{4\pi r_n^2}. \quad (1)$$

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 должна достигать 10^6 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 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 рассматриваемому, применялись одна или две антенны (обычно рупорные). В одной из реализаций активного транспондера для РСА Sentinel предложен вариант устройства с совмещённой приёмо-передающей антенной. К преимуществам этого варианта можно

относителю уменьшению погрешности калибровки самого ИОС. На основании вышеизложенного был выбран состав активного имитатора [5 – 8].

Состав и описание работы имитатора отражённых сигналов

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

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

- антенное устройство с управляемым опорно-поворотным устройством (ОПУ);
- внешнее радиочастотное устройство (ВРЧ);
- цифровой трансивер, содержащий приёмную и передающую части, опорный генератор и синхронизатор, а также сигнальный процессор, с помощью которого осуществляется информационный обмен с контроллером и RAID массивом и управление приёмо-передающим трактом [8].

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 [9].

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

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» обеспечивает 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 $5 \cdot 10^{-8}$ 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 [10]. Строблирующие сигналы, обеспечивающие запуск зондирующих импульсов и формирование циклограммы работы в импульсном режиме, генерируются модулем программируемого таймера.

Предусмотрена возможность синхронизации работы ИОС внешними импульсными сигналами от проверяемой радиотехнической системы [11].

ИОС предполагается использовать на различных этапах жизненного цикла РСА, в том числе на ранних этапах разработки при независимых проверках приемного и передающего тракта, а также оценки качества зондирующего сигнала.

Для автономной проверки и отработки передающего и приёмного трактов РСА используются режимы соответственно цифровой записи и генерации сигналов. Запись потока данных принимаемого сигнала на твердотельный накопитель осуществляется в режиме стриминга, при этом длительность записываемого фрагмента сигнала ограничивается только ёмкостью накопителя и составляет до 20 минут при максимальной ширине спектра сигнала. Аналогично, в режиме стриминга выполняется генерация сигнала из цифровой модели, предварительно помещённой на твердотельный

накопитель. Запись и генерация сигналов, по отдельности или одновременно, могут осуществляться в непрерывном или импульсном режиме.

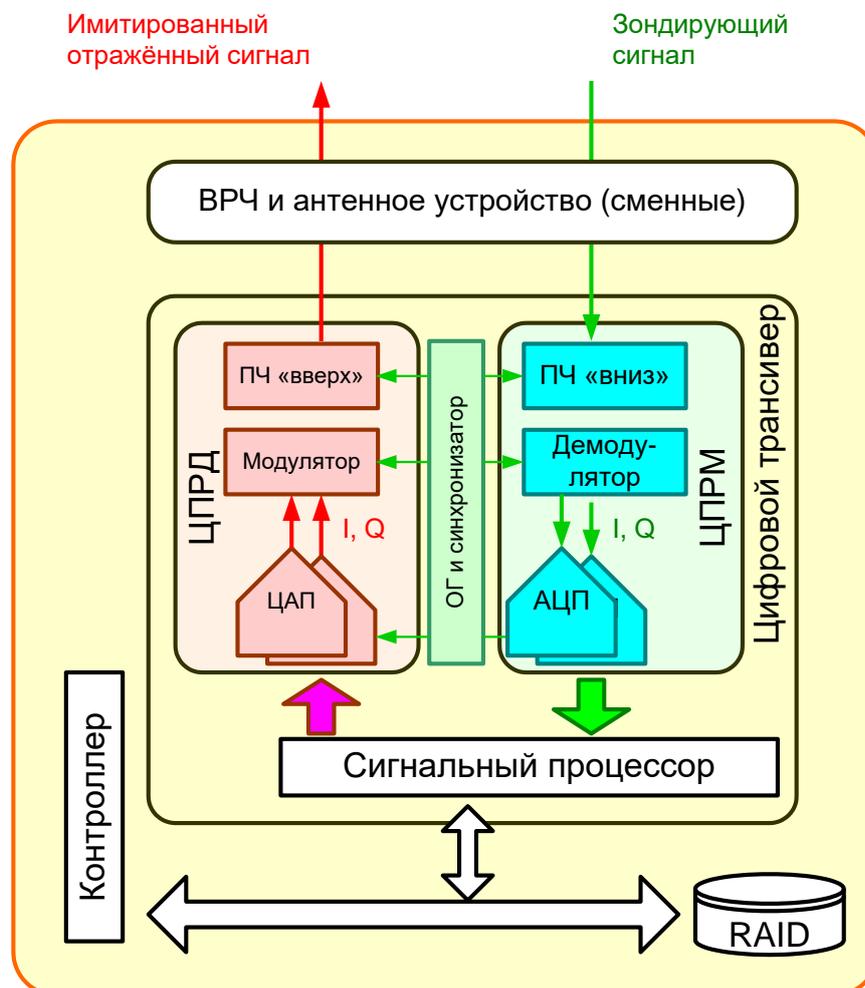


Рис 1. Структурная схема ИОС

В отличие от существующих аналогов, формирующих отклик только на точечную цель [12], предлагаемый имитатор 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.

Выводы

Применение имитатора отражённых сигналов при наземных испытаниях РСА позволит:

- методом полунатурного моделирования осуществить проверки сквозного информационного тракта;
- обеспечить проверку качества зондирующего сигнала, формируемого РСА в требуемых режимах съёмки;
- методом полунатурного моделирования реализовать имитацию отражений для различных фоно-целевых обстановок;
- получить с выхода информационной радиолнии цифровую радиоголограмму для последующей обработки и оценки разрешающей способности и радиометрических характеристик.

Целесообразно применение имитатора отражённых сигналов на различных этапах жизненного цикла РСА

При использовании имитатора отражённых сигналов для калибровки необходима высокоточная калибровка тракта самого устройства.

Литература

1. Костров В.В., Ракитин А.В. Радиолокационный космический сегмент дистанционного зондирования Земли в 2023 году: состояние и перспективы развития // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2023, № 4. С.11–31
2. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы – М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
3. Создание радиолокационных подспутниковых полигонов для обеспечения лётных испытаний, калибровки и валидации космических систем дистанционного зондирования Земли. Лепёхина Т.А., Алексеева А.М., Николаев В.И. Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 13–17 ноября 2023 г. Электронный сборник материалов конференции. ISBN 978-5-00015-065-8 DOI 10.21046/21DZZconf-2023a. С.130
4. Ямпольский В.Г., Фролов О.П. Антенны и ЭМС. – М.: Радио и связь, 1983.
5. Feng Ming, Jun Hong, Liang Li The External Calibration System of GF-3 Satellite. Proc. EUSAR 2018
6. 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)
7. 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:18.04.2024).
8. Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Тарасенко А.М. Аппаратно-программный комплекс экспериментальной отработки для имитации, регистрации и анализа сигналов радиоэлектронных средств // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем. 2018. Выпуск 4. С. 119–126.
9. 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.
10. Недро Л.В. Широкополосный переносчик частот X-диапазона. – Научно-техническая конференция, посвященная 75-летию АО «Концерн «Вега». «Радиоэлектронные системы мониторинга и управления». – Москва, 2019.
11. Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Вопросы синхронизации активного имитатора радиомышеней 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.: ИПИМ РАН, 2016. Часть 1. С.236–239.
12. Shift-Frequency Jamming Imaging and Analysis Based on Active Radar Calibrator / G. Liu, L. Li, J. Hong, F. Ming // 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS (Brussels, Belgium, 2021). – 2021. – P. 3948–3951