

## **Модели фоно-целевых обстановок для наземной отработки радиолокаторов с синтезированной апертурой**

А.М. Алексеева, Т.А. Лепёхина, В.В. Мекекечко, В.А. Михеев

*Акционерное общество «Концерн радиостроения «Вега»  
121170, г. Москва, Кутузовский просп., 34  
E-mail: asianna@list.ru*

*Основной задачей наземной отработки космических систем дистанционного зондирования Земли является предварительная оценка достижимых сквозных характеристик с использованием полунатурного моделирования тестовых воздействий (объектов съёмки), с качеством отображения которых связаны проверяемые характеристики. В работе рассмотрены модели типовых фоно-целевых обстановок, радиолокационные изображения которых удобны для автоматизированного анализа с целью определения пространственной разрешающей способности и радиометрических характеристик.  
Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), полунатурное моделирование, имитация отражённых сигналов, модели фоно-целевых обстановок.*

### **Target-clutter pattern models for SAR ground testing**

A.M. Alekseeva, T.A. Lepekhina, V.V. Mekekechko, V.A. Mikheev

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

*The main task of spaceborne remote Earth sensing system ground testing is a preliminary assessment of achievable end-to-end characteristics using simulation of test impacts (survey objects), the quality of their imaging being uniquely related to the characteristics being tested. The paper considers models of typical test objects (scenes), radar images of which are convenient for automated analysis in order to determine spatial resolution and radiometric characteristics.  
Keywords: Synthetic Aperture Radar (SAR), hardware-in-the-loop simulation, echo signal simulation, scene simulation*

### **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 съёмки, возможность применения различных алгоритмов обработки радиолокационных данных, высокая разрешающая способность по обеим пространственным координатам, сравнимая с разрешающей способностью оптических средств ДЗЗ [1].

Развитие технологий дистанционного зондирования Земли средствами радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) в современном мире связано с расширением множества задач, решаемых с их помощью, и перечня требований к характеристикам и функциям аппаратуры, программно-алгоритмическому обеспечению и методам их контроля [2]. Учитывая разнообразие режимов съёмки и рост доли информационных продуктов, получаемых с использованием бортовых вычислительных средств, необходимо при создании системы наземной отработки космического РСА предусматривать средства наземных бесполётных испытаний, обеспечивающие

полунатурное моделирование объектов съёмки, движения носителя и автоматизированный анализ результатов эксперимента для оценки характеристик РСА. Необходимым условием автоматизации эксперимента является использование тестовых воздействий с калиброванными характеристиками, соответствующими проверяемым параметрам РСА, возможность многократного повторения эксперимента с сохранением постоянных условий и применение критериев, пригодных для автоматизации методик анализа.

Простейшим видом имитируемой радиолокационной цели является одиночная точечная цель [3]. Имитация точечных целей осуществляется с помощью ретрансляторов, имеющих в составе волоконно-оптическую или цифровую линию задержки. В настоящее время такие устройства используются для радиометрической калибровки космических РСА, а также известны примеры включения линии задержки в состав РЛС в качестве средства встроенного контроля работоспособности. Таким способом имитируется сигнал, отражённый от одиночной точечной цели на траверсе, при этом для синтеза изображения должен использоваться упрощённый алгоритм, из которого исключён учёт изменения расстояния между фазовым центром антенны и целью при движении носителя. Несмотря на упрощённый закон преобразования, данный способ имитации отражённого сигнала позволяет получить аппаратную функцию отклика РСА для оперативного контроля его работоспособности, предварительной оценки разрешающей способности по форме и ширине главного лепестка, уровней боковых лепестков. Имитация группы точечных целей, образующих фигуру на плоскости (как правило, квадрат), позволяет выявить факторы, влияющие на вид функции отклика для точечных целей, расположенных не на траверсе: это может быть неортогональность квадратур демодулятора, а также нелинейность передачи сигнала в видеотракте, например, из-за перегрузки по амплитуде.

Другой, не менее важной, задачей является имитация сложных целей с учётом закона изменения расстояния до точечных целей, близкого к реальному в условиях полёта, для возможности использования штатного алгоритма сжатия радиоголограммы. Методы имитации, а также последующего синтеза и анализа радиолокационных изображений имитированных целей для лётных испытаний сходны с наземными, за исключением некоторых особенностей. При имитации для наземных испытаний преобразование сигнала выполняется с учётом модели взаимного движения антенны РСА и всех элементов имитируемой радиомишени, в то время как при работе с РСА, находящимся на орбите, преобразование основано на разностной составляющей законов движения для элементов имитируемой радиомишени, смещённых относительно местоположения ретранслятора.

### **Метод полунатурного моделирования испытательных воздействий**

Для описания метода полунатурного моделирования испытательных воздействий следует привести краткое математическое описание процесса съёмки объектов произвольного вида с помощью РСА.

Объект съёмки описывается как двумерное поле комплексного коэффициента обратного рассеяния в диапазоне рабочих частот испытываемого РСА:

$$\dot{s}(x, r) = \sqrt{\sigma_0(x, r)} \cdot e^{i\varphi(x, r)}, \quad (1a)$$

где  $\sigma_0$  – удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) элемента снимаемой поверхности;

$\varphi$  – сдвиг начальной фазы отражённого сигнала, или множество  $N$  дискретных отражателей с различными коэффициентами обратного рассеяния,

$$\dot{s}(x, y, z) = \sum_{m=1}^N \dot{s}_m \delta(x_m, y_m, z_m), \quad (16)$$

где  $(x_m, y_m, z_m)$  – координаты  $m$ -го дискретного отражателя;

$\dot{s}_m = \sqrt{\sigma_m} e^{i\varphi_m}$  – его комплексный коэффициент обратного рассеяния;

$\sigma_m$  – ЭПР  $m$ -го дискретного отражателя и – истинное значение напряженности поля на уровне поверхности Земли;

$\varphi_m$  – поворот фазы сигнала при отражении.

На основании вышеизложенного предлагается методика формирования отражённого сигнала.

Формирование отражённого сигнала от снимаемого участка является результатом трёх процессов:

1) генерации зондирующего сигнала (ЗС), который является последовательностью модулированных импульсов  $\dot{u}_{snd}(t, \tau)$ , где  $\tau$  – «быстрое» время (аргумент комплексных функций, описывающих законы внутриимпульсной модуляции зондирующего и отражённого сигналов),  $t$  – «медленное» время, в котором описывается движение носителя по орбите;

2) отражения ЗС от каждого элемента снимаемой фигуры с комплексным коэффициентом рассеяния  $\dot{s}(x, r)$ ;

3) формирования отражённого сигнала ОС как суперпозиции элементарных отражённых сигналов с учётом суммарных задержек распространения ЗС и парциальных ОС на линиях вниз и вверх:

$$\dot{u}_{ir}(t, \tau) = \sum_{m=1}^N L_m^2(t) \cdot e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}\rho(t, x_m, y_m, z_m)} \cdot \dot{s}_m \dot{u}_{snd}\left(\tau - \frac{2\rho(t, x_m, y_m, z_m)}{c}\right), \quad (2)$$

где  $\rho$  – расстояние между спутником и  $m$ -ым элементарным отражателем в момент «медленного» времени  $t$ .

Такая суперпозиция может быть представлена в виде свёртки комплексной огибающей зондирующего импульса с некоторой импульсной характеристикой

$$\dot{u}_{ir}(t, \tau) = \dot{u}_{snd}(t, \tau') * \dot{h}_{ir}(t, \tau - \tau'), \quad (3)$$

где для моделирования при наземных испытаниях

$$\dot{h}_{ir}(t, \tau') = \sum_{m=1}^N L_m^2(t) \cdot e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}\rho(t, x_m, y_m, z_m)} \cdot \dot{s}_m \delta\left(\tau' - \frac{2\rho(t, x_m, y_m, z_m)}{c}\right), \quad (4)$$

а для имитации сложных целей при лётных испытаниях переменное расстояние в формуле (4) заменяется на величину  $\rho'(t, x_m, y_m, z_m) = \rho(t, x_m, y_m, z_m) - \rho(t, x_0, y_0, z_0)$ , где  $(x_0, y_0, z_0)$  – координаты имитатора.

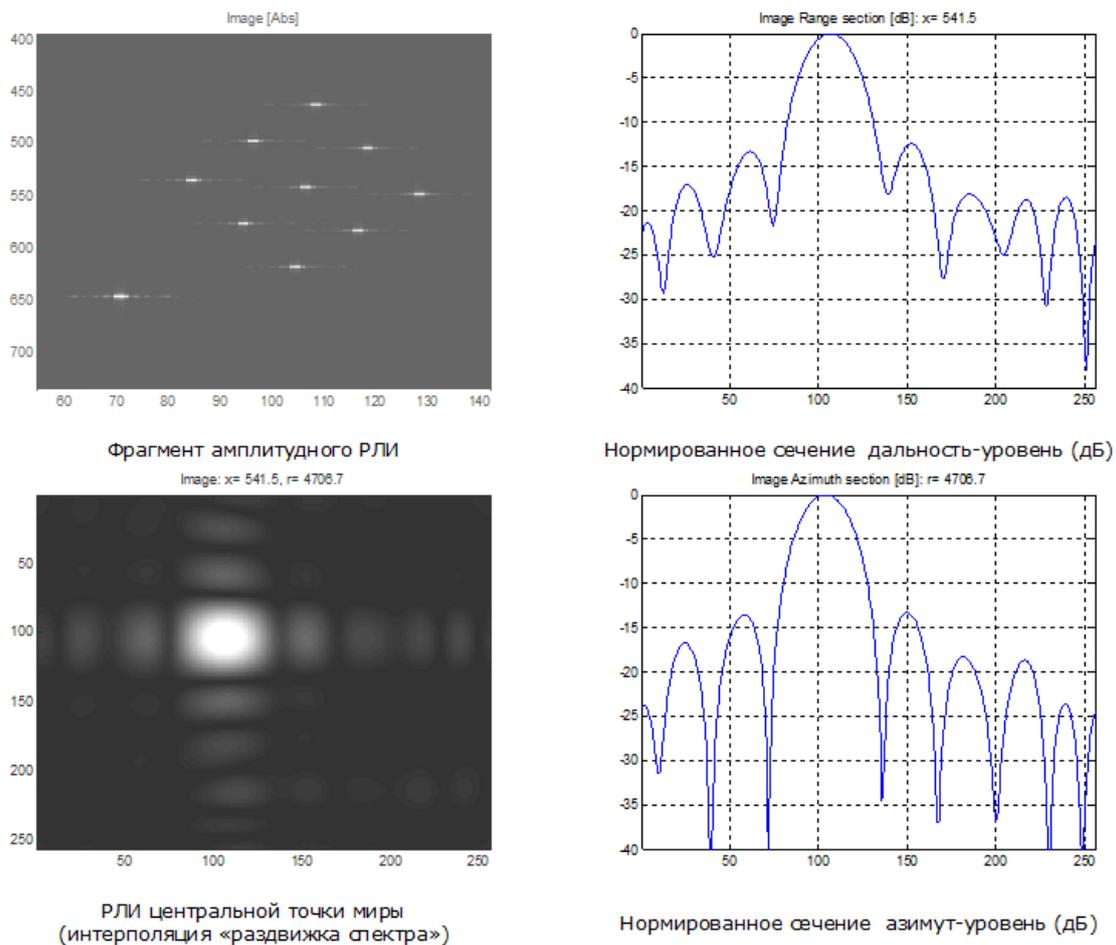
### Результаты моделирования фоно-целевых обстановок

Активная имитация радиомишеней при лётных испытаниях и штатной эксплуатации космических РСА широко используется для радиометрической калибровки, измерения поляриметрических характеристик [4, 5], а также рассматривается в качестве реализуемого метода формирования испытательных воздействий для экспериментального определения радиометрической разрешающей способности и динамического диапазона по поверхностно-распределённым целям [6].

Для оценки радиометрической разрешающей способности РСА при съёмке поверхностно-распределённых целей, а также для проверки функций автоматизированной дешифрации изображений (распознавания объектов) необходимо

моделирование более сложных многоточечных целей и произвольных фоно-целевых обстановок с числом элементов  $10^7$  и более. Для режимов среднего разрешения и небольшой протяжённости моделируемого сюжета по дальности (суммарное количество отсчётов оцифрованного импульса зондирующего сигнала и пикселей модели сложной цели не превышает 2048) реализовано свёрточное преобразование сигнала в режиме реального времени по алгоритму, описанному в [7]. Для более сложных моделей предусмотрена методика обработки с предшествующей подготовкой данных, требующая предварительной записи зондирующего сигнала РСА и последующего проведения контрольного сеанса в этом же режиме с подачей на вход приёмника РСА имитированного отражённого сигнала, моделируемого по данным записанного ранее ЗС. В обоих этих режимах требуется синхронизация циклограмм работы РСА-изделия и имитатора с использованием стробирующих сигналов и синхронизация опорных частот обоих устройств.

Ниже представлены результаты моделирования некоторых фоно-целевых обстановок с помощью имитатора отражённых сигналов.



**Рис. 1. Результаты имитации пространственной миры**

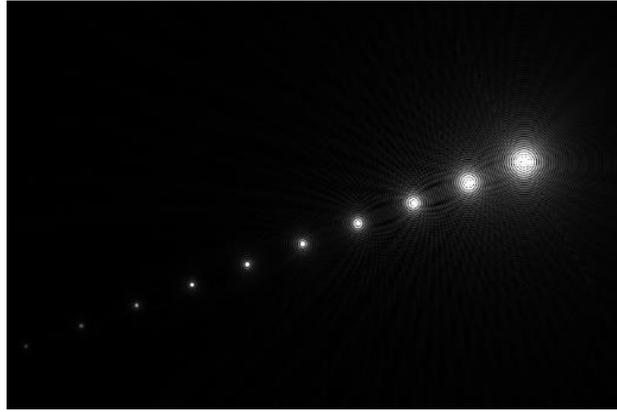
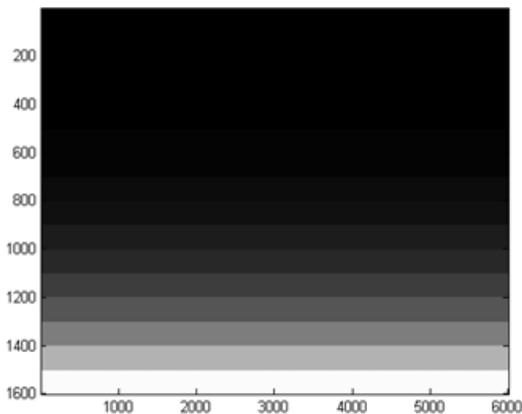
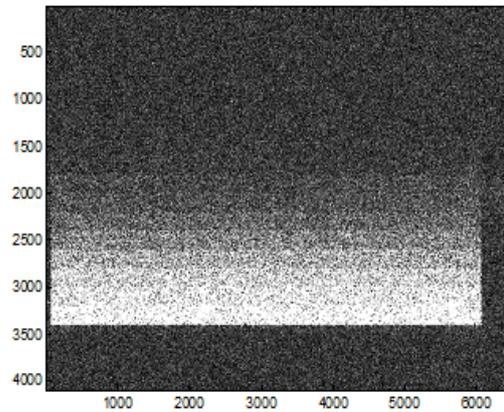


Рис. 2. Результаты имитации потенциальной миры

Модель снимаемого объекта

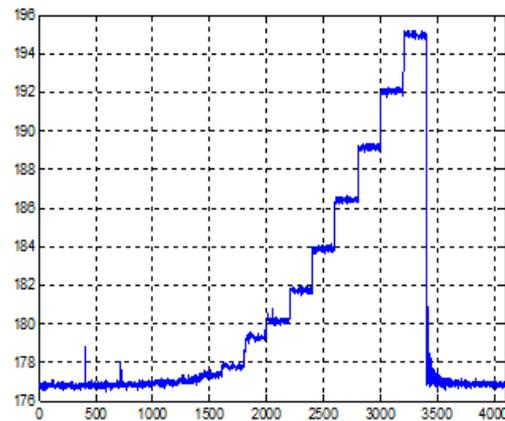
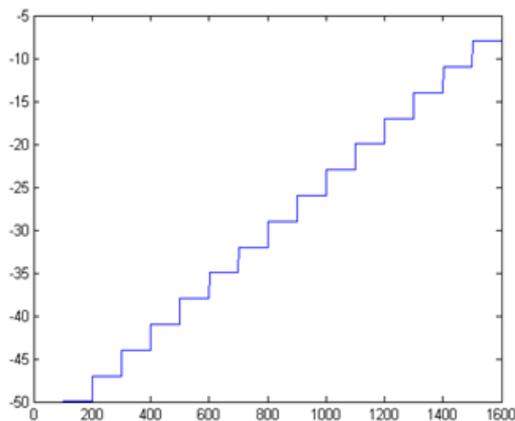


Радиолокационное изображение



Мира: ряд однородных участков с шагом возрастания УЭПР 3 дБ

Фрагмент РЛИ



Профиль УЭПР миры (дБ)

Профиль усреднённой радиояркости (дБ)

Рис. 3. Моделирование и имитация поверхностно-распределённых целей

Таким образом, на основании предложенного метода полунатурного моделирования испытательных воздействий были построены математические модели различных фоновых обстановок и реализована их имитация аппаратными средствами.

Были сформированы тестовые воздействия для использования при автономных испытаниях радиолокаторов с синтезированной апертурой, а также наземной обработке РСА в составе космического аппарата.

## **Выводы**

Системный подход к разработке и испытаниям космических систем ДЗЗ в радиолокационном диапазоне подразумевает применение единых методик на различных этапах жизненного цикла этих систем. В связи с этим целесообразно при имитационном моделировании на этапе эскизного проектирования, а затем на этапе наземных испытаний для оценки сквозных характеристик в качестве фоно-целевых обстановок имитировать миры, которые будут установлены на радиолокационном полигоне и использованы при лётных испытаниях для подтверждения сквозных характеристик космической системы ДЗЗ.

Также при создании программно-алгоритмического обеспечения для обработки радиолокационной информации, поступающей на наземный комплекс ДЗЗ, формирование тестовых задач для каждого режима съёмки должно проводиться с учётом моделей фоно-целевых обстановок, имитирующих миры, применяемые при лётных испытаниях, что позволит на ранних этапах создания комплекса оценить достижимость заданных в ТТЗ сквозных характеристик.

Имитация сложных целей, представляемых в виде набора блестящих точек, требуется при наземных испытаниях программного обеспечения, выполняющего бортовую обработку цифровых радиолокационных данных. Это могут быть радиолокационные модели морских судов и других объектов, распознавание которых требуется на борту.

Тестовые воздействия, имитирующие отражение зондирующего сигнала от пространственной и потенциальной миры, установленных на радиолокационном полигоне, используются при наземной отработке для получения радиолокационных изображений, по которым можно оценить ожидаемое качество информационного продукта.

Тестовые воздействия, сформированные с использованием моделей поверхностно-распределённых целей, могут также использоваться при лётных испытаниях для экспериментального подтверждения радиометрической разрешающей способности космической системы РСА.

## **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. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений. Под ред. Л.А. Школьного. – М.: изд. ВВИА им.проф. Н.Е. Жуковского, 2008.
4. Feng Ming, Jun Hong, Liang Li The External Calibration System of GF-3 Satellite. Proc. EUSAR 2018.
5. 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)
6. T. Lepekhina and V. Nikolaev, "Spaceborne SAR Radiometric Calibration and Characterization Using a Radar Target Simulator," 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP), Kazan, Russia, 2019, pp. 333-336.
7. Алексеева А.М., Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Устройство имитации отражённых сигналов для испытаний и калибровки радиолокаторов с синтезированной апертурой // Изв. вузов. Радиофизика. 2022. Т. 65, № 2. С. 141–148.