

Определение пространственного разрешения космических РСА методом импульсного отклика

Т.А. Лепёхина, В.И. Николаев, Е.Ф. Толстов

ГУП НПП «СПУРТ»: 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д.4.;
tatonika@inbox.ru.

Приводятся описание, обоснование применимости и преимущества метода импульсного отклика для определения пространственного разрешения космических РСА. На основании этого метода разработаны единые методики, по которым можно проводить испытания РСА на всех этапах их жизненного цикла.

Impulse response method features are introduced in this paper, its applicability and advantages for spaceborne SAR spatial resolution estimation are substantiated. Unified verification techniques suitable for SAR tests at any phase of its lifetime are developed on the basis of this method.

Пространственное разрешение – один из основных параметров, характеризующих качество РСА, поэтому его контролю как во время летных испытаний, так и при проведении процедуры валидации уделяется серьезное внимание. При системном подходе к созданию РСА возможность достижения требуемого пространственного разрешения оценивается на этапе разработки эскизного проекта и технического задания, разрешающая способность определяется на моделях, измеряется на макетах составных частей, подтверждается наземными испытаниями. Важным шагом является выбор метода, на основании которого могут быть разработаны сквозная система испытаний и соответствующие методики. В качестве такого метода рассмотрим метод импульсного отклика (МИО).

Метод импульсного отклика – это построение и анализ радиолокационного изображения (РЛИ) одиночной точечной цели (ОТЦ). Как линейная система, РСА может быть охарактеризован импульсной характеристикой $\dot{h}(x-x_u, r-r_u)$ – комплексным радиолокационным изображением (КРЛИ) одиночной точечной цели с координатами (x_u, y_u) , распределение коэффициента обратного рассеяния которой приближается к двумерной δ -функции Дирака в координатах дальность – азимут: $\delta(x-x_u, r-r_u)$. Здесь r – наклонная дальность, которая пересчитывается в поперечную дальность y по известному углу съёмки. Тогда, если снимаемый участок поверхности с системой координат (x, r) описывается двумерным полем комплексного коэффициента рассеяния $\dot{s}(x, r) = \sqrt{\sigma_0(x, r)} \cdot e^{i\varphi(x, r)}$, где σ_0 , φ – соответственно УЭПР и сдвиг начальной фазы, то его КРЛИ описывается двумерной свёрткой $\dot{J}(x, r) = \dot{s}(\xi, \eta) * \dot{h}(x-\xi, r-\eta)$. Модуль двумерной импульсной характеристики РСА принято называть функцией отклика (ФО) на одиночную точечную цель.

Традиционно, пространственная разрешающая способность радиолокационной станции (РЛС) оценивалась по критерию Рэлея – глубине прогиба огибающей суммарного отклика радиолокатора от двух близкорасположенных целей [1,2]. Основной проблемой данного подхода к оценке пространственного разрешения когерентных РЛС является зависимость формы суммарного отклика от разности фаз между отраженными сигналами, являющейся случайной величиной. Таким образом, можно сделать вывод о том, что метод оценки пространственного разрешения РЛС, основанный на критерии Рэлея, в случае РСА, как когерентной системы, является

излишне усложнённой. Помимо всего прочего, реализация метода требует применения целого набора парных отражателей и множества пролётов, что существенно усложняет и повышает стоимость процедуры валидации.

Рассмотрим метод оценки пространственного разрешения РСА по импульсному отклику от одиночной точечной цели более подробно. Его суть состоит в следующем.

Положим [2], что фаза принимаемого сигнала РСА имеет равномерное распределение на отрезке от 0 до 2π с плотностью вероятности

$$W(\varphi) = \frac{1}{2\pi}, \quad 0 \leq \varphi < 2\pi. \quad (1)$$

Тогда плотность распределения вероятности разности фаз двух сигналов $\varphi' = \varphi_1 - \varphi_2$ можно выразить формулой:

$$W'(\varphi') = \int_{-\infty}^{\infty} W(\varphi_2)W(\varphi' + \varphi_2)d\varphi_2 = \frac{1}{2\pi} \left(1 - \left| \frac{\varphi'}{2\pi} \right| \right). \quad (2)$$

$W'(\varphi')$ принимает ненулевые значения на интервале $-2\pi < \varphi' < 2\pi$. Учитывая, что фаза комплексного числа определена с точностью до периода 2π , можно показать, что модуль разности фаз с равномерным распределением также имеет равномерное распределение.

Согласно результатам математического моделирования, зависимость результата однократного измерения пространственного разрешения по критерию Рэля, определяемого отношением минимального расстояния между точечными целями, при котором критерий Рэля выполняется, к ширине отклика на одиночную точечную цель на уровне минус 3 дБ, от разности фаз между сигналами хорошо аппроксимируется параболой:

$$\rho(\varphi) = -0,156\varphi^2 + 1,542, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi, \quad (3)$$

где $\rho = \rho_{np}/\rho_0$ – нормированное пространственное разрешение, ρ_{np} – результат однократного измерения пространственного разрешения РСА по критерию Рэля, ρ_0 – ширина главного лепестка функции отклика РСА на одиночную точечную цель.

Преобразуя выражение (3), найдем зависимость разности фаз, с учетом ее положительной определенности, от нормированного пространственного разрешения:

$$\varphi(\rho) = \sqrt{\frac{1,542 - \rho}{0,156}}. \quad (4)$$

Тогда плотность распределения (2) можно привести к переменной ρ с помощью формулы перехода:

$$W(\rho) = W(\varphi) \left| \frac{d\varphi}{d\rho} \right|. \quad (5)$$

Проведя дифференцирование выражения (4) с последующей подстановкой результата в (5), получим вероятности результатов измерения нормированного пространственного разрешения по критерию Рэля при равномерном распределении разности фаз отражённых сигналов:

$$W(\rho) = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{0,156}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,542 - \rho}} = \frac{0,403}{\sqrt{1,542 - \rho}}, \quad 0 \leq \rho < 1,542. \quad (6)$$

Кривая плотности распределения изображена на рис. 1 а).

Интегрирование выражения (6) от нуля до заданного значения нормированного пространственного разрешения ρ' определяет вероятность того, что при измерении

нормированного пространственного разрешения по критерию Рэлея будет получен результат, не превышающий ρ' :

$$P(\rho) = 0,96 - 0,774\sqrt{1,542 - \rho}, \quad 0 \leq \rho \leq 1,542. \quad (7)$$

Вид функции $P(\rho)$, определяемой выражением (7), показан на рис. 1 б).

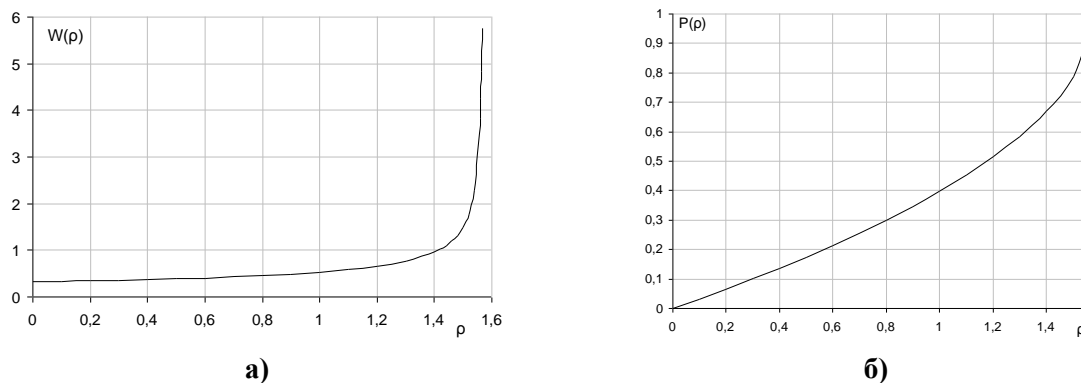


Рис. 1. Вероятность нормированного пространственного разрешения по критерию Рэлея: а) – плотность распределения вероятности результатов измерения при равномерном распределении разности фаз отражённых сигналов; б) – вероятность получения результата, не превышающего заданного ρ

Анализируя выражение (7), можно сделать вывод, что разрешение двух одиночных точечных целей, имеющих одинаковые ЭПР, по критерию Рэлея гарантированно обеспечивается, если расстояние между ними составляет не менее

$$\rho_{np} = 1,571\rho_0. \quad (8)$$

Таким образом, оценка пространственной разрешающей способности по критерию Рэлея производится по импульсному отклику РСА на одну точечную цель. Объективным преимуществом рассмотренного метода является простота и эффективность методики измерения пространственного разрешения РСА, позволяющей использовать небольшое количество разнесенных одиночных точечных отражателей, используемых для усреднения значения измеряемой ширины функции отклика.

При лётных и валидационных испытаниях РСА функция отклика на ОТЦ исследуется путём непосредственной съёмки объекта, являющегося физической моделью одиночной точечной цели – уголкового отражателя или активного транспондера. Для проведения измерений ФО на ОТЦ создаются специальные полигоны, на которых устанавливаются миры разрешения, составленные из уголковых отражателей [2]. Достаточно одного пролета над полигоном, чтобы определить пространственное разрешение испытываемого РСА методом импульсного отклика с усреднением результатов. В случае необходимости результат может быть пересчитан к критерию Рэлея.

Для автоматизированного определения пространственного разрешения РСА разработано специальное программно-математическое обеспечение (ПМО), проводящее расчеты как по цифровой радиоголограмме (ЦРГ) миры разрешения, так и по ее РЛИ. Отработка ПМО проводилась на модельных ЦРГ, а также по ЦРГ и РЛИ мир разрешения, полученных самолетными РСА.

Однако следует учесть, что летные и валидационные испытания проводятся после запуска космического РСА, что существенно ограничивает возможности коррекции параметров аппаратуры по их результатам. Чтобы сократить до минимума время летных и валидационных испытаний РСА, зарубежные разработчики стремятся

перенести все возможные проверки, вплоть до измерения диаграммы направленности, на наземные испытания и предполетную подготовку.

В плане подготовки к эксплуатации системы РСА Sentinel-1, разработанном Европейским Космическим Агентством, на полетную валидацию и калибровку после запуска отводится не более 3 месяцев. Заказчики считают, что если РСА по истечении отведенного срока не подтверждает заявленные параметры и не будет получено РЛИ соответствующего качества, то это будет расцениваться как провал проекта [3].

Таким образом, оценка пространственного разрешения РСА должна проводиться как можно раньше: при моделировании и проектировании составных частей локатора, во время наземных испытаний, подтверждаться во время предполетной подготовки. Желательно иметь общую методику проверки сквозных характеристик РСА, которая будет использоваться на всех этапах испытаний [4].

Покажем, как МИО может быть применен для наземных проверок РСА и его составных частей. Рассмотрим (рис. 2) схему формирования в РСА КРЛИ $\hat{J}(x, r)$ как реакции на входное воздействие (поле коэффициента обратного рассеяния $\hat{s}(x, r)$). Здесь функция отклика РСА определяется характеристиками трёх групп процессов: 1) взаимного движения РЛС и объекта съёмки, 2) формирования и приёма зондирующих сигналов и 3) синтеза изображения с учётом априорных данных о параметрах двух остальных процессов. При этом только параметры процесса 2) связаны с характеристиками испытываемой аппаратуры.

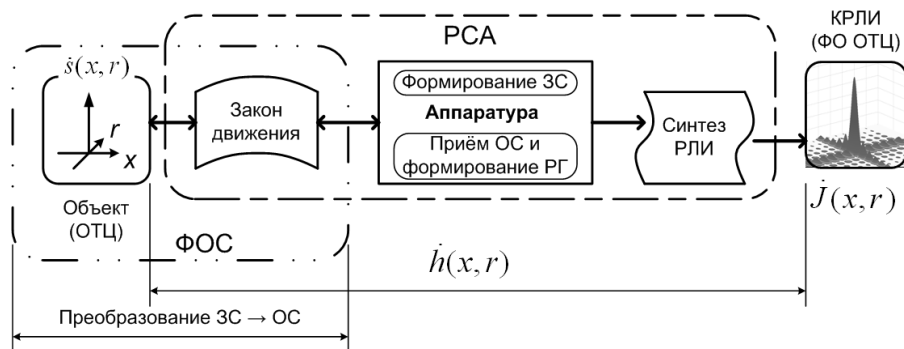


Рис. 2. Схема формирования изображения в РСА

По схеме также видно, что закон преобразования серии зондирующих импульсов (ЗИ) в серию отражённых сигналов определяется характеристиками двух процессов: 1) отражения серии ЗИ от объекта с полем коэффициента обратного рассеяния $\hat{s}(x, r)$, являющегося входным воздействием на систему РСА, и 2) взаимного движения РЛС и объекта, которое является звеном процесса съёмки и участвует в формировании функции отклика.

Задачей составления методик наземных испытаний аппаратуры РСА является формулировка такого определения функции отклика, чтобы последняя, в отличие от общего случая съёмки, являлась бы однозначной характеристикой испытываемой аппаратуры и соответствовала бы некоторому частному случаю преобразования зондирующих сигналов в отражённые, которое можно аппаратно реализовать на стенде или полигоне. При этом определение испытательной функции отклика должно иметь такой вид, чтобы по её характеристикам, при условии подстановки параметров движения для реальных условий съёмки в каком-либо режиме, можно было рассчитать вид функции отклика на ОТЦ и пространственное разрешение РСА в этом режиме съёмки. Подробное описание методик наземных испытаний, основанных на МИО, и стенда полунатурного моделирования, на котором проводились испытания макета

космического РСА высокого разрешения, приведено в [8]. На стенде обеспечивалась возможность изменения таких параметров съёмки, как уровни сигнала и шума, отношение сигнал/шум, доплеровское изменение начальной фазы отражённого сигнала.

Испытания составных частей РСА, от формирователя зондирующего импульса до макета, содержащего приёмо-передающую аппаратуру и фрагменты АФАР, проводились по единым методикам, основанным на МИО. Сходство результатов испытаний аппаратуры и математического моделирования подтверждает правильность разработанных методик. Следует отметить, что по методикам, основанным на МИО, проводились испытания самолётных РСА с модуляцией зондирующего сигнала кодом Баркера и ЛЧМ [9].

Таким образом, метод импульсного отклика может быть использован на всех этапах жизненного цикла РСА, начиная от его проектирования и заканчивая процедурами калибровки и валидации, периодически выполняемыми в процессе его эксплуатации. Именно этот метод реализует комплексный системный подход к созданию и эксплуатации РСА, а также к подтверждению характеристик как самого РСА, так и его выходного продукта.

Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора комического базирования / Под ред. В.С. Вербы – М.: Радиотехника, 2010.
2. Школьный Л.А., Толстов Е.Ф., Детков А.Н. и др. Радиолокационные станции воздушной разведки, дешифрование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008.
3. Schwerdt M., Döring B., Zink M., Schrank D. In-Orbit Calibration Plan of Sentinel-1 // EUSAR-2010. – P.350.
4. Лепёхина Т.А. Системный подход к созданию сложных радиотехнических комплексов – путь к успеху // Мат. научн. конф. «Зеленоград – космосу». – М.: Зеленоград, 2011.
5. Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В.Т. Горяинова – М.: Радио и связь, 1988.
6. Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Сиганьков В.И. Результаты лабораторных испытаний макета космического радиолокатора с синтезированной апертурой // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Материалы VI НТК, г. Адлер. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2009.
7. Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Методы наземной проверки сквозных характеристик космического РСА на стенде полунатурного моделирования // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Материалы VII научно-технической конференции, г. Адлер. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2010.
8. Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Стенд полунатурного моделирования для проверки сквозных характеристик космических РСА // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Материалы VII научно-технической конференции, г. Адлер. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2010.
9. Лепёхина Т.А., Лось В.О., Николаев В.И., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Четверик В.Н. Результаты макетирования и испытаний фрагмента космического РСА с зондирующим сигналом, модулированным М-последовательностью // Материалы НТК «Актуальные вопросы создания информационно-управляющих систем воздушного и космического базирования». – М.: ОАО «Концерн радиостроения «Вега», 2011.