

Программно-математическое обеспечение для оценки показателей качества радиолокаторов с синтезированной апертурой

А.А. Баталов, Т.А. Лепёхина, В.И. Николаев, М.А. Семёнов

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

Разработано программно-математическое обеспечение (ПМО) для оценки пространственного разрешения РСА методом импульсного отклика. Описанное ПМО позволяет выявлять отклонения в работе локатора и определять факторы, влияющие на качество радиолокационного изображения (РЛИ).

Test software for SAR spatial resolution estimation using Impulse response method is developed. The proposed software facilitates instrument troubleshooting and detecting factors affecting radar image quality.

Одним из основных параметров, характеризующих качество РСА, является пространственное разрешение. В качестве метода, на основании которого разработаны методики и программно-математическое обеспечение, выбран метод импульсного отклика (МИО) [1]. Согласно предложенным методикам, при испытаниях и процедурах валидации используются цифровые радиоголограммы (ЦРГ), по которым выполняется синтез первичных комплексных изображений. Такие РЛИ содержат информацию, необходимую для диагностики РСА и выработки рекомендаций по возможным способам улучшения качества съёмки. Кроме этого, качество изображений оценивается и по результатам вторичной обработки.

Разработанное ПМО содержит ряд средств предварительного анализа данных ЦРГ, позволяющих выявлять факторы, влияющие на качество РЛИ, до его синтеза. Например, проанализировав гистограмму отсчётов ЦРГ, можно подобрать оптимальный уровень сигнала в приёмном тракте для данных условий или констатировать нарушение требуемых условий съёмки, так как выработка рекомендаций по выявлению и устранению отклонений от штатной работы также является задачей валидации и калибровки. По виду спектра принятого сигнала, рассчитанного по данным ЦРГ, можно проконтролировать наличие сигнала на входе и соответствие вида его модуляции заданному режиму, а также получить оценку отношения сигнал/шум на входе приёмника ещё до синтеза изображения.

Таким образом, предложенный комплект ПМО осуществляет следующие функции.

1. Синтез радиолокационного изображения (РЛИ) по модельным, экспериментальным или летным ЦРГ в требуемом режиме.
2. Отображение ЦРГ и её компонентов в двумерном яркостном виде. Отображение РЛИ в виде двумерного яркостного поля и трёхмерной поверхности.
3. Выделение на РЛИ фрагментов, содержащих одиночные точечные цели. Построение функции отклика на ОТЦ и её сечений по координатам наклонной дальности и азимута.
4. Расчёт ширины сечений ФО по уровню минус 3 дБ в размерах пиксела РЛИ.
5. Пересчёт масштаба РЛИ и ширины функции отклика из наклонной дальности и азимута (в пикселах) в горизонтальную и путевую дальности (в метрах) по расчётным данным параметров режима съёмки и траектории носителя.
6. Расчёт интегрального относительного уровня боковых лепестков (БЛ) и относительного уровня максимального БЛ ФО на ОТЦ.

7. Расчёт и отображение параметров ЦРГ, которые могут оказать влияние на качество РЛИ: спектра отражённого сигнала, гистограммы комплексных значений отсчётов.

Так как в настоящее время мы не располагаем ЦРГ, полученными космическими РСА высокого разрешения, для отработки ПМО будем использовать модельные ЦРГ, а также ЦРГ, полученные на макете космического РСА высокого разрешения, при испытаниях самолётных РСА на стендах и лётных испытаниях самолётных РСА.

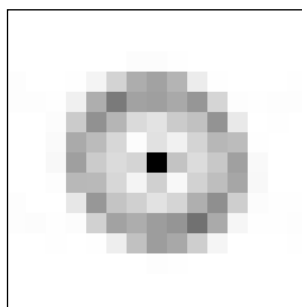
Для экспериментальной отработки созданного ПМО используются модельные ЦРГ, потому что эти ЦРГ могут быть приняты за эталон, так как результат их обработки является предсказуемым. Это особенно важно при работе с космическими РСА, использующими новые типы модуляции зондирующего сигнала, когда вид функции отклика (ФО) на ОТЦ заранее не известен.

Выходными данными ПМО для оценки основных показателей качества РЛК ДЗЗ по моделям ЦРГ являются:

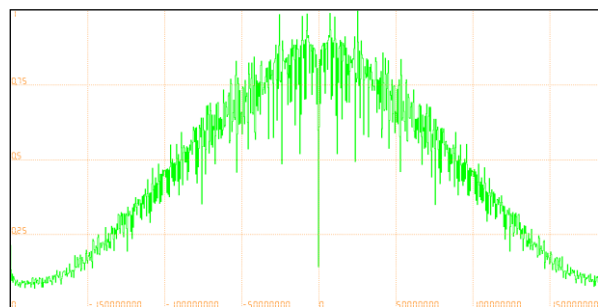
- радиолокационное изображение одиночной точечной цели и его сечения по дальности и азимуту;
- спектр сигнала;
- гистограмма распределения отсчётов в ЦРГ;
- ширина функции отклика по дальности и азимуту;
- пространственная разрешающая способность;
- уровень максимального бокового лепестка;
- интегральный уровень боковых лепестков.

Программное обеспечение разработано в среде Visual C++ для IBM-совместимого персонального компьютера.

На рис. 1 представлены результаты анализа средствами ПМО ЦРГ, записанной на стенде полунатурного моделирования при испытаниях макета космического РСА высокого разрешения с модуляцией зондирующего сигнала М-последовательностью: гистограмма (а) и восстановленный спектр сигнала (б).



а) Двумерная гистограмма отсчетов ЦРГ



б) График спектра сигнала

Рис. 1. Результаты анализа экспериментальной ЦРГ средствами ПМО

По виду гистограммы можно определить изменение фазы отсчётов (распределение фазы близко к равномерному) и наличие шума, уровень которого меньше амплитуды сигнала. Группировка отсчётов с нулевым значением соответствует паузе перед началом и после окончания зондирующего импульса.

По виду спектра можно определить, что сигнал модулирован псевдослучайной последовательностью большой длины, для которой наблюдается характерный провал огибающей спектра на центральной частоте. Это свидетельствует также о хорошем качестве фазового модулятора. Симметричная форма огибающей свидетельствует об отсутствии ограничений полосы пропускания, переотражений и искажений сигнала в

тракте. Наличие конечного уровня спектра на краях отображаемого диапазона частот является признаком наличия шума приёмника. Форма отображаемой части спектра (один лепесток огибающей спектра прямоугольного импульса) соответствует частоте выборок АЦП, вдвое превышающей частоту модуляции.

Пространственная разрешающая способность РСА по дальности и азимуту определяется методом импульсного отклика по ширине соответствующих сечений ФО на ОТЦ на уровне минус 3 дБ от уровня максимума. Сечения функции отклика на одиночную точечную цель по дальности и азимуту приводятся для визуальной оценки пространственного разрешения (рис. 2, 3). Для повышения точности измерения ширины функции отклика применена интерполяция методом «раздвижки спектра» [2]. По вертикали отображается относительный уровень ФО (за единицу принимается величина главного максимума), по горизонтали – координата точки на РЛИ, отсчитываемая от местоположения главного максимума и выраженная в отсчётах первичного (не аппроксимированного) изображения.

На рис. 2 показаны результаты обработки ЦРГ, полученной при испытаниях макета космического РСА высокого разрешения с модуляцией зондирующего сигнала М-последовательностью на стенде полунатурного моделирования.

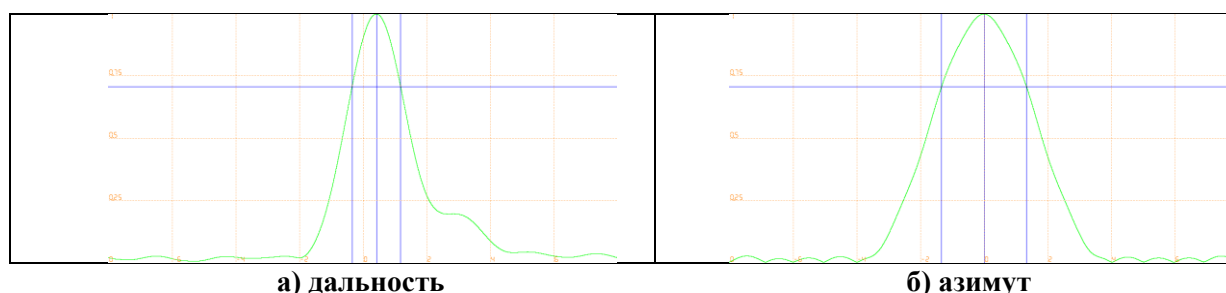


Рис. 2. Графики сечений окрестности максимума ФО по дальности и азимуту для экспериментальной ЦРГ

Графики окрестности главного лепестка ФО в увеличенном масштабе дают возможность обнаружить боковые лепестки, порождаемые отклонениями характеристик приёмно-передающего тракта от расчётных. Например, боковой лепесток в сечении по дальности на рис. 2 а) обусловлен влиянием ограничения полосы пропускания в видеотракте и связанным с этим удлинением его импульсной характеристики.

Для тестирования разработанного ПМО проводилось моделирование исходных данных с расчётными параметрами (ЦРГ без искажений). Для анализа качества РСА проводилось сравнение результатов обработки экспериментальной и соответствующей ей модельной ЦРГ средствами ПМО.

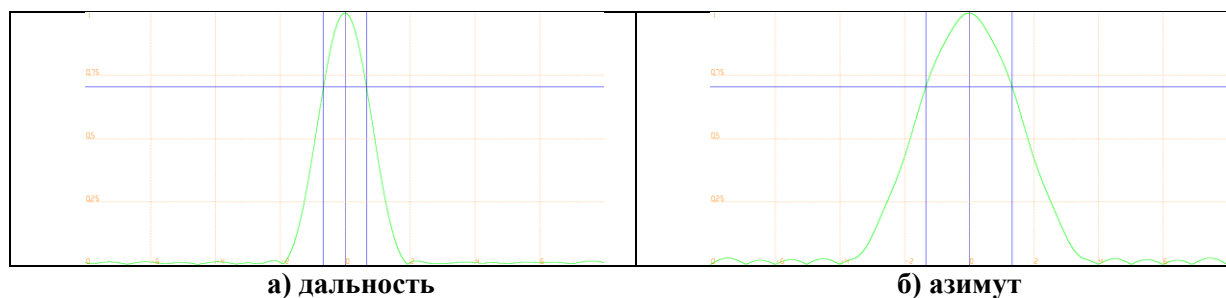


Рис. 3. Графики сечений окрестности максимума ФО по дальности и азимуту для модельной ЦРГ

На рис. 3 приведены сечения главного максимума ФО по дальности и азимуту в окрестности главного лепестка, полученные при обработке модельной ЦРГ с параметрами, соответствующими описанному выше эксперименту.

Графики, показанные на рис. 2, выводятся для визуальной оценки. Значения ширины сечений ФО по дальности и азимуту в отсчётах рассчитываются средствами ПМО и отображаются в главном окне программы, как показано на рис. 4. Следует отметить хорошее совпадение расчётных и экспериментальных результатов.

<p>Разрешение: - Азимут: 2.60отс. - Дальность(накл): 1.62отс.(0.61м) Боковые лепестки: - Интегральный уровень: -5.53дБ - Максимальный -34.74дБ</p>	<p>Разрешение: - Азимут: 2.61отс. - Дальность(накл): 1.44отс.(0.54м) Боковые лепестки: - Интегральный уровень: -6.03дБ - Максимальный -42.66дБ</p>
---	---

Рис. 4. Отображение разрешающей способности в отсчётах и уровней боковых лепестков для экспериментальной (слева) и модельной (справа) ЦРГ

Одним из факторов, определяющих качество РЛИ, являются уровни боковых лепестков ФО на ОТЦ. Средствами макета ПМО выполняется определение как интегрального уровня боковых лепестков, так и максимального бокового лепестка функции отклика на ОТЦ (рис.4). Для экспериментальных ЦРГ существенное влияние на результат измерения интегрального уровня боковых лепестков функции отклика оказывает наличие шума, которым заполнено всё поле радиолокационного изображения. На результат измерения уровня максимального бокового лепестка оказывает влияние импульсная характеристика приёмного радиотракта, вызывающая несимметричное расширение главного лепестка по дальности и проявляющаяся как появление бокового лепестка вблизи главного (см. рис. 2 а).

Разрешающая способность по азимуту в метрах не может быть автоматически определена программой по данным, получаемым из ЦРГ. Для определения разрешающей способности РСА на местности используется специальная мира из 9 уголковых отражателей, установленных в вершинах четырёх квадратов с известной длиной стороны (рис. 5), задающая на местности прямоугольную систему координат. На рис. 5 приведено радиолокационное изображение миры с длиной стороны квадрата 100 м, полученное при лётных испытаниях самолётного РСА с модуляцией кодом Баркера.

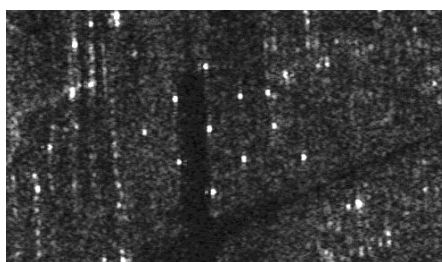


Рис. 5. РЛИ радиолокационной миры для определения пространственного разрешения

Программа должна распознать миру среди множества других ярких объектов на РЛИ. При этом для оценки пространственного разрешения РСА как измерительного инструмента целесообразно иметь РЛИ, полученные при первичной обработке ЦРГ, во избежание ошибок, вносимых вторичной обработкой и потерей информации при преобразовании форматов изображений.

После аппроксимации РЛИ методом «раздвижки спектра» программа выделяет множество локальных максимумов яркости. Если обнаруживается группа локальных максимумов, расположенных на расстоянии менее 8 элементов изображения, то из них выбирается максимальный. Из полученного массива программа выбирает ограниченное число N наиболее ярких точек для поиска контура. Далее по полученному массиву для любых трех точек проверяется наличие максимумов в областях погрешности вокруг ожидаемого местоположения остальных точек мира. При обнаружении нескольких контуров программа выводит контур с максимальным значением средней яркости составляющих контур точек. В разработанной версии ПО имеется режим с возможностью ручного выбора контура из списка обнаруженных.

После распознавания квадратной миры на РЛИ программа по известной длине стороны квадрата выполняет пересчёт ширины ФО по дальности и азимуту, ранее определённой в пикселах, в метры в масштабе, привязанном к местности. Результаты определения пространственного разрешения с использованием радиолокационной миры приведены на рис. 6.

<p>Разрешение: - Азимут: 2.77отс. - Дальность(накл): 1.85отс.(2.77м) Боковые лепестки: - Интегральный уровень: -0.02дБ - Максимальный -0.89дБ</p>	<p>Изображение: Размер точки: 2.31м x 1.00м Угол поворота: -46.08 град. Разрешение по дальности: 4.19м Разрешение по азимуту: 2.64м Между отражателями: 100.0м</p>
--	--

Рис. 6. Отображение разрешающей способности РСА по результатам обработки лётной ЦРГ

В окне, показанном слева, приведены значения разрешающей способности по наклонной дальности и азимуту в отсчётах и оценка в метрах по известной частоте АЦП. В окне справа приведены значения пространственной разрешающей способности на местности по обеим координатам. Значения получены путём усреднения результатов обработки 9 функций отклика от уголкового отражателя радиолокационной миры.

Таким образом, разработанное ПМО позволяет определять разрешающую способность РСА и ряд других параметров, влияющих на качество РЛИ. Разработанное ПМО и предложенные методики, основанные на методе импульсного отклика, дают возможность оценить пространственное разрешение РСА как на этапе наземных и лётных испытаний, так и при выполнении валидационных процедур. Единство методик и применяемых измерительных и программных средств позволяет проводить сравнительный анализ основных характеристик РСА на всех этапах его жизненного цикла.

Рассмотренные методики и ПМО могут быть использованы для испытаний как космических, так и самолётных РСА с различными видами модуляции зондирующих сигналов.

Литература

1. Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Толстов Е.Ф. Определение пространственного разрешения космических РСА методом импульсного отклика // Материалы настоящей конференции.
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.