

Наземная экспериментальная отработка космического РСА методом обращенного синтеза апертуры

А.И. Коваленко, С.Л. Внотченко, М.Ю. Достовалов, В.С. Дудукин, А.С. Ермоленко, Д.В. Орлов, Д.В. Хисматуллин, И.Н. Чечина

АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», 127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51, Alexander.Kovalenko@niitp.ru

Рассмотрены вопросы практической реализации организации и проведения проверок аппаратуры космического радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) по технологии обращенного синтеза апертуры. Изложены методические аспекты подготовки и проведения радиолокационной съемки орбитальных объектов. Представлены результаты анализа характеристик полученных радиолокационных изображений Международной космической станции.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, обращенный синтез апертуры, характеристики радиолокационных изображений, Международная космическая станция

Ground-based experimental development of space-based SAR using the inverse aperture synthesis method

A.I.Kovalenko, S.L.Vnotchenko, M.Y.Dostovalov, V.S.Dudukin, A.C.Yermolenko, D.V.Orlov, D.V.Hismatullin, I.N.Chechina

JSC "Scientific Research Institute of Precision Instruments"

The paper discusses the practical implementation of the organization and testing of space-based synthetic aperture radar (SAR) equipment using the inverse aperture synthesis technology. The methodological aspects of preparing and conducting radar imaging of orbital objects are presenting. The paper presents the results of analyzing the characteristics of the radar images obtained from the International Space Station.

Keiwords: synthetic aperture radar, inverse synthetic aperture, characteristics of radar images, International Space Station

Введение

Космические радиолокаторы с синтезированной апертурой (КРСА) представляют собой мощное средство дистанционного зондирования Земли, позволяющее получать обширную информацию о земной поверхности и объектах, расположенных на ней [1].

Создание бортовой аппаратуры КРСА представляет собой сложный технологический процесс, включающий в себя процедуры изготовления и многоплановой трудоемкой экспериментальной отработки.

Одним из этапов наземных проверок КРСА является проведение т.н. «обращенного эксперимента», при котором аппаратура КРСА расположена на поверхности Земли, а объектом радиолокационного наблюдения является орбитальный объект (спутник). При этом высокое пространственное разрешение по доплеровской частоте, характерное для РСА, реализуется методом обращённого синтеза антенны,

базирующегося на учёте параметров перемещения наблюдаемого объекта относительно РСА при обработке сигнала. Важным достоинством обращённого синтеза является возможность комплексной оценки работоспособности функционального программного обеспечения всех входящих в КРСА устройств и комплекса в целом.

Для КРСА, реализованного на основе активной фазированной антенной решетки (АФАР), в обращённом эксперименте возможно использование антенного устройства неполного размера (с использованием сокращённого числа активных панелей АФАР). В рассматриваемом случае количество панелей относительно штатного образца АФАР уменьшено в 4,5 раза.

Целью испытаний является подтверждение работоспособности и характеристик сквозного информационного тракта получения, преобразования, передачи радиолокационной информации и формирования радиолокационных изображений выбранного космического объекта с использованием обращённого синтеза апертуры.

При этом строгое подтверждение информационных характеристик радиолокационных изображений (РЛИ), формируемых КРСА (разрешающая способность, радиометрическая чувствительность и др.) в рамках данных испытаний невозможно. Это обусловлено следующими основными обстоятельствами:

- наблюдаемый орбитальный объект не является метрологически аттестованной радиолокационной целью;
- синтез РЛИ проводится в условиях отсутствия измерительной информации о параметрах движения центра масс (ПДЦМ) наблюдаемого объекта.

В этих условиях критерием подтверждения проверяемых функций КРСА служат положительные результаты анализа РЛИ объекта по следующим признакам:

- визуальная различимость и узнаваемость объекта наблюдения на РЛИ;
- наличие контраста (перепада яркости между пикселями максимальной и минимальной яркости) РЛИ;
- пространственное разрешение РЛИ в сечении наклонной дальности, оцениваемое по корреляционным характеристикам (радиус корреляции) РЛИ, соответствующее параметрам заданного режима съёмки.

Оценка наблюдаемости орбитального объекта

Анализ различных космических объектов показал, что наиболее подходящим объектом для эксперимента является международная космическая станция (МКС), обладающая значительной геометрической протяжённостью и известной конфигурацией, что при достаточно высоком пространственном разрешении КРСА позволит уверенно идентифицировать этот объект и его отдельные элементы.

Характеристики орбиты МКС: средняя высота 418 км; наклонение орбиты 51,6°; орбитальная скорость станции 7,7 км/с. Ориентировочные размеры МКС (Д×Ш×В): 109 м × 73,2 м × 27,4 м. При наблюдении МКС на широте Москвы максимальный угол возвышения может достигать 36°–40°, что соответствует наклонным дальностям 670–630 км. В зависимости от конкретного витка МКС может наблюдаться по азимуту от юго-восточного до юго-западного направления (~170°–190°).

Неполная конфигурация АФАР влияет на многие важные характеристики радиолокатора. Однако в первую очередь сокращение размеров АФАР приводит к существенному снижению энергетики. Для анализа имеющих место эффектов используем следующие соотношения:

- для мощности отражённого сигнала

$$P_t = \frac{\lambda^3}{(4\pi)^3} \cdot \frac{nP(nG)^2 \Delta F \sigma_t}{2V S_q \Delta l_x L_\Sigma R^3}; \quad (1)$$

– для мощности шума

$$P_n = 1,2 \Delta F K_b (T_a + T_o F_n); \quad (2)$$

– для отношения сигнал/шум

$$q = P_t / P_n, \quad (3)$$

где λ – рабочая длина волны, n – количество активных субпанелей АФАР, P – импульсная излучаемая мощность одной субпанели АФАР, G – коэффициент усиления излучающего полотна одной субпанели АФАР, ΔF – ширина спектра зондирующего сигнала, σ_t – ЭПР отражающего элемента конструкции МКС, V – орбитальная скорость МКС, S_q – скважность излучения, Δl_x – разрешение по азимуту, L_Σ – суммарные потери в системе, R – дальность до отражателя, $K_b = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, T_a – шумовая температура антенны, T_o – опорная шумовая температура, ΔF_n – коэффициент шума приёмника.

Сокращенные размеры АФАР обуславливают 4,5-кратное уменьшение её параметров P и G относительно штатной АФАР. Суммарное падение энергетики КРСА по (1)-(3) по сравнению со штатной бортовой аппаратурой составит примерно 91 раз (или 19,6 дБ). В условиях обращенного эксперимента этот эффект частично нивелируется за счет уменьшения рабочей дальности (650 км вместо 1000 км в штатных условиях наблюдения) и реализации некогерентного накопления.

С помощью соотношений (1)-(3) можно оценить геометрические размеры отражающих элементов конструкции МКС, необходимые для их надёжного обнаружения. При этом используется формула для ЭПР трёхгранного углового отражателя (УО): $\sigma_t = 12\pi^4/\lambda^2$. Имеющийся опыт анализа РЛИ показывает, что хорошее обнаружение (наблюдение) отражающих элементов достигается при величине расчетной вероятности обнаружения $D \geq 0,8$. В таблице 1 приведены значения ЭПР σ_t и соответствующей длины ребра r углового отражателя (УО), необходимые для достижения требуемой вероятности обнаружения.

Таблица 1. Минимальные наблюдаемые ЭПР и размеры элементов

Разрешение, м	1,0		4,0	
Ширина спектра ΔF , МГц	150		37,5	
Некогер. накопление N_n	1	2	1	2
Минимальная ЭПР УО σ_t , м ²	25,9	6,4	79,9	20,5
Длина ребра УО r , м	0,161	0,113	0,213	0,152

Расчёты показывают, что полученные значения минимальных ЭПР составляют примерно 6,5-80 м², а соответствующие им размеры рёбер угловых элементов лежат в пределах от 11 см до 21 см. Это позволяет прогнозировать хорошую наблюдаемость многих элементов МКС на РЛИ в рассматриваемых режимах съёмки.

Методическое обеспечение оценки характеристик РЛИ

Основным средством анализа экспериментальных РЛИ является разработанный АО «НИИ ТП» программный комплекс «Смесь» («SMES»), предназначенный для обеспечения цикла технологических операций по обработке видовой

радиолокационной информации. ПК «Смесь» вторичной обработки и анализа РЛИ обеспечивает решение многих задач, среди которых, в частности, реализуются:

- проведение геометрических измерений по РЛИ, в том числе, оценку разрешения, определение координат, а также расстояний между объектами, расчёт площадей выделенных областей и т.п.;

- проведение измерений энергетических показателей по РЛИ, таких как определение отношений сигнал/шум, а также значений ЭПР отдельных элементов РЛИ или выделенных областей.

Оценка пространственного разрешения. Сформированное РЛИ представляет собой прямоугольный кадр, отображающий уровень собственных шумов радиолокатора, на фоне которых наблюдается совокупность отметок МКС. На РЛИ выделяется фрагмент изображения, содержащий МКС, на котором выбираются несколько ярких точек и формируются их импульсные отклики в виде сечений в плоскостях дальности и азимута.

Для экспериментальной оценки величины пространственного разрешения КРСА Δ по точечному отражателю производится интерполяция сечения функции импульсного отклика в двух плоскостях и определяется ширина отметки на уровне 0,707 (-3 дБ) от максимума отчёта S_o при нижнем уровне, равном среднему значению шумов $\sqrt{P_n}$. Интерполяция реализуется путём формирования малого фрагмента РЛИ в более частой сетке отсчётов, что является достаточно точным методом.

Пространственное разрешение по азимуту и дальности определяется экспериментально с использованием нескольких точечных отражателей, выбранных на изображении МКС, а результаты этих измерений усредняются.

Полученные по РЛИ средние значения разрешения по наклонной дальности $\overline{\Delta l_r}$ и по азимуту $\overline{\Delta l_x}$ учитывают влияние реального тракта аппаратуры и распространение сигналов в атмосфере. Следует отметить, что условия прохождения через атмосферу близки к ожидаемым при визировании штатным радиолокатором из космоса.

В таблице 2 поясняется принцип сопоставления прогнозируемых (расчётных) и экспериментальных оценок.

Таблица 2. Формирование расчётных и экспериментальных оценок

Расчёт	Эксперимент	Коэффициент
Δl_x	$\overline{\Delta l_x}$	$k_x = \Delta l_x / \overline{\Delta l_x}$
Δl_r	$\overline{\Delta l_r}$	$k_r = \Delta l_r / \overline{\Delta l_r}$

Знание коэффициентов k_x и k_r позволяет спрогнозировать пространственное разрешение РСА при его функционировании на орбите.

Уровень боковых лепестков (УБЛ) функции импульсного отклика может быть оценен в том случае, когда интенсивность яркого точечного отражателя имеет амплитуду, превышающую интенсивность шума на 15-20 дБ. Тогда относительный уровень боковых лепестков определяется по формуле

$$B = 20 \cdot \lg (s_{БЛ}/s_{max}). \quad (4)$$

Заметим, что, в отличие от оценки УБЛ, при определении разрешения КРСА требования к яркости отражений могут снижены (например, до $q_{экс.} \approx 10$ дБ).

Расчёт отношения сигнал/шум. Для выделенных областей на изображении осуществляется оценка мощности шума и мощности отсчётов сигнала.

Для оценки мощности шумов на РЛИ выделяются прямоугольные области, расположенные поблизости от МКС, чтобы минимизировать влияние изменения уровня диаграммы направленности АФАР. Мощность шумов рассчитывается по формуле

$$P_n = \frac{1}{M} \sum_m^M u_m^2, \quad (5)$$

где u_m – амплитуды цифровых отсчётов (пикселей), M – количество пикселей в выделенной области.

Для оценки мощности отражений от элементов МКС на РЛИ выделяются, по возможности, изолированные точечные элементы средней яркости и ближайшие к ним отсчёты. Оценка осуществляется по максимальному значению каждого отражённого сигнала. Окончательный результат оценки $q_{\text{эксн}}$ получается после усреднения всех выбранных значений.

Возможны также примерные оценки эффективной площади рассеяния отдельных элементов МКС с использованием формул (1)-(3) при допущении $q = q_{\text{эксн}}$.

Динамический диапазон РЛИ определяется аналогично отношению сигнал/шум, но в виде отношения максимального на изображении сигнала к минимальной мощности шума.

Методика подготовки и проведения сеансов радиолокационной съемки

1 Определение параметров сеанса радиолокационной съемки

При проведении обращенного эксперимента необходимо определить время, азимут и возвышение (угол места) над плоскостью местного горизонта (ПМГ) наблюдаемого орбитального объекта (МКС), сформировать оценку параметров движения центра масс (ПДЦМ) МКС на траектории, в частности, значений дальности и радиальной скорости. Для этого применялось приложение для ПК "Orbitron" [2], которое производит расчеты по модели SGP4.

Входными данными для определения параметров радиолокационного наблюдения МКС являются:

- геодезические координаты фазового центра (ФЦ) АФАР;
- высота положения ФЦ АФАР (рис.1) над уровнем моря (в данном случае 153м)
- прогнозный интервал расчета (в данном случае 1-30 дней);
- минимальный угол места (в данном случае 20°);
- параметры орбиты МКС (считываются из файла TLE через сеть интернет, которые предоставляют NORAD, NASA [3].

Выходными данными расчёта является набор из N отчетов, на запрошенный период времени, каждый из которых содержит информацию о траектории МКС, соответствующий заданным входным параметрам:

- время в формате: год, месяц, день, часы, минуты, секунды;
- угол азимута, отсчитываемый от направления на Север по часовой стрелке;
- угол места МКС;
- расстояние до МКС с точностью ± 5 м;
- геодезическая долгота и широта МКС в градусах с точностью ± 1 м;
- орбитальная скорость МКС с точностью до 1 м/с.

Чтобы обеспечить точное наведение диаграммы направленности (ДН) АФАР необходимо считывать параметры орбиты (эфемериды) МКС и пересчитывать данные для бортового программного обеспечения непосредственно перед сеансом съемки (примерно за 40 минут).

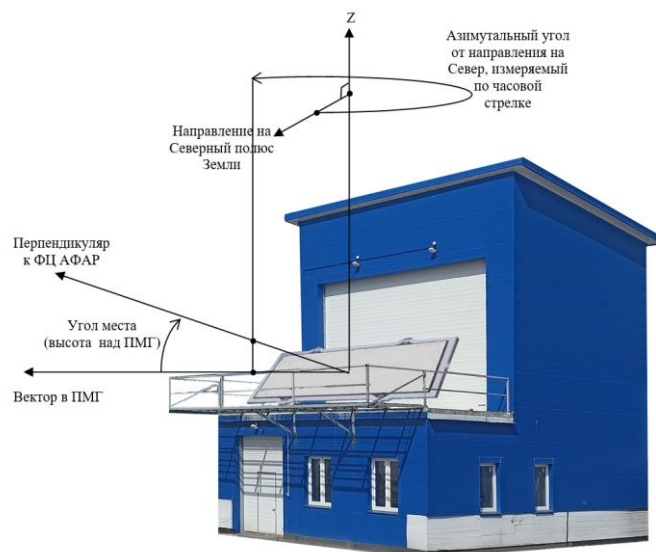


Рис. 1. Строение с испытательной площадкой для проведения обращенного эксперимента

Для оценки временного интервала съёмки вычисляется азимутальный угол траектории МКС в интервале $\pm 3^\circ$ в окрестности точки максимального возвышения МКС. С использованием параболической аппроксимации закона изменения азимута и угла места МКС получаем, что азимут меняется на $\pm 3^\circ$ за $\pm 5,5$ с, а угол места – на $0,05^\circ$. Последнее обстоятельство позволяет отказаться от управления положением луча АФАР во время съёмки.

2 *Ориентирование полотна АФАР* в азимутальном направлении проводится с помощью калиброванного поворотного устройства, на котором размещена аппаратура РСА. Контроль точности установки азимута осуществлялся методом визуальной фиксации (с помощью лазера и оптического визира) геодезически привязанных реперных объектов, отнесенных от наблюдательной позиции на расстояние около 80 м.

После фиксации ориентации АФАР в азимутальном направлении, к её излучающей поверхности и в вертикальной плоскости прикладывается электронный уклономер, с точностью измерений $\pm 0,05^\circ$, позволяющий точно определить ориентацию плоскости полотна АФАР относительно плоскости местного горизонта.

3. *Подготовка бортовой аппаратуры КРСА.* Параметры функционирования аппаратуры КРСА для конкретного сеанса наблюдения (отклонение луча АФАР по углу места, период повторения зондирующих импульсов, ширина спектра сигнала и др.) вводятся в вычислитель бортовой аппаратуры РСА посредством специального технологического ПО через штатную контрольно-проверочную аппаратуру.

Результаты радиолокационных съемок орбитального объекта

В рамках обращенного эксперимента реализовано три сеанса радиолокационной съёмки МКС, основные параметры которых представлены в таблице 3.

Пример одного из РЛИ в сравнении с оптическим изображением, примерно в том же ракурсе, дан на рис. 2 и позволяет визуально оценить качество изображения МКС. Направление полета МКС – слева направо; направление возрастания дальности – сверху вниз.

Таблица 3. Параметры сеансов радиолокационной съёмки

№ п/п	Параметр	№ сеанса		
		1	2	3
1.	Дата проведения сеанса	2.11.25	6.11.25	9.11.25
2.	Время проведения сеанса	02:42:49	01:07:03	23:31:44
3.	Максимальный угол возвышения, град	40.1	40.0	40.0
4.	Азимут, град	180.1	180.3	179.3
5.	Минимальная дальность, км	631.1	630.3	630.3
6.	Поляризация «передача/прием»	H/(H+V)	H/(H+V)	V/(H+V)
7.	Ширина спектра, МГц	37.5	150	150
8.	Расчётное разрешение по дальности, м	4	1	1

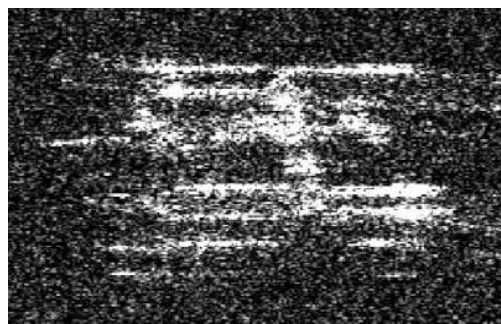
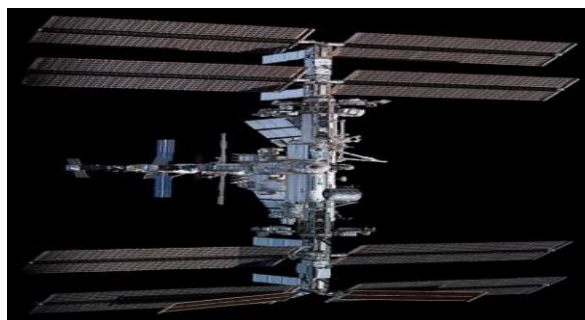


Рис. 2 Оптическое (слева) и радиолокационное (справа) изображения МКС

Параметры радиолокационных изображений МКС. Ниже приведен анализ радиолокационных изображений МКС, полученных в сеансе съёмки 09.11.2025.

Визуальная связь между радиоголограммой (РГГ) и радиолокационным изображением (РЛИ) представлена на рис. 3.

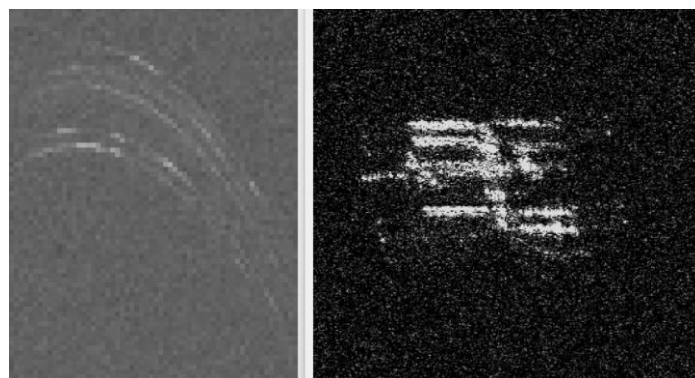


Рис. 3. Результаты обработки данных съёмки 09.11.2025. Слева – радиоголограмма, обработанная по каналу дальности («сжатая» радиоголограмма), справа – синтезированное РЛИ

Обработка выполнена по данным для поляризационного канала VV. Слева на рисунке приведена обработанная (сжатая по дальности) радиоголограмма, справа – синтезированное РЛИ. Как и выше, направление полета МКС – слева направо; направление возрастания дальности – сверху вниз.

Реализованные параметры сигнала радиоголограммы получены в маршрутном режиме. При этом размер антенны по азимуту составлял порядка 0,9 м, частота дискретизации 180 МГц, ширина полосы сигнала 150 МГц, частота повторения импульсов составляла 9363 Гц, что привело к наличию доплеровской неоднозначности

в сигнале РГГ. Рис. 3 демонстрирует, что при выставке антенны в азимутальной плоскости имелась ошибка прицеливания порядка $1/3$ ширины диаграммы направленности, т.е. порядка 0.7 градуса относительно направления нулевой доплеровской частоты. Основная часть этой ошибки была скомпенсирована в программе синтеза РЛИ.

Параметры качества радиолокационного изображения. Перечень целевых характеристик КРСА, оцениваемых по результатам анализа РЛИ МКС:

- пространственное разрешение по дальности;
- пространственное разрешение по азимуту.
- ширина полосы захвата.

Дополнительные характеристики КРСА, определяемые по полученным радиолокационным изображениям МКС:

- уровень боковых лепестков (УБЛ) функции импульсного отклика (ФИО);
- отношение сигнал/шум;
- динамический диапазон РЛИ при наблюдении МКС;
- линейные размеры МКС.

Формирование радиолокационного изображения проводилось в интерактивном режиме; при этом компенсация фазовых искажений траекторного сигнала МКС (сигнала, отраженного от МКС во время пролета основного лепестка диаграммы направленности АФАР) осуществлялась оператором путем подбора параметров обработки. Сторонняя информация о параметрах движения МКС не привлекалась.

В сформированном РЛИ размер пикселя по дальности составил $0,832$ м, что соответствует интервалу дискретизации сигнала. Размер пикселя по азимуту – около $0,4$ м.

При оценке характеристик радиолокационного изображения далее на рисунках оно будет приведено в файловой ориентации (горизонтальное направление оси дальности).

Оценка пространственного (линейного) разрешения. На рис. 4 приведены кадры РЛИ, причём яркость правого кадра снижена, что позволяет выделить яркие псевдоточечные элементы, по которым проводилась оценка разрешения и отношения сигнал/шум. На кадре справа данные элементы отмечены рамками. Фрагмент, по которому оценивался уровень шума, на рисунке отмечен как «Шум».

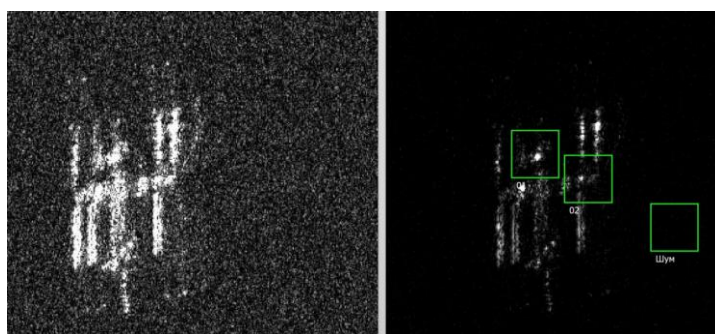


Рис. 4. Кадры РЛИ в файловой ориентации, по которым проводилась оценка разрешения и отношения сигнал/шум

Результаты оценки пространственного разрешения и других параметров приведены в таблице 4. При этом масштаб пикселя по дальности равен 0.8320 м, масштаб пикселя по азимуту равен 0.4000 м.

Таким образом, средняя разрешающая способность по наклонной дальности равна $1,377$ м, а средняя разрешающая способность по азимуту равна $0,812$ м. Из

приведенных оценок следует, что полученная экспериментальная оценка разрешения по дальности 1,377 м отличается от теоретического значения, которое при полосе сигнала 150 МГц составляет 1,0 м. Этот эффект обусловлен погрешностями компенсации фазовых искажений траекторного сигнала, реализуемой при обработке радиоголограммы в интерактивном режиме.

Таблица 4. Экспериментальные оценки параметров

Параметр	ЭПР РЛО	Контраст	Разрешение по дальности	УБЛ по дальности	Разрешение по азимуту	УБЛ по азимуту
Размерность	м ²	дБ	м	дБ	м	дБ
1 РЛО	01	25,62	1,597	-14,086	0,928	0,000
2 РЛО	02	20,65	1,156	-10,469	0,696	-15,387
Среднее		-	1,377	-	0,812	-

На рис. 5 приведены 3-мерные отображения амплитуды одного из фрагментов РЛИ, по которому оценивалось разрешение. Слева приведено исходное отображение амплитуды, демонстрирующее, что вокруг яркого элемента распределены более слабые сигналы от конструкции МКС. Справа показан результат вырезки области яркого элемента на изображении.

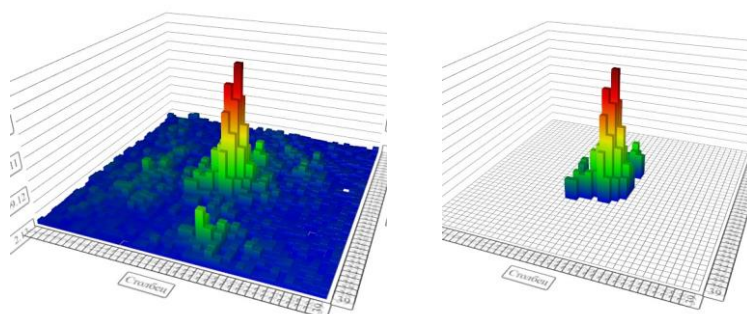


Рис. 5. Трехмерные отображения отклика одного из фрагментов РЛИ

Оценка отношения сигнал/шум по РЛИ основывается на статистических характеристиках амплитуд пикселей радиолокационного изображения, которые по вырезке области яркого элемента составили:

MAX = 790,0; MIN = 136,2; MEAN = 279,6; MSE = 170,62; CVar = 0,610.

Соответственно статистические характеристики амплитуд пикселей РЛИ по ранее выделенной области шума составили:

MAX = 53,5; MIN = 1,55; MEAN = 17,82; MSE = 8,707; CVar = 0,488.

В качестве оценки величины сигнал/шум q было использовано отношение среднего значения мощности сигнала в пределах выделенной яркой области к среднему значению мощности в области шума. Вычисленное таким образом отношение сигнал/шум составило 23,9 дБ. Дополнительной коррекции (учет влияния шума в области сигнала) в данном случае проводилось.

Динамический диапазон РЛИ, определяемый как отношение максимального отсчёта сигнала к минимальному отсчёту шума составил 54,1 дБ.

Данные двух поляризационных каналов. Сравнение синтезированных РЛИ изображений согласованного (VV) и перекрестного (VH) каналов приведено на рис. 6.

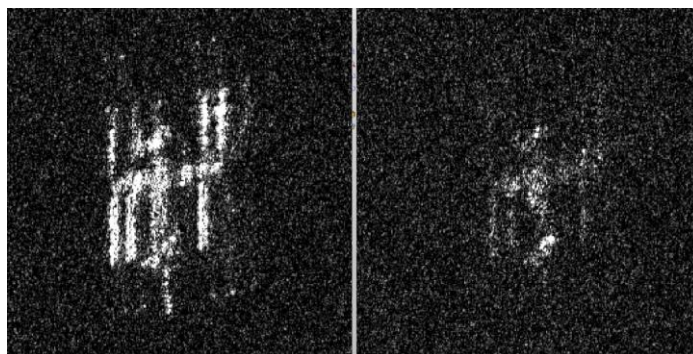


Рис. 6 Сравнение синтезированных радиолокационных изображений согласованного (VV) и перекрестного (VH) поляризационных каналов

Совместный анализ радиолокационных изображений показал, что яркие отклики в VH канале не совпадают с яркими откликами в VV канале. При этом отношение сигнал/шум, определенное по яркой области изображения в VH канале составило 16 дБ.

Особенностью данных канала перекрестной поляризации (VH) явилось существенное снижение амплитуды отраженного сигнала, в результате чего сигнал на сжатой по дальности радиоголограмме фактически не наблюдался.

Оценка геометрических размеров и отражательных характеристик МКС. Оценка геометрических размеров станции проводилась в соответствии с рис. 7. На рисунке приведено изображение объекта, на которое нанесены линии оценки геометрических размеров.

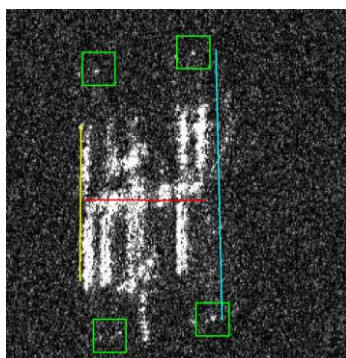


Рис. 7. Оценка геометрических размеров МКС

Оценка размера МКС в направлении дальности выделена горизонтальной красной линией. Длина линии составляет 88 пикселей по 0,832 м, что соответствует 73 м. Учитывая, что фактическая длина МКС примерно равна 109 м, то угол отклонения от нормали к линии визирования составляет около 48° .

Оценка размера ярко отражающей части конструкции станции в направлении азимута выделена вертикальной желтой линией. Длина линии составляет 114 пикселей по 0,4 м, что соответствует 45 м. Фактическая ширина МКС (по солнечным батареям) примерно равна 73 м. тогда угол отклонения от нормали к линии визирования составляет около 52° .

Величину ЭПР выбранного элемента конструкции МКС можно оценить с помощью формул (1)-(3) для известной величины q . В частности, при $q = 23,9$ дБ значение ЭПР отражающего элемента составляет около 175 м^2 .

Выводы

1. Испытания по проверке РСА по технологии обращенного синтеза апертуры могут использоваться для целей подтверждения правильности функционирования аппаратуры при излучении, приеме и регистрации радиолокационного сигнала.

2. По результатам анализа параметров радиолокационных изображений орбитального объекта – Международной космической станции, можно судить о реализуемости процесса когерентной обработки радиоголограмм при параметрах радиолокационного наблюдения, близких к штатным.

3. Анализ полученных радиолокационных изображений позволяет проводить оценку геометрических размеров и отражательных характеристик орбитальных объектов наблюдения.

Литература

1. Верба В.С, Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования, 2010.
2. Orbitron - Satellite Tracking System. <http://www.stoff.pl>
3. NORAD GP Element Sets Current Data. <https://celestrak.org/NORAD/elements/>