

Аппаратно-программная имитация и обработка цифровых радиоголограмм при наземных испытаниях космических радиолокаторов с синтезированной апертурой

Т.А. Лепёхина, В.И. Николаев

Государственное унитарное предприятие «Научно-производственный центр «СПУРТ»»,

tatonika@inbox.ru

Аннотация — Изложены способы моделирования тестовых объектов с учётом параметров движения носителя радиолокатора с синтезированной апертурой в виде массива цифровых данных и формирования закона преобразования зондирующего сигнала в отражённый в виде двумерной импульсной характеристики. Описаны аппаратные средства цифровой регистрации и синтеза сигналов. Предложены методики определения пространственного и радиометрического разрешения радиолокатора на этапе наземных испытаний.

Ключевые слова — цифровая обработка сигналов; радиолокатор с синтезированной апертурой; наземные испытания; полунатурное моделирование; радиометрическое разрешение.

I. ВВЕДЕНИЕ

Достоверность оценки параметров космического радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) при наземных испытаниях и получаемых впоследствии с его помощью данных дистанционного зондирования Земли в значительной мере зависит от структуры, качества и продуманности технических решений системы наземной отработки. Необходимость разработки методик, позволяющих провести наземные проверки сквозных характеристик космических локаторов, связана как со сложностью радиолокационного комплекса (РЛК), так и с тем, что отечественные РСА создаются на новой элементной базе после многолетнего перерыва, что не даёт возможности использовать имевшиеся заделы и методики испытаний.

Благодаря прогрессу в развитии мировой микроэлектронной техники и элементной базы, произошедшему за время вынужденной приостановки работ по космическим РСА в России, уже можно создавать наземные испытательные системы на базе серийных АЦП и ЦАП с частотами дискретизации 2 ГГц и выше для регистрации и синтеза широкополосных радиолокационных сигналов с малыми потерями информации. В настоящее время имеются многопроцессорные системы для синтеза произвольных эхо-сигналов в режиме реального времени для наземных испытаний РСА

среднего разрешения [1]. Учитывая темпы развития микроэлектронной и вычислительной техники, в том числе отечественной, создание аппаратной части предлагаемой ниже системы можно считать реальным в ближайшем будущем, поэтому разрабатывать программно-алгоритмическое обеспечение и методики испытаний необходимо уже сейчас.

В формировании радиолокационных изображений (РЛИ) как при съёмке с орбиты, так и при наземных испытаниях задействован ряд систем и процессов [2]: бортовой радиолокационный комплекс (БРЛК), наземная или бортовая система синтеза и вторичной обработки сигналов, движение носителя по орбите, распространение и отражение сигналов. Так как последние два процесса при наземных испытаниях не могут быть воспроизведены натурным способом, то требуется создавать аппаратно-программные средства для их замещения – стенды полунатурного моделирования (ПНМ). Такие стенды должны содержать и средства для замещения отсутствующих элементов РЛК, если его испытания планируется проводить не в полной конфигурации.

Стенды ПНМ для наземных испытаний космического РЛК в полной или неполных конфигурациях должны выполнять следующие функции: 1) приём и запись зондирующего сигнала (ЗС) от испытываемой аппаратуры; 2) формирование ЗС собственными средствами; 3) имитация эхо-сигнала; 4) воспроизведение синтезированного эхо-сигнала и подача на вход приёмника испытываемой аппаратуры; 5) обработка цифровых данных эхо-сигнала и синтез РЛИ собственными средствами; 6) анализ РЛИ по критериям качества.

В данной статье представлены:

– состав и аппаратно-программные средства действующего стенда ПНМ, методики и ПО для проверки пространственного разрешения космических РСА, результаты измерений по этим методикам;

– варианты расширения возможностей стенда путём разработки и включения в его состав устройства цифровой имитации и регистрации сигналов (УЦИРС);

– методика синтеза с помощью УЦИРС эхо-сигналов для измерения радиометрических характеристик РСА на стенде, а в дальнейшем – с помощью активной контрольной станции при лётных испытаниях.

II. МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОСМИЧЕСКОГО РСА НА СТЕНДЕ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Пространственная разрешающая способность является одной из важнейших сквозных характеристик РСА. Системный подход к созданию РСА требует разработки единых методик, которые могут использоваться на всех этапах жизненного цикла радиолокатора, как при лабораторных испытаниях макета, так и для процедур валидации. Разработанные нами методики измерения пространственного разрешения основаны на методе импульсного отклика.

Этот метод предлагается использовать для анализа РСА как линейной системы, выполняющей преобразование двумерного поля обратного рассеяния снимаемой земной поверхности в радиолокационное изображение. Если снимаемый участок местности описывается двумерным полем комплексного коэффициента рассеяния $\dot{s}_{pat}(x, r) = \sqrt{\sigma_0(x, r)} \cdot e^{i\varphi(x, r)}$, где σ_0 – удельная эффективная площадь рассеяния (ЭПР) элемента снимаемой поверхности, φ – сдвиг начальной фазы отражённого сигнала, то его комплексное радиолокационное изображение (КРЛИ) имеет вид:

$$\dot{J}(x, r) = \dot{h}_{SAR}(x, r) * \dot{s}_{pat}(x, r), \quad (1)$$

где $\dot{h}_{SAR}(x, r)$ – двумерная импульсная характеристика, описывающая РСА как линейную систему. В частности, КРЛИ одиночной точечной цели (ОТЦ) с единичной ЭПР $\dot{s}_0(x, r) = \delta(x - x_t, r - r_t)$, находящейся в точке (x_t, r_t) , имеет вид: $\dot{J}_0(x, r) = \dot{h}_{SAR}(x, r) * \delta(x - x_t, r - r_t) = \dot{h}_{SAR}(x - x_t, r - r_t)$. Вид импульсной характеристики РСА совпадает с видом КРЛИ ОТЦ, расположенной в начале координат РЛИ, и зависит от режима съёмки и синтеза. Таким образом, согласно методу импульсного отклика, элементарным входным воздействием на РСА является одиночная точечная цель, а откликом – её двумерное комплексное изображение, называемое функцией отклика (ФО) и рассматриваемое как импульсная характеристика РСА.

Если при съёмке с орбиты одиночная точечная цель формирует единственный канал распространения зондирующего сигнала, то при наземных испытаниях на стенде полунатурного моделирования [2] качественным имитатором ОТЦ является шлейф (одноканальный тракт передачи зондирующего сигнала с выхода передатчика на вход приёмника, образуемый кабелями и аттенюаторами, а при необходимости также переносчиком частот).

Фрагмент стенда, на котором проводились испытания макета космического РСА, показан на фото (рис. 1). Подробное описание стенда приведено в [3].

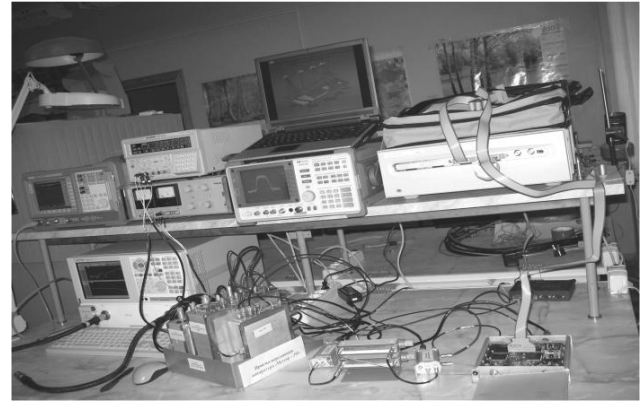


Рис. 1. Фрагмент стенда полунатурного моделирования

При подготовке к испытаниям макета космического РСА высокого разрешения с модуляцией зондирующего сигнала М-последовательностью на нашем предприятии был создан комплект тестового ПО для обработки экспериментальных цифровых радиолограмм (ЦРГ) и оценки пространственного разрешения методом импульсного отклика [4].

На рис. 2 представлена экспериментальная ЦРГ одиночной точечной цели, полученная на стенде ПНМ при испытаниях макета космического РСА высокого разрешения «ЭЛСАР» с модуляцией зондирующего сигнала М-последовательностью, изготовленного нашим предприятием. ЦРГ представлена в форме матрицы: в каждую строку записаны отсчёты входного сигнала, соответствующие одному импульсу; количество строк соответствует количеству импульсов в сеансе.

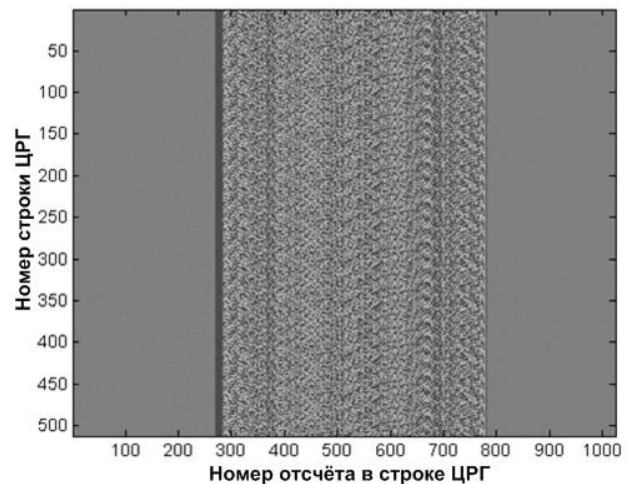
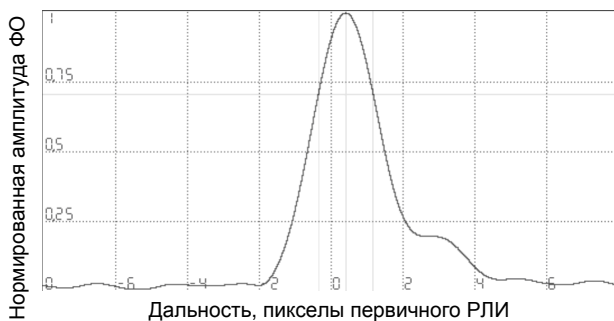


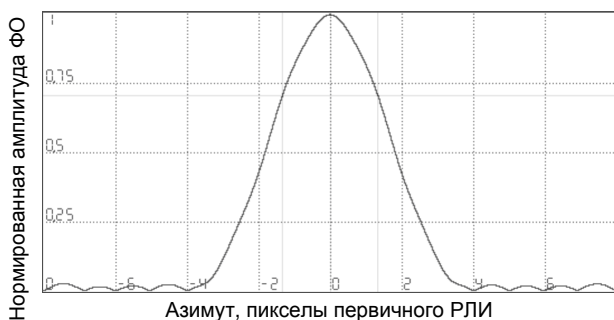
Рис. 2. Экспериментальная ЦРГ одиночной точечной цели

В результате обработки ЦРГ средствами ПО стенда ПНМ получены сечения функции отклика по дальности и азимуту (рис. 3) для оценки пространственного разрешения космического РСА методом импульсного

отклика. На рис. 3 в увеличенном масштабе представлена окрестность главного максимума ФО. Размерность горизонтальной шкалы – отсчёты РЛИ. По вертикали отложено нормированное значение ФО (максимум принят за 1).



а) дальность



б) азимут

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

Разрешение по дальности и азимуту определяется в отсчётах выходного изображения по ширине ФО на уровне минус 3 дБ. Для более точного определения ширины главного лепестка, обычно составляющей менее одного отсчёта РЛИ, использована интерполяция методом «раздвижки спектра» [5]. Пересчёт масштаба РЛИ в метры при наземных испытаниях выполняется по методикам, приведенным в [5], по известным характеристикам зондирующего сигнала, расчётным данным орбиты носителя и ракурса съёмки, а при лётных испытаниях – по изображению радиомишенного полигона с известными расстояниями между опорными точками.

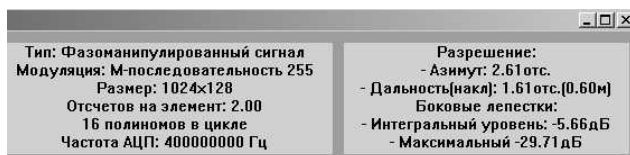


Рис. 4. Пример отображения результатов обработки ЦРГ в главном окне программы

Средствами испытательного ПО выполняется расчёт пространственного разрешения и уровней боковых лепестков. Ширина полосы частот зондирующего сиг-

нала в представленном эксперименте составляет 200 МГц. На рис. 4 приведен пример отображения результатов обработки ЦРГ в главном окне программы.

Результаты проверок разработанного нашим предприятием макета РСА высокого разрешения «ЭЛСАР» подтвердили возможность достижения расчетной пространственной разрешающей способности 1 м. Как описано в [3], имитация условий отражения зондирующего сигнала от земной поверхности осуществлялась посредством шлейфа. Для определения радиометрических характеристик РСА и усовершенствования методик измерения пространственного разрешения требуется разработка и включение в состав стенда ПНМ устройства цифровой имитации и регистрации сигналов (УЦИРС), что значительно расширит возможности стенда ПНМ по имитации испытательных воздействий.

III. АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ТЕСТОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ РСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВА ЦИФРОВОЙ ИМИТАЦИИ И РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ

Аппаратно-программный комплекс, содержащий УЦИРС, взаимодействующее с компьютерной системой формирования исходных данных (СФИД), позволит преобразовывать зондирующий сигнал от испытываемого БРЛК на наземных испытаниях в массив цифровой информации расчётного вида для синтеза обратного сигнала и, тем самым, формировать требуемое испытательное воздействие на РСА практически любого вида в соответствии с проверяемым режимом съёмки без необходимости организации реального полёта и устройства полигона. В частности, способ использования синтезированных эхо-сигналов от распределённых целей для автоматизированного измерения радиометрических характеристик РСА не только на лётных, но и на наземных испытаниях описан в разделе V.

Использование в наземной аппаратуре быстродействующих и многоразрядных АЦП и ЦАП позволит реализовать цифровую регистрацию и воспроизведение радиолокационных сигналов с сохранением информации, необходимой для анализа качества аналогового тракта БРЛК. Возможные ограничения в части длительности тестовых сеансов съёмки и размеров имитируемых сюжетов для технических реализаций на конкретных этапах разработки связаны с пропускной способностью информационных интерфейсов цифровых осциллографов и генераторов сигналов произвольной формы, а также ёмкостью их буферных запоминающих устройств.

Центральным элементом усовершенствованного стенда полунатурного моделирования является УЦИРС, содержащее высокоскоростные модули АЦП и ЦАП. Структурная схема УЦИРС приведена на рис. 5. Опытный образец УЦИРС представляет собой сборку VХI-модулей «Информтест», включающую 8-разрядный цифровой осциллограф МОСЦ-6 с частотой дискретизации 5 ГГц и модифицированный 14-разрядный генератор сигналов произвольной формы

МГВЧ с частотой дискретизации 2,5 ГГц. Такой комплект аппаратуры обеспечивает цифровую регистрацию и воспроизведение сигналов с произвольной модуляцией в полосе частот до 500 МГц на промежуточной частоте 600 МГц. Оба типа серийных модулей содержат долговременное ОЗУ объёмом 512 МБ для буферного хранения данных входных и выходных сигналов. УЦИРС в такой конфигурации под управлением специального ПО позволяет осуществлять имитацию сигналов, отражённых от сложных целей, в режиме генерации сигнала из предварительно подготовленного массива данных. Предполагаются дальнейшие усовершенствования рассмотренных модулей и наращивание их конфигурации.

Сеанс тестовой съёмки при наземных испытаниях БРЛК организуется следующим образом: 1) БРЛК передаёт зондирующий сигнал – серию импульсов, который с помощью УЦИРС записывается в виде массива цифровых данных; 2) специальное ПО системы формирования исходных данных осуществляет пересчёт этого массива в данные для синтеза, имитируемого эхо-сигнала; 3) сеанс тестовой съёмки с такими же исходными данными запускается на БРЛК повторно, и на вход его приёмника подаётся синтезированный эхо-сигнал от УЦИРС.

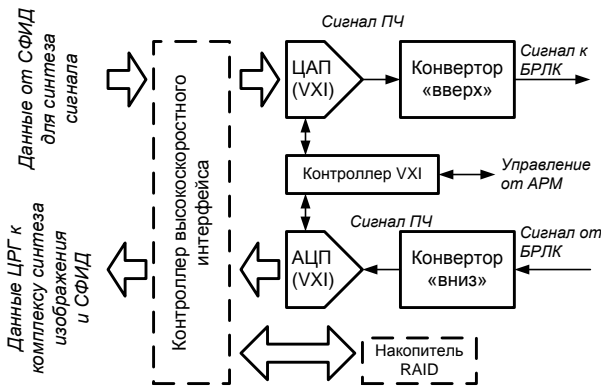


Рис. 5. Структурная схема УЦИРС

Управление режимами работы УЦИРС, формированием данных и анализом тестовых РЛИ осуществляется оператором средствами автоматизированного рабочего места.

IV. ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ СИНТЕЗА ЭХО-СИГНАЛОВ

Аппаратно-программный синтез эхо-сигнала по данным записанного зондирующего сигнала или его модели производится по следующему принципу.

Процесс радиолокационной съёмки до получения первичного комплексного РЛИ, описываемый формулой (1), можно представить в виде двух последовательно выполняемых процессов: 1) формирование отражённого сигнала, являющегося векторной суперпозицией отражений ЗС от элементов снимаемой поверхности, и 2) двумерное сжатие ЦРГ и его преобразование в первичное КРЛИ [5, 6]. Соответственно,

входящую в (1) импульсную характеристику РСА можно представить в виде:

$$\dot{h}_{SAR}(x, r) = \dot{h}_{syn}(x, r) * \dot{h}_{hol}(x, r), \quad (2)$$

где двумерная импульсная характеристика $\dot{h}_{hol}(x, r)$ описывает процесс преобразования поля комплексного коэффициента рассеяния в радиоголограмму, $\dot{h}_{syn}(x, r)$ – процесс синтеза первичного РЛИ.

Если тестовый участок описывается двумерным полем коэффициента рассеяния $\dot{s}_{pat}(x, r)$, то для имитации отражённого сигнала в проверяемом режиме съёмки с учётом заданных параметров движения носителя требуется синтезировать на выходе УЦИРС эхо-сигнал вида:

$$\dot{u}_{hol}(x, r) = \dot{h}_{hol}(x, r) * \dot{s}_{pat}(x, r). \quad (3)$$

В свою очередь, формирование эхо-сигнала от снимаемого участка является результатом трёх процессов: 1) генерация зондирующего сигнала, который является последовательностью модулированных импульсов $\dot{u}_{snd}(t, \tau)$, где время τ – аргумент комплексной функции, описывающей закон внутриимпульсной модуляции зондирующего и отражённого сигналов, время t – задержка начала зондирующего импульса от начала сеанса съёмки; 2) отражение зондирующего сигнала от каждого элемента снимаемой фигуры с комплексным коэффициентом рассеяния $\dot{s}(x, y)$; 3) формирование эхо-сигнала как суперпозиции элементарных отражённых сигналов с учётом суммарных задержек распространения зондирующего и отражённого сигналов на линиях вниз и вверх.

Если в выражении $\dot{u}_{snd}(t, \tau)$ для условий реального полёта выполнить замены переменных: $\tau = 2r/c$, $t = x/V$, где r – изменение наклонной дальности до элементарной цели, дающее изменение задержки отражённого сигнала τ , c – скорость распространения радиоволн, V – скорость движения подспутниковой точки по трассе, x – координата подспутниковой точки на земле в момент полёта t , то огибающая зондирующего сигнала может быть представлена как функция от тех же пространственных координат (x, r) , которые являются аргументами всех функций, входящих в (1), (2): $\dot{a}_{snd}(x, r) = \dot{u}_{snd}(t, \tau)$. Тогда входящую в (3) импульсную характеристику, описывающую формирование эхо-сигнала, можно представить в виде:

$$\dot{h}_{hol}(x, r) = \dot{h}_{orb}(x, r) * \dot{a}_{snd}(x, r), \quad (4)$$

где $\dot{h}_{orb}(x, r)$ описывает формирование суперпозиции парциальных отражённых импульсов с учётом движения носителя по орбите. Таким образом, комплекс УЦИРС – СФИД в составе стенда ПНМ должен вы-

полнять преобразование зондирующего сигнала, описываемого огибающей $\dot{a}_{snd}(x, r)$, в эхо-сигнал $\dot{h}_{hol}(x, r) = \dot{h}_{at}(x, r) * \dot{a}_{snd}(x, r)$ путём вычисления его свёртки с импульсной характеристикой $\dot{h}_{at}(x, r) = \dot{h}_{orb}(x, r) * \dot{s}_{pat}(x, r)$. Для наиболее простых режимов съёмки и синтеза преобразование $\dot{h}_{orb}(x, r)$ допускает разделение переменных и является по координате r тождественным, а по координате x – операцией, обратной сжатию по азимуту.

Двумерную импульсную характеристику УЦИРС $\dot{h}_{at}(x, r)$ удобно представить в форме матрицы, количество строк которой совпадает с количеством зондирующих импульсов в сеансе, а каждая строка содержит импульсную характеристику, с которой должна сворачиваться комплексная огибающая импульса зондирующего сигнала для получения огибающей соответствующего импульса эхо-сигнала. В зависимости от возможностей аппаратной реализации УЦИРС и СФИД, свёртка вычисляется в режиме предварительной подготовки данных или в режиме реального времени.

Учитывая применение в УЦИРС высокоскоростных АЦП и ЦАП, позволяющих выполнять цифровую запись и воспроизведение сигналов в полосе промежуточных частот, следует отметить, что завершающей операцией подготовки исходных данных для синтеза эхо-сигнала является пересчёт данных комплексного видеосигнала в массив одномерных отсчётов сигнала промежуточной частоты. Обратная операция (цифровое преобразование Гильберта для получения данных в комплексной форме [7]) с необходимым преобразованием частоты выборок выполняется над данными записанного на промежуточной частоте зондирующего сигнала.

Таким образом, подготовка исходных данных УЦИРС для проведения измерений радиометрических характеристик включает: 1) предварительное формирование тестового поля удельной ЭПР с изложенными выше характеристиками, выполняемое специалистом по испытаниям средствами специального ПО рабочего места; 2) формирование матрицы импульсных характеристик УЦИРС с помощью комплекта ПО СФИД; 3) получение в цифровом виде зондирующего сигнала (регистрация с выхода передатчика или моделирование); 4) формирование массива данных для синтеза эхо-сигнала.

V. ИЗМЕРЕНИЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЦИРС

Для измерения радиометрических характеристик (разрешения, шумового эквивалента и динамического диапазона), если требования сформулированы для съёмки однородных распределённых целей, необходимо по известному (записанному) зондирующему сигналу синтезировать эхо-сигнал от последовательности таких участков, соответствующих следующим требо-

ваниям для проверяемого режима: 1) соотношение УЭПР смежных участков должно соответствовать требованию по радиометрическому разрешению; 2) минимальное значение УЭПР должно быть на 3...5 дБ ниже расчётного значения шумового эквивалента; 3) соотношение максимального значения УЭПР и расчётного значения шумового эквивалента при экспериментальном определении последнего должно быть на 3...5 дБ ниже расчётного значения динамического диапазона РЛИ, а при экспериментальном определении динамического диапазона – наоборот, на 3...5 дБ выше его расчётного значения; 4) должен иметься участок с нулевым коэффициентом рассеяния, по которому определяется уровень собственного шума.

Амплитудное РЛИ имитационной модели тестового участка из 16 площадок с шагом возрастания УЭПР 2 дБ, полученной с использованием программных средств MATLAB, приведено на рис. 6. На рис. 7 показан график результата его усреднения по дальности.

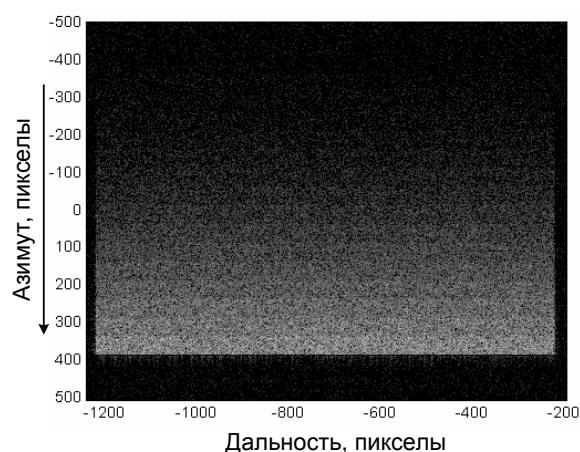


Рис. 6. РЛИ модели тестового участка

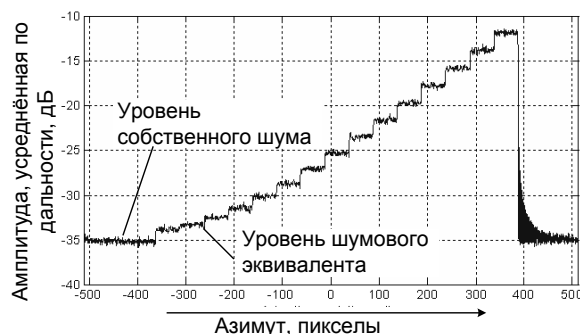


Рис. 7. Профиль усреднённой амплитуды РЛИ

Каждый из штатных режимов съёмки, как правило, содержит следующие последовательно выполняемые операции: 1) формирование одного или нескольких первичных КРЛИ; 2) преобразование каждого КРЛИ в скалярную функцию по закону модуля или квадрата; 3) усреднение полученных таким образом амплитудных или энергетических РЛИ или фильтрация другого вида; последние две операции составляют вторичную обработку. Анализ полученного таким образом вто-

ричного РЛИ, радиометрические характеристики которого могут быть значительно улучшены по сравнению с первичным [8], проводится по методу дифференциального радиоконтраста, основанному на подсчёте плотности вероятности численных значений радиояркости элементов изображения каждого из пары однородных участков снимаемой поверхности и вычислении вероятности правильного распознавания этих участков [9].

VI. СИНТЕЗ ТЕСТОВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ЛЁТНЫХ И ВАЛИДАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Полунатурное моделирование тестовых эхо-сигналов для РСА останется необходимым и после запуска космического РСА – на этапе лётных испытаний и валидации. Эта функция будет поддерживаться автоматической контрольной станцией, предназначенной для измерительного приёма зондирующих сигналов от БРЛК и передачи обратно калиброванных тестовых сигналов при испытаниях и калибровке. Имитация эхо-сигналов от сложных целей с помощью АКС будет применяться, в частности, для измерения радиометрических характеристик по той же методике, которая описана выше для стенда ПНМ.

Так же, как и для стенда ПНМ, основным средством синтеза эхо-сигналов в составе автоматической контрольной станции будет являться аппаратно-программный комплекс УЦИРС – СФИД. Принцип подготовки исходных данных для синтеза эхо-сигнала при реальном полёте БРЛК аналогичен используемому на стенде ПНМ и отличается только тем, что (4) приобретает вид $\dot{h}_{hol}(x, r) \equiv \dot{a}_{snd}(x, r)$, тогда как на стенде для имитации эффектов движения носителя вычислительными средствами необходима свёртка с импульсной характеристикой \dot{h}_{orb} .

При лётных испытаниях РСА основным режимом синтеза эхо-сигналов для автоматической контрольной станции должен быть режим реального времени. Для реализации этого режима аппаратура УЦИРС поэтапно должна получить следующие усовершенствования: 1) оборудование модулей АЦП и ЦАП высокоскоростным интерфейсом для чтения и загрузки полезных данных в режиме реального времени, при этом средством промежуточного хранения данных будет служить массив жёстких дисков или твердотельное запоминающее устройство; 2) замыкание цепочки передачи данных через высокопроизводительный сигнальный процессор или многопроцессорное устройство, подобное описанному в [1].

VII. ВЫВОДЫ

Предложенные аппаратно-программные средства цифровой регистрации, обработки и синтеза сигналов дают возможность при наземных испытаниях обеспечить проверки РСА в режимах съёмки и синтеза, близ-

ких к штатным. Разработанные методики позволяют определить пространственное разрешение и радиометрические характеристики путём автоматизированных измерений.

Отмечены проблемы, которые должны быть решены для создания полномасштабной системы преобразования сигналов в режиме реального времени: создание информационного интерфейса с пропускной способностью не менее 2,5 ГБ/с, а также быстродействующего сигнального процессора или многопроцессорной системы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wen L., Tao Z. Design and Implementation of Real-time SAR Echo Simulator for Natural Scene // Proc. of 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar Conference EUSAR 2010 (Aachen, Germany, 2010). P. 657-660.
- [2] 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. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, г.Адлер, 2010. С. 231-236.
- [3] 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 научно-технической конференции «Актуальные вопросы создания информационно-управляющих систем воздушного и космического базирования». – М.: ОАО «Концерн радиостроения «Вера», 2011. С. 102-111.
- [4] Лепёхина Т.А. Моделирование комплекса наземных испытаний космического радиолокатора с синтезированной апертурой на основе теории сложных систем // Вопросы радиоэлектроники. Серия: радиолокационная техника (РЛТ). М., 2008. Вып. 1. С. 72-82.
- [5] Радиолокационные станции воздушной разведки, дешифрование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008.
- [6] Neronskiy L.B., Verba V.S., Kurochkin A.P., Los V.F., Osipov I.G., Ostrovsky A.G. Modelling of Signal Transformation in Spaceborne UWB Short Pulse SAR // Proc. of 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar Conference EUSAR 2006 (Dresden, Germany, 2006). P. 02-06.
- [7] Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.
- [8] Захаров В.Д., Толстов Е.Ф., Четверик В.Н. Оценка радиометрических характеристик РСА по модулю сигнала с позиций метода дифференциального радиоконтраста // Радиопромышленность. 2011. Вып. 4. С. 110-121.
- [9] Захаров В.Д., Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Толстов Е.Ф., Четверик В.Н. Аппаратно-программная реализация методов контроля радиометрических характеристик космических РСА // Вопросы радиоэлектроники. Сер. СОИУ. 2012. Вып. 2. С. 182-196.