

**Федеральное агентство связи РФ**  
**ГОУВПО**  
Поволжская государственная академия телекоммуникаций и  
информатики

Кафедра теоретических основ радиотехники и связи  
(ТОРС)

Методические указания к лабораторной работе по курсу  
**«Радиотехнические системы»**  
(РТС)

# **Формирование изображений в цифровых РЛС с синтезированной апертурой антенны**

Авторы-составители:  
проф. Горячкин О. В.,  
доц. Хабаров Е. О.

Редактор: проф. Горячкин О. В.

Рецензент: проф. Карташевский В. Г.

2005г.

**Цель работы:** изучение основных принципов и алгоритмов формирования изображений в цифровых радиолокаторах с синтезированной апертурой (РСА) на примере обработки радиоголограмм авиационной РСА L-диапазона «МАРС» (разработка ИРЭ НАН Украины).

## **КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРИМЕНЕНИЯ РСА**

### **1. Радиолокационные методы дистанционного зондирования Земли**

Первыми радиолокационными системами (РЛС), которые нашли применение в дистанционном зондировании, были авиационные радиолокаторы бокового обзора. Они использовались в военной авиации в основном для разведывательных целей и навигации. Появление в 50-х годах прошлого века авиационных радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) явилось следствием борьбы за улучшение пространственного разрешения.

При использовании метода синтезированной апертуры, высокое разрешение достигается формированием искусственного раскрыва в результате поступательного движения летательного аппарата, несущего антенну, которая излучает зондирующие импульсы в направлении, перпендикулярном линии пути.

Последовательные положения реальной антенны в пространстве, соответствующие каждому излученному импульсу, могут рассматриваться как элементы некоторой синтезированной антенной решетки. При этом горизонтальный размер синтезированной антенны обратно пропорционален физическому размеру реальной антенны и может быть сделан очень большим. Соответственно, пространственное разрешение в РСА может быть сделано достаточно высоким независимо от высоты полета летательного аппарата, кроме этого, появляется возможность использования рабочей длины волны вплоть до нескольких метров без существенной потери пространственного разрешения.

В настоящее время РСА находят все большее применение в различных технологиях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а в некоторых из них, например, исследование динамических процессов в океане, РСА признается, как единственно возможный инструмент для получения достоверной информации. Это объясняется двумя основными обстоятельствами, отличающими РСА от датчиков дистанционного зондирования, работающих в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра:

- РСА способны получать радиолокационные изображения (РЛИ) поверхности Земли вне зависимости от состояния облачного покрова и освещенности поверхности;

· РЛИ несет в себе зависимость от некоторых специфических характеристик подстилающей поверхности: динамика поверхности, диэлектрическая постоянная, микрорельеф.

РЛС бокового обзора – основное средство в дистанционном зондировании морских льдов, проводки судов во льдах. С помощью информации РЛС удается не только картографировать ледовые поля, но и определять толщину льда, его происхождение, состояние; определить структуру трещин и динамику их развития. Особенно успешно с помощью радиолокационных данных решаются задачи определения характеристик приводного ветра (скорость, направление), а также прогноза энергии ураганов, контроля зон штормов и сильного волнения.

РСА космического и авиационного базирования эффективно используются для военных приложений. Это системы разведки, целеуказаний, системы дистанционного обнаружения мин и т. п. Эффективность использования РСА в этой области связана с возможностью этих систем, обеспечивать решение задачи независимо от погодных условий и времени суток, а также с высокой геометрической точностью.

РСА авиационного базирования появились в начале 60-х годов и использовались для задач разведки и картографии. Для синтеза изображений в этих системах использовались оптические устройства, при этом разрешающая способность РСА достигала 10–15 м.

Первым космическим радиолокатором для построения изображений поверхности Земли была аппаратура космического аппарата (КА) Seasat-A (США). Аппарат был запущен на околополярную орбиту высотой 800 км в июне 1978. Радиолокатор имел рабочую длину волны 23 см и горизонтально поляризованное излучение, угол визирования поверхности был фиксированным и составлял 20 градусов от надира. Ширина полосы захвата РСА Seasat, т.е. ширина участка местности, попадающей на изображение, была 100 км, а разрешение приблизительно 25 метров. Результаты эксплуатации РСА Seasat превзошли все ожидания и показали высокие информационные возможности РЛИ не только при наблюдении процессов в Мировом океане, но и для наблюдения природных объектов и явлений на суше, ледового и растительного покровов Земли, а также во многих других приложениях дистанционного зондирования. Это обстоятельство вызвало резкий рост интереса к подобным системам и послужило толчком к активизации исследовательских работ в области практического применения радиолокационных данных, создания аппаратных средств космических РСА, методов обработки радиолокационной информации.

В последующие почти 25 лет после запуска КА Seasat было реализовано несколько проектов космических РСА – SIR-A/B (США), SIR-C/X-SAR (США, Германия, Италия), ERS-1/2, ENVISAT (Европейское сообщество), JERS (Япония), КА «Алмаз» (СССР), RADARSAT (Канада).

Эксплуатация этих систем преследовала в основном исследовательские цели: отрабатывались и проверялись аппаратные решения, методы и техника

обработки радиолокационных данных, технологии измерения характеристик природных объектов и явлений по радиолокационной информации. В аппаратуре использовались частотные диапазоны L (23 см), S (10 см), C (5 см), X (3 см), активные (SIR-A/B/C, JERS) и пассивные (ERS-1/2, X-SAR, «Алмаз») фазированные антенные решётки, применялись средства управления углом визирования поверхности (SIR-A/B/C) и режимами работы (ERS-1,2), обеспечивалась одновременная съёмка на нескольких поляризациях и частотах (SIR-B/C/X-SAR). В области техники обработки радиолокационной информации был сделан окончательный выбор в пользу цифровых методов и средств.

С середины 90-х гг., с запуском КА RADARSAT (Канада) в 1995 г. в развитии космических РСА обозначился следующий этап – переход к эксплуатационным системам, предназначенным для решения конкретных научных, хозяйственных и коммерческих задач.

Отдельно необходимо отметить программу SRTM (США), которая предусматривала проведение в 1999 г. масштабных экспериментов с многочастотным однопроходным РСА-интерферометром. Основная цель 11-суточного полета Space Shuttle/Endeavour по программе SRTM – сбор данных с целью последующего формирования цифровых топографических карт поверхности Земли в диапазоне от 56° ю. ш. до 60° с. ш. (приблизительно 80 % территории суши). Абсолютная точность восстановленного рельефа составила 20 м в плане и 16 м по высоте для С-диапазона, 3–5 м для X-диапазона. Пространственное разрешение космических РСА, сегодня, как правило, не лучше 3 м, а рабочая длина волны находится в диапазоне от 3 см (X диапазон) до 25 см (L-диапазон).

Развитие радиолокационной картографии и геодезии, коммерческих приложений ДЗЗ требует увеличения пространственной разрешающей способности. Сегодня пространственное разрешение в X диапазоне ограничено регламентом радиосвязи (ограничение на полосу частот) на уровне 1 м, в тоже время современные технологии РСА могут обеспечить разрешение до единиц сантиметров при увеличении используемой полосы частот, что может быть достигнуто в высокочастотных диапазонах (X, Ku, K).

Достижение высокой разрешающей способности РСА по азимутальной координате требует эквивалентного повышения требуемой точности знания параметров относительного движения космического аппарата и поверхности Земли. При этом современное состояние авиационных и космических навигационных систем не позволяет обеспечивать требуемые точности (единицы метров). Данная проблема встала, в первую очередь, перед разработчиками авиационных РСА в 90-х годах и привела к интенсивным исследованиям в области создания методов автоматической фокусировки радиолокационных изображений. В результате этих исследований были разработаны алгоритмы адаптивного синтеза апертуры (алгоритмы автофокусировки), обеспечивающие требуемый уровень пространственного разрешения.

## 2. Принципы радиолокационного наблюдения поверхности Земли

Радиолокаторы бокового обзора (РБО) являются естественной модификацией импульсных РЛС кругового обзора при размещении их на летательном аппарате (ЛА). В отличие от РЛС кругового обзора антенна РБО неподвижна относительно корпуса ЛА и развёртка радиолокационного изображения поверхности Земли обеспечивается движением ЛА.

Радиолокационное изображение (РЛИ), облучаемой поверхности Земли формируется из амплитуды переотражённых в обратном направлении зондирующих импульсов РЛС и является модулем комплексного коэффициента обратного рассеяния поверхности Земли. Каждый отражённый импульс является строчкой дискретного РЛИ, столбцами, которого являются отсчёты отражённых импульсов.

Размер РЛИ (или полоса захвата РБО) по оси  $Y$  определяется шириной диаграммы направленности антенны РБО в этом сечении –  $\theta_y$ , углом места  $\varphi$ , и высотой ЛА –  $h$  (см. рис. 1). В предположении плоской отражающей поверхности:

$$W = h \left( \frac{1}{\cos\left(\varphi + \frac{\theta_y}{2}\right)} - \frac{1}{\cos\left(\varphi - \frac{\theta_y}{2}\right)} \right). \quad (1)$$

Очевидно, что размер РЛИ вдоль оси  $X$  ограничен только временем работы РЛС.

Линейная разрешающая способность по азимуту РБО (вдоль оси  $X$ ) характеризует возможность различения на РЛИ двух близкорасположенных точечных целей, и определяется шириной диаграммы направленности антенны в сечении азимута и наклонной дальностью до цели:

$$\Delta_x = \theta_x R = R \frac{\lambda}{D_x}. \quad (2)$$

Разрешающая способность РБО по наклонной дальности определяется только типом зондирующего сигнала и при использовании простого радиоимпульса равна  $\Delta_r = c\delta\tau/2$ , а при использовании сложных сигналов определяется эффективной полосой частот сигнала, т. е.  $\Delta_r = c/\Delta f_0 2$ .

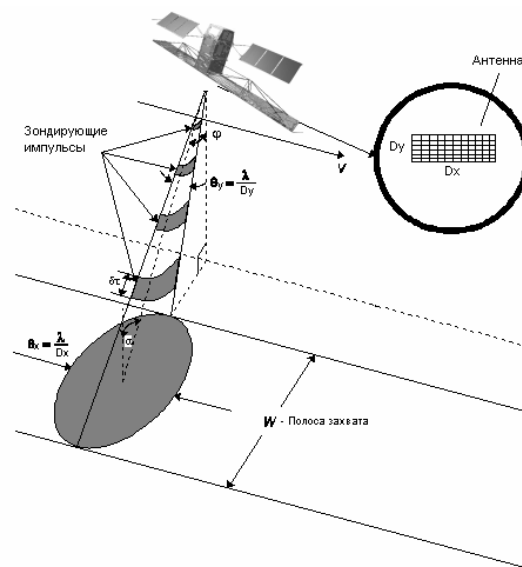


Рис. 1. Принципы построения РСА.

Для решения задачи формирования радиолокационного изображения с заданным качеством важную роль играет разрешающая способность РБО по поверхностной дальности (см. рис. 2), которая зависит от угла падения  $\alpha$ :

$$\Delta_y = \frac{c}{2\Delta f_3 \cos(\alpha)}, \quad (3)$$

и для плоской поверхности равна  $\Delta_r/\sin(\varphi)$ . Данная зависимость показывает, что разрешающая способность РБО по поверхностной дальности резко падает при малых углах места, поэтому РБО обычно работают при углах места  $>10^\circ$ .

Т. о. увеличение разрешающей способности РБО по дальности обеспечивается использованием более широкополосных зондирующих сигналов и легко достижимо, в тоже время увеличение разрешающей способности по азимуту требует увеличения отношения длины антенны к длине волны до величины, сравнимой с расстоянием до цели, что, как правило, сопряжено с большими техническими проблемами.

Альтернативный путь резкого увеличения азимутальной разрешающей способности РБО без увеличения размеров реальной антенны – использование метода синтезирования апертуры антенны, который обеспечивает практически неограниченной увеличение отношение  $D_x/\lambda$ , за счёт использования специальной пространственно-временной обработки отражённых сигналов.

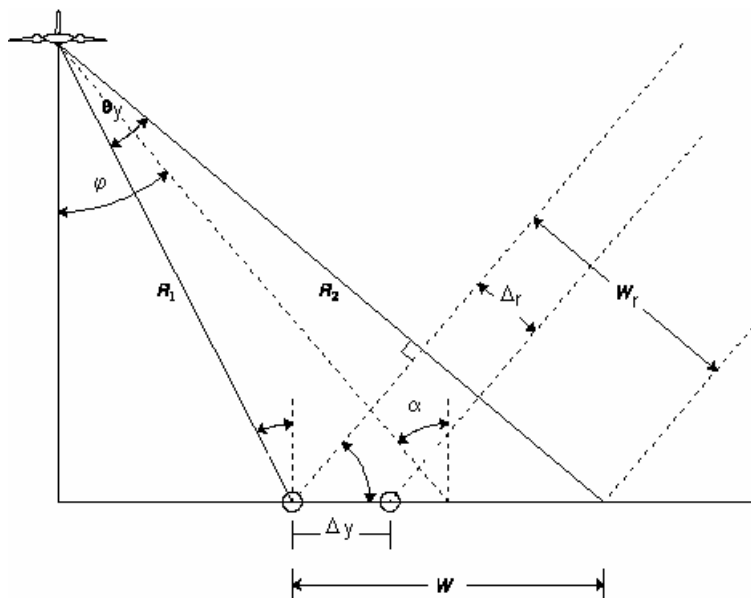


Рис. 2. Разрешающая способность по наклонной и поверхностной дальности.

Радиолокатор бокового обзора, использующий метод синтезирования апертуры для формирования РЛИ с высоким разрешением, называется радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА).

Рассмотрим принцип формирования РЛИ в РСА. Пусть точечная цель облучается последовательностью радиоимпульсов с частотой повторения значительно более высокой, чем в РБО (рис. 3).

В момент времени  $t_1$  приходит первый, отраженный от цели импульс, в  $t_N$  последний. В течение этого времени антенна перемещается в пространстве на расстояние  $L_s$ , которое называют длиной синтезированной апертуры (равна разрешающей способности РБО).

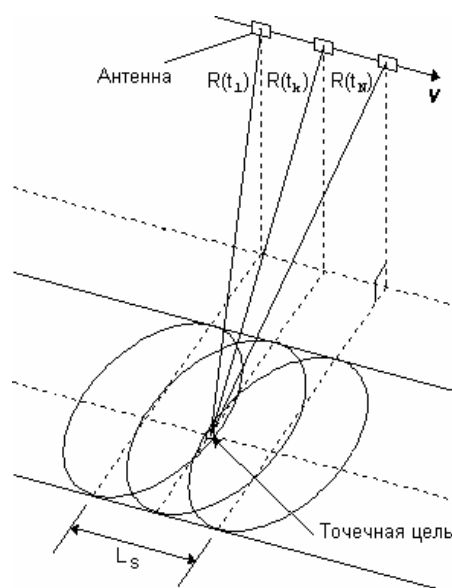


Рис. 3. Принцип синтеза апертуры в РСА.

Каждый  $k$ -й отражённый радиоимпульс в этой пачке получает задержку  $\tau(t_k)=2R(t_k)/c$ , фазовый сдвиг несущего колебания  $\varphi(t_k)=4\pi R(t_k)/\lambda$  и некоторый амплитудный коэффициент, индуцированный диаграммой направленности (ДН) антенны  $G_k$ , зависящие от момента излучения импульса  $t_k$ .

$$s_{omp}(t, k) = \text{Re}\left[G_k \dot{S}(t - \tau(t_k)) \exp(j(\omega_0 t - \varphi(t_k)))\right]. \quad (4)$$

В большинстве случаев достаточно проанализировать квадратичную аппроксимацию  $R(t)$  в окрестности точки траверза цели  $-t_{\text{тр}}$ :

$$R(t) = \sqrt{R(t_{\text{тр}})^2 + (V(t - t_{\text{тр}}))^2} \approx R(t_{\text{тр}}) + \frac{V^2}{2R(t_{\text{тр}})}(t - t_{\text{тр}})^2. \quad (5)$$

Т. о. огибающая пачки отражённых импульсов определяется ДН антенны и квадратичным фазовым набегом, который эквивалентен линейной частотной модуляции пачки импульсов, так как:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi(t) \approx \frac{2V^2}{\lambda R(t_{\text{тр}})}(t - t_{\text{тр}}). \quad (6)$$

Вид такой пачки показан на рис. 4. Частотную модуляцию пачки отражённых импульсов можно объяснить эффектом Доплера, возникающим вследствие движения ЛА. Данная линейная частотная модуляция огибающей пачки отражённых импульсов имеет полосу частот  $\Delta f = 2VL_s/\lambda R$ .

Максимальное квадратичное смещение отражённых импульсов по оси задержки, показанное на рис. 4, как правило, меньше разрешающей способности РСА по задержке  $\delta\tau$  и проявляется только в космических или сверхширокополосных РСА, где носит название эффекта миграции дальности.

Таким образом, в РСА, в отличие от РБО, мы обрабатываем не один отражённый импульс, а пачку импульсов. Комплексная огибающая этой пачки не что иное, как дискретное представление ЛЧМ импульса. Воспользовавшись этим фактом, мы можем сжать этот сигнал вдоль оси  $X$  до величины  $\Delta_x$ , воспользовавшись, например, согласованным с этим сигналом фильтром:

$$\Delta_x = \frac{V}{\Delta f} = \frac{\lambda R}{2L_s} = \frac{D_x}{2}. \quad (7)$$

Т. е. азимутальное разрешение РСА не зависит от расстояния до цели, длины волны, скорости полёта и т.п., и определяется только длиной азимутального раскрытия антенны, причём, чем он меньше, тем выше разрешающая способность РСА. Чем меньше апертура реальной антенны, тем больше  $L_s$ , тем больше отношение длины синтезированной антенны к длине волны, которое мы теперь можем сделать сколь угодно большим. Таким образом, особенность РСА, в необходимости совместной когерентной обработки пачки отражённых импульсов длиной  $N=L_s/\Delta_x$ .





Рис. 4. Траекторный сигнал РСА.

Проблема автофокусировки возникает в РСА тогда, когда линейной частотной модуляцией пачки импульсов в согласованном фильтре (устройство обработки) не совпадает с реальной модуляцией, имеющейся в принятом сигнале. Например, если в (6) мы при расчёте параметров фильтра имеем ошибку в значении скорости  $V$ , то скорость изменения частоты в фильтре и реальном сигнале оказываются различны, при этом фильтр оказывается рассогласованным, и протяжённость сигнала на выходе фильтра будет существенно выше ожидаемых значений (7), т. е. разрешение по азимуту резко ухудшится. К подобному эффекту приведёт и ошибка в расчёте  $R(t_{\text{тр}})$ .

Обычно в современных РСА используют сложные зондирующие сигналы (ЛЧМ, ФМС с M-последовательностями). В этом случае часто удобнее реализовать все этапы обработки сигнала, т. е. сжатие сигнала по дальности и синтез апертуры в едином устройстве обработки. Сигнал с выхода антенны усиливается линейным приёмником, затем подаётся на синхронный детектор (квадратурный расщепитель) и далее каждый квадратурный канал на свой АЦП. Данные (радиоголограмма) с выхода АЦП направляются в устройство обработки (компьютер) или записываются в запоминающее устройство. Для авиационных РСА, в отсутствии эффектов миграции дальности, процедуры сжатия радиоголограммы по дальности и азимуту можно выполнить в виде одномерных линейных цифровых свёрток последовательно.

## ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

В процессе подготовки к выполнению лабораторной работы необходимо изучить области применения, принципы построения, основные тактико-технические характеристики РСА. Внимательно разобрать принцип синтеза апертуры антенны в РСА. Понять принцип цифрового формирования изображений в азимутальной и дальностной плоскостях.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В процессе выполнения работы предполагается формирование радиолокационного изображения (РЛИ) самолётной РСА L-диапазона MARS (Украина). Данный РСА разработан в ИРЭ АН УССР (в настоящее время Исследовательский Центр Радиофизических Методов Дистанционного Зондирования Земли имени А.И. Калмыкова) и установлен на самолёте-лаборатории ИЛ-18Д. Основные характеристики радиолокационного комплекса (РЛК) «МАРС» приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры L-SAR РЛК MARS	Значение
Длина волны, см	23
Поляризация	ВВ,ГГ
Пространственное разрешение, м×м	3×25
Полоса захвата, км	30
Высота полёта, км	7...10
Тип зондирующего сигнала	ЛЧМ

Обработка по координате наклонной дальности (сжатие ЛЧМ импульса) в этой системе осуществляется на аппаратном уровне (используется ультразвуковая линия задержки), поэтому цифровое восстановление РЛИ осуществляется только в сечении путевой дальности (азимута).

Радиоголограмма РСА размещена в двух файлах S01.CRD и S01.SRD, которые содержат 6092 отражённых от поверхности Земли импульсов на выходе 2-х квадратурных каналов приёмника РСА по 768 комплексных отсчётов на каждый отражённый импульс.

Записанный фрагмент получен в декабре 1990 года при полёте самолёта-лаборатории над городом Самара в западном направлении вдоль береговой линии р. Волга, примерно от пр-та Кирова до ул. Революционной по азимуту и от р. Самара до р. Волги по дальности. Синтезированное радиолокационное изображение этой голограммы показано на рис. 5.

В процессе выполнения работы предполагается формирование фрагмента РЛИ с использованием комплекса программ интерактивной обработки радиолокационных изображений. При этом исследуется формирование РЛИ с использованием алгоритмов прямой свёртки, алгоритма с квантованием фазы, алгоритма интерактивной фокусировки, алгоритма автофокусировки по статистическим критериям качества изображения.



**Рис. 5.** РЛИ г. Самара.

### **КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ ИНТЕРАКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ «FOCUS»**

Программный комплекс написан на языке C в среде QC, для ЭВМ работающих под управлением операционной системы MS DOS.

Программа предназначена для азимутальной обработки радиоголограмм РСА авиационного базирования.

Исходными файлами для работы программы являются два файла содержащие оцифрованный сигнал косинусного и синусного канала РСА с произвольным именем и расширением `crd` и `srd` соответственно.

Файлы имеют строчно-кадровую структуру, где каждый байт – отсчёт сигнала, каждая строка – канал дальности.

Первое окно предлагает ввести следующие параметры радиоголограммы (рис. 6).

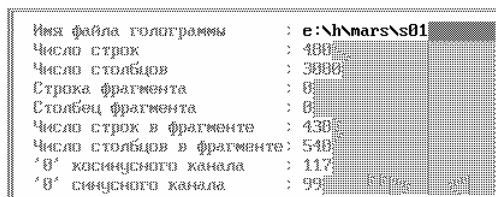
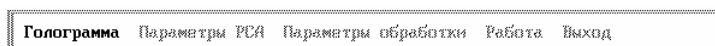


Рис. 6. Первое окно ввода исходных данных.

Во втором окне предлагается ввести параметры авиационной РСА, необходимые для настройки программ обработки.

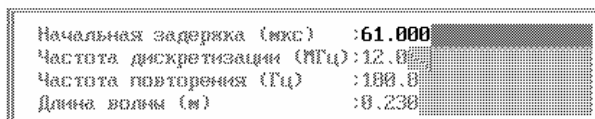
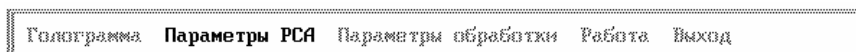


Рис. 7. Параметры РСА.

Третье окно описывает параметры и режимы работы РСА, необходимые для последующей обработки (рис. 8).

Параметры обработки:

**F** – параметр фокусировки, равный эквивалентной скорости РСА,

**A** – параметр, равный азимутальному разрешению при обработке.

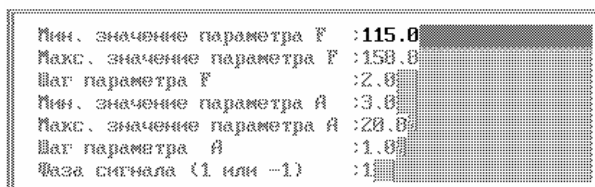
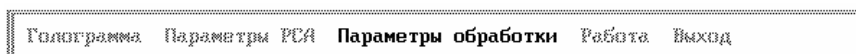


Рис. 8. Параметры обработки.

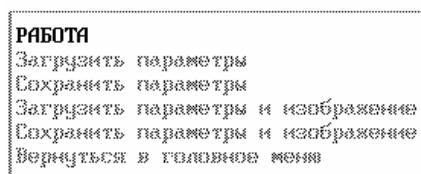
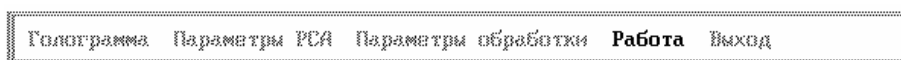


Рис. 9. Режимы работы программы.

Окно диалога, определяющее режим работы программы, предоставляет возможности, показанные на рис. 9. После выбора режима работы программы «Работа» в оперативную память ЭВМ загружается заданный фрагмент радиоголограммы и отображается далее на экране в виде полутонового изображения, яркость которого пропорциональна модулю комплексных отсчетов радиоголограммы. Далее активизируется меню, расположенное в верхней части экрана, которое предлагает возможности дальнейшей обработки (рис. 10.).

Выбор опции «**Оперативный синтез**» приводит к появлению на экране предварительного РЛИ, обработанного со средними значениями параметров разрешения и фокусировки, заданных в меню «**Параметры обработки**». На рис. 10 и рис. 11 экраны компьютера представлены в инвертированном виде.

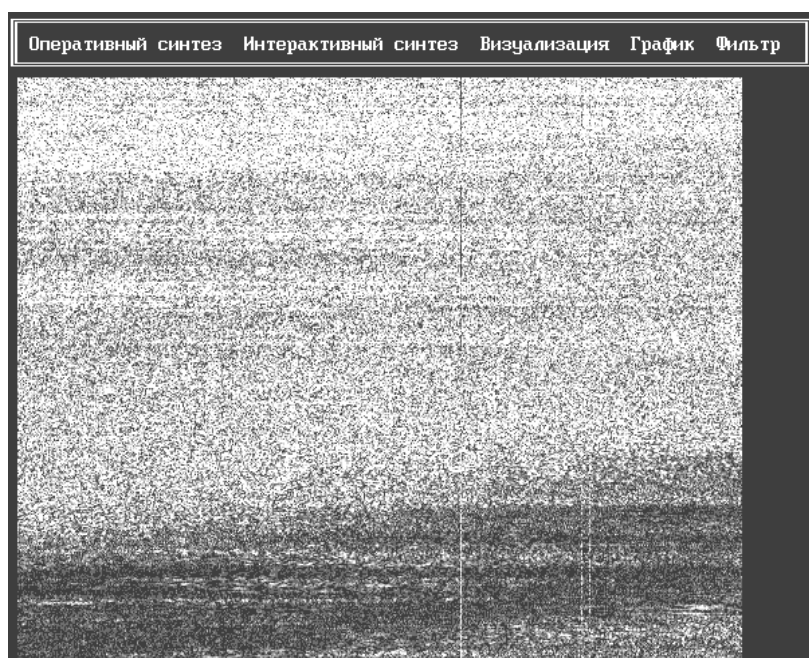


Рис. 10. Виды обработки и визуализации радиоголограмм.

Алгоритм предварительного («грубого») синтеза РЛИ – квазиоптимальный алгоритм на основе квантования фазы, реализованный по схеме «рекурсия по изображению» [7], при этом число уровней квантования установлено

равным 4. Суть алгоритма в представлении комплексных отсчётов импульсной характеристики (ИХ) цифрового согласованного азимутального фильтра в виде последовательности комплексных чисел, фаза которых равна некоторым фиксированным значениям (квантам), а модуль равен 1.

В этом случае появляется возможность реализовать цифровую комплексную свёртку без операций умножения (подобно тому, как это делается в алгоритме CORDIC в ЦОС). Однако, поскольку ИХ фильтра лишь приближённо соответствует ожидаемому ЛЧМ, качество получаемого изображения несколько хуже, чем при использовании оптимальных алгоритмов прямой свёртки.

Опция **«Интерактивный синтез»** предлагает возможности точной интерактивной подгонки параметров обработки в окне, путём инструментов, показанных на рис. 12. Алгоритм синтеза РЛИ в этом случае – это классическая цифровая линейная свёртка ИХ фильтра с отсчётами радиоголограммы, т. е. алгоритм прямой свёртки.



**Рис. 11.**

Опция **«Размеры окна»** позволяет клавишами курсора подобрать размер локального окна обработки, при этом рядом с окном выводятся размеры в метрах;

Опция **«Перемещение окна»** – позиционирует окно на РЛИ и соответственно на голограмме. В правом нижнем углу экрана выводятся координаты левого верхнего угла окна на голограмме;

Опция **«Фокус»** – визуализирует в окне РЛИ, восстановленное с текущим значением параметра фокусировки и предназначена для «ручной» фокусировки «на глаз»;

Опция **«Контраст»** – управляет яркостью визуализируемого фрагмента;

Опция **«Разрешение»** – определяет уровень разрешения алгоритма в локальном окне;

Опция «**Автофокусировка**» – осуществляет автоматическую фокусировку РЛИ в локальном окне, при заданном разрешении, и определяет параметр фокусировки  $F$ , который далее может быть использован для повторного «оперативного синтеза».

Справа от РЛИ на экране ЭВМ визуализируются текущие параметры обработки, гистограмма РЛИ, построенная по значению отсчётов в обрабатываемом окне, статистические характеристики отсчётов РЛИ в окне обработки: математическое ожидание, дисперсия, эксцесс, энтропия, максимальное значение.

Эти параметры используются в алгоритмах статистической фокусировки в качестве критерия качества обработки РЛИ. Соответственно программа сама может выбрать параметр фокусировки максимизирующий значение эксцесса, дисперсии или максимальное значение отсчёта. В этом суть алгоритма автофокусировки РЛИ.

В режиме «**Автофокус**» осуществляется автоматический перебор параметра фокусировки по критерию минимума энтропии.

После настройки параметров обработки в опции «**Интерактивный синтез**» можно вернуться в предыдущее состояние и произвести синтез всего фрагмента РЛИ.

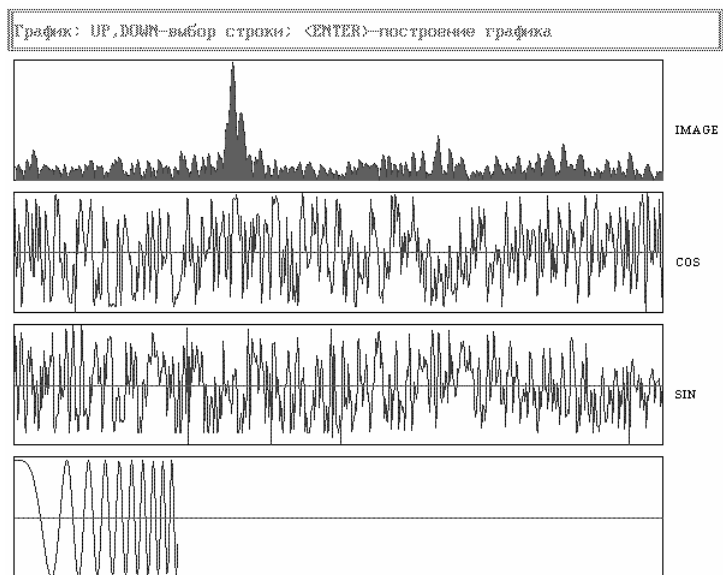


Рис. 12. Автофокусировка фрагмента (в центре РЛИ).

Опция «**Фильтр**» позволяет осуществить фильтрацию фрагмента РЛИ с помощью двухмерного фильтра нижних частот или сигма-фильтра, а также произвести инверсию яркости визуализируемого изображения.

Программа обеспечивает смену масштаба и уровня генерализации визуализируемого РЛИ (опция «**Визуализация**») и отображение любой строки РЛИ в виде одномерного графика (опция «**График**»). В этом случае (рис. 13) для сравнения дополнительно отображается вещественная и мнимая части сигнала голограммы и математическая модель траекторного сигнала РСА, используемая в азимутальной обработке (ИХ азимутального фильтра).

Максимальный размер формируемого фрагмента РЛИ 430×530 отсчётов, поэтому данное программное обеспечение используется для предварительной настройки параметров фокусируемого РЛИ.



**Рис. 13.** Опция «График».

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### **Ввод параметров радиоголограммы.**

Введите имя файла голограммы в соответствующем меню. В меню «Работа» выберите «Загрузить файл параметров». Убедитесь, что новые параметры отображаются в разделах соответствующих окон. Далее выберите опцию «Работа» и наблюдайте загрузку файла голограммы.

### **1. Оперативный синтез РЛИ.**

Выберите опцию «Оперативный синтез» и наблюдайте вывод РЛИ, полученного в соответствии с установленными по умолчанию параметрами. Откорректируйте яркость изображения в меню «Интерактивный синтез» – опция «Контраст», установив параметр контраста примерно (–15...–20) Дб.

### **2. Интерактивный синтез РЛИ.**

Выберите опцию «Интерактивный синтез». Установите окно обработки с размерами примерно 200×400 м на участке РЛИ, соответствующему отражению от Южного моста (см. рис. 5).

Установите разрешающую способность РСА – (4...6 м) и попробуйте подобрать параметр фокусировки, контролируя качество РЛИ «на глаз». Запишите полученное оптимальное, по вашему мнению, значение эквивалентной скорости самолёта-лаборатории.

### **3. Критерии статистической автофокусировки РЛИ.**



**А.** Уменьшите размер окна обработки до  $50 \times 400$  м и установите окно на ярком точечном объекте на РЛИ по вашему выбору. Меняя параметр фокусировки, запишите таблицу значений математического ожидания, дисперсии, энтропии и максимума, соответствующие перебираемым значениям эквивалентной скорости (параметр **F**). Зарисуйте гистограмму фрагмента РЛИ для наиболее «хорошего» значения параметра фокусировки. В отчёте по лабораторной работе постройте графики соответствующих значений критериев фокусировки от значения эквивалентной скорости и определите по ним значение оптимальной эквивалентной скорости самолёта.

**Б.** Повторите пункт «А» на однородном (без ярких целей) фрагменте РЛИ. Сравните и объясните результаты.

#### **4. Автофокусировка РЛИ.**

Установите окно на ярком точечном объекте по вашему выбору. Запустите опцию «**Автофокус**». Запишите значения полученных оптимальных скоростей для различных критериев фокусировки (математического ожидания, дисперсии, энтропии и максимума). Запустите опцию «**Оперативный синтез**» с определённым ранее процедурой автофокусировки параметром эквивалентной скорости. Проанализируйте качество РЛИ на различных участках города. Сделайте выводы.

#### **5. Анализ содержания РЛИ.**

Найдите хорошо вам знакомые районы города. Проанализируйте особенности отражений от различных объектов на РЛИ: тип городской застройки; водная поверхность (ледовый покров), дороги (асфальт, бетон), растительность (скверы, парки). Сформулируйте и запишите качественные выводы об особенностях обратного рассеяния радиоволн в L диапазоне.

#### **6. Подготовка отчёта о выполненной лабораторной работе.**

В отчёте о выполненной лабораторной работе должны быть представлены следующие материалы:

1. Цель и основные этапы работы.
2. Таблица и графики значений критериев фокусировки РЛИ (математического ожидания, дисперсии, энтропии и максимума), соответствующие перебираемым значениям эквивалентной скорости (параметр **F**) для фрагмента «с яркой точкой», гистограмма яркостей в фрагменте для одного значения параметра фокусировки.
3. Таблица и графики значений критериев фокусировки РЛИ (математического ожидания, дисперсии, энтропии и максимума), соответствующие перебираемым значениям эквивалентной скорости (параметр **F**) для фрагмента «с однородным фоном», гистограмма яркостей в фрагменте для одного значения параметра фокусировки.
4. Выводы, анализ и объяснения по п. 3–5.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните принцип действия РЛС бокового обзора. Чем определяется разрешающая способность таких РЛС?
2. Объясните принцип действия РЛС бокового обзора с синтезированной апертурой антенны (РСА).
3. Охарактеризуйте основные области применения РСА для целей дистанционного зондирования Земли. В чём заключаются основные преимущества подобных систем относительно оптических систем наблюдения поверхности Земли?
4. Дайте определение разрешающей способности РЛС. Чем определяется разрешающая способность РСА по азимуту и дальности? В чём отличие разрешения по поверхностной и наклонной дальности?
5. В чём суть эффекта миграции дальности в РСА? Объясните, чем определяется величина этого эффекта? К каким последствиям для алгоритма синтеза апертуры приводит учёт этого эффекта при обработке?
6. Чем отличаются понятия точечной и протяженной цели? Какие Вы знаете статистические модели рассеяния протяжённых целей?
7. Дайте определение ЭПР точечной цели. От каких тактико-технических характеристик РЛС зависит ЭПР цели?
8. Дайте определение удельной ЭПР отражающей поверхности. Объясните механизм зеркального и диффузного рассеяния протяжённых целей.
9. Изобразите типовую структурную схему аппаратного тракта РСА. Каково назначение синхронного детектора на схеме?
10. Поясните основные этапы цифровой обработки информации РСА. Расскажите о цифровом синтезе апертуры в РСА, охарактеризуйте основные алгоритмы синтеза апертуры в РСА.
11. Объясните основные причины и механизм расфокусировки изображений РСА.
12. В чём суть алгоритма автоматической фокусировки изображений РСА, на основе статистических критериев качества?
13. Расскажите об основных статистических критериях автофокусировки радиолокационных изображений в РСА, дайте их характеристику по результатам проделанной лабораторной работы.
14. Объясните, выявленные в процессе выполнения работы, особенности отражений радиоволн от водной поверхности, дорог, растительности. Сформулируйте качественные выводы.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Конспект лекций по курсу РТС.
2. Горячкин О. В., Неронский Л. Б. Методические указания к курсовой работе по курсу ОTRC / под ред. Д. Д. Кловского. – ПГАТИ, 2002 г., – 30 с.
3. Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы. – М.: ВШ, 1990 г. – 496 с.

4. Радиотехнические системы / под ред. А. И. Дымовой. – М.: «Сов. радио», 1975. – 439 с.

5. Бакулев П. А., Сосновский А. А. Радиолокационные и радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1994. – 295 с.

6. Горячкин О. В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи. – М.: Радио и связь, 2003. – 230 с.

7. Goriachkin O. V., Klovsy D. D. The real-time SAR processing algorithm on the base declaration of the signals in the basis of turning vectors // Proceedings of Fifth International Airborne remote Sensing Conference and Exhibition (IARSC'2001), 17–20 September, 2001, San Francisco, California, USA, (8 p).

## СОДЕРЖАНИЕ

Краткие сведения из теории и практики применения РСА.....	1
1. Радиолокационные методы дистанционного зондирования Земли....	1
2. Принципы радиолокационного наблюдения поверхности Земли.....	5
Домашнее задание.....	9
Содержание работы.....	10
Краткое описание комплекса программ интерактивной обработки радиолокационных изображений «FOCUS».....	11
Порядок выполнения работы.....	16
Контрольные вопросы.....	18
Рекомендуемая литература.....	18