



На правах рукописи

Гурьянов Максим Анатольевич

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЛЯ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ  
АВИАЦИОННОГО РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ  
АПЕРТУРОЙ

Специальность 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычис-  
лительных машин, комплексов и компьютерных сетей

1 АПР 2015

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



005566386

Москва – 2015

**Работа выполнена на кафедре «Высшая математика №1» Национального исследовательского университета «МИЭТ».**

**Научный руководитель:**

Прокофьев Александр Александрович

доктор педагогических наук, заведующий кафедрой «Высшая математика №1» МИЭТ

**Официальные оппоненты:**

Нефедов Сергей Игоревич

доктор технических наук, заместитель директора НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент.

Перслегин Сергей Владимирович

доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, главный научный сотрудник лаборатории оптики океана

**Ведущая организация:**

закрытое акционерное общество «Электронно-вычислительные информационные и инструментальные системы» (ЗАО «ЭЛВИИС»)

Защита состоится «21» апреля 2015 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.134.02 при Национальном исследовательском университете «МИЭТ» по адресу: 124498, г. Москва, Зеленоград, проезд 4806, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИЭТ.

Автореферат разослан «16» марта 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.134.02  
доктор технических наук



Гуреев А.В.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Технология радиолокации синтезированной апертуры (РСА) широко применяется для получения изображений поверхности Земли с использованием летательных аппаратов (ЛА) разного типа. Технология РСА имеет ряд преимуществ перед оптическими методами съемки. Основным достоинством является всепогодность и круглосуточность наблюдения. Недостатками этой технологии являются относительно малая разрешающая способность, сложность и дороговизна аппаратуры и алгоритмов, а так же трудности восприятия глазом человека полученного РСА радиолокационного изображения (РЛИ) без предварительной обработки.

В настоящее время многочисленные специалисты разных стран ведут постоянные работы по улучшению, как разрешающей способности РСА, так и методов обработки РЛИ для их представления оператору на дисплее компьютера. В России ведущей организацией в данной сфере является концерн «Вега», который проводит разработку специализированного оборудования и алгоритмов. В 2013 ими запущен космический аппарат «Кондор-Э» с системой РСА высокого разрешения на борту. Предполагается, что с помощью нового оборудования будут получены РЛИ разрешения до 1 метра.

Современным перспективным и практически важным направлением являются системы РСА авиационного базирования. Среди зарубежных компаний необходимо выделить Sandia National Laboratories, разработавшую систему РСА авиационного базирования, позволяющую получить РЛИ с разрешением до 0.1 метра. Подробности их работы являются закрытой информацией.

Основной проблемой при получении радиолокационных изображений (РЛИ) высокого разрешения является недетерминированность условий съемки. За время набора апертуры любое отклонение траектории ЛА от заложенного в математическую модель программы-обработчика приводит к ухудшению разрешающей способности РСА. Поэтому разработка алгоритмов автофокусировки и обработки исходных данных РСА для получения РЛИ высокого разрешения является открытой, актуальной и широко обсуждаемой научно-технической проблемой.

В РСА существует также проблема преобразования комплексного РЛИ с высоким динамическим диапазоном (до 90 дБ) в «классическое» цифровое полутонное изображение для представления оператору, заключающаяся в слабой различимости некоторых классов объектов. Помимо большого динамического диапазона, на РЛИ присутствует характерный мультипликативный так называемый спекл-шум (шум пятнистости) и специфические артефакты вокруг ярких целей – боковые лепестки (боковики) взаимно-корреляционной функции, возникающие в результате синтеза РЛИ.

Перечисленные факторы в совокупности приводят к тому, что для решения задач дешифровки РЛИ требуется индивидуальный подбор фильтров и преобразований. Поэтому разработка новых эффективных методов фильтрации и преобразования динамического диапазона РЛИ является актуальной задачей.

Данная работа посвящена разработке методов обработки данных, полученных с авиационного РСА высокого разрешения. Особенностями предметной области явля-

ются малая стабильность полета ЛА и низкая точность бортовой навигационной системы (БНС).

**Предметная область.** Исследование ведется в нескольких смежных областях, соответствующих паспорту специальности 05.13.11: модели, методы и программные средства визуализации данных.

**Постановка проблемы.** В актуальной практической задаче создания авиационных РСА главная научная проблема состоит в том, что, в условиях высоких траекторных и угловых нестабильностей ЛА и отсутствия адекватной высокоточной бортовой навигационной системы, существующие традиционные методы обработки данных РСА не позволяют получить разрешение менее метра. В настоящее время нам неизвестны открытые отечественные разработки методов обработки данных в этой области.

**Предметами исследования** являются методы оптимизации комплексных функций, методы интерполяции, существующие методы автофокусировки РЛИ, существующие математические модели, на основе которых проводится синтез РЛИ. Помимо этого исследуются существующие методы фильтрации спекл-шумов.

**Цель работы.** Разработка математических методов повышения разрешающей способности РЛИ при его построении по данным авиационного РСА с учетом особенностей полета летательного аппарата для достижения заявленных параметров РЛИ и их оптимального представления оператору для дальнейшей дешифровки.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1) Разработать метод получения функций траекторных нестабильностей (ТН) по данным БНС и построить определяемое этими функциями преобразование комплексной функции регистрируемого системой РСА сигнала, позволяющее устранить фазовые и траекторные искажения.

2) Создать метод построения итеративной процедуры автофокусировки РЛИ на основе определения характеристик фильтра путем минимизации ширины пика корреляционной функции между сигналом и предложенным фильтром.

3) Построить отображение комплексной функции принимаемого сигнала в область действительных чисел, достигающего максимального значения при наилучшем полученном разрешении РЛИ.

4) Создать метод преобразования динамического диапазона, то есть отображения комплексной функции РЛИ в область  $\mathbb{R}$ , для последующего представления оператору для дешифровки.

5) Разработать метод получения целевого разрешения РЛИ для систем РСА высокого разрешения в условиях зашумленности сигнала.

**Методы исследования.** В ходе работы над диссертацией использовались теоретические и экспериментальные методы. Теоретическими являются теория цифровой обработки сигналов, методы математического моделирования, методы вычислительной математики, численные методы.

Для экспериментальной отработки методов был создан комплекс программ на языке программирования Си. Эксперименты проводились как с данными, созданными на основе математической модели полета, так и с реальными данными, полученными с тестовых экземпляров авиационных РСА. Целью экспериментов было получение

РСА высокого разрешения (ширина главного пика отклика от точечного отражателя по уровню  $-3$  дБ должна быть меньше 50 см в любом направлении).

**Достоверность результатов** подтверждается экспериментами на реальных данных, полученных с авиационных РСА. Характеристики полученных РЛИ (динамический диапазон, разрешающая способность) и степень их изменения при изменениях параметров математической модели соответствуют предсказанным значениям на этапе моделирования.

**Личный вклад автора.** В основу диссертации легли результаты, полученные лично автором или при его непосредственном участии. Все математические утверждения, оформленные в виде теорем, доказаны лично автором.

#### **Научная новизна:**

1) В диссертации предлагается новый подход к обработке данных РСА и данных бортовой навигационной системы (БНС) как комплексных функций, позволяющий привести принимаемый сигнал в соответствие с требованиями существующих методов и, как результат, улучшить соотношения сигнал/шум на РЛИ без изменений в процедуре синтеза.

2) Впервые предложен метод сложности  $O(n)$  ( $n$  – количество зарегистрированных зондирующих импульсов) гладкого преобразования данных БНС в функцию, определяющую искажения регистрируемого сигнала.

3) Создан метод автофокусировки путем оптимизации характеристик фильтра комплексной функции.

4) Разработан оригинальный метод преобразования динамического диапазона, улучшающий различимость некоторых классов объектов на радиолокационном изображении высокого разрешения с высоким уровнем спекл-шума.

5) Предложена новая математическая модель полета летательного аппарата, учитывающая только отклонения летательного аппарата в плоскости, перпендикулярной направлению полета, позволяющая построить процедуру синтеза с учетом незначительных отклонений от расчетной траектории.

#### **Практическая значимость.**

1) Программное обеспечение обработки данных радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) высокого разрешения, созданное на основе предложенных методов, позволяет получить радиолокационное изображение (РЛИ) с разрешением менее 1 метра с авиационного РСА без использования закрытых зарубежных разработок.

2) Разработанные методы преобразования динамического диапазона позволяют улучшить различимость некоторых типов объектов на РЛИ высокого разрешения. По сравнению с существующими методами улучшение константы различимости по Веберу-Фехнеру составляет до 120%.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1) Предложенный метод преобразования комплексной функции регистрируемого радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА) сигнала позволяет устранить фазовые и траекторные искажения, вызванные траекторными нестабильностями, что делает возможным применение существующих методов обработки данных РСА.

2) Созданный метод построения итеративной процедуры автофокусировки радиолокационного изображения дает возможность успешно проводить автофокусировку на голограммах РСА высокого разрешения с большим уровнем шума по сравнению с существующими аналогами, построенными на контрастных признаках, таких, например, как Tengrad Focus Measure (TFM).

3) Разработанный метод преобразования динамического диапазона обеспечивает более высокую различимость искомых объектов по критерию Вебера-Фехнера в сравнении с классическими методами (до 120%).

**Апробация.** Основные результаты докладывались на следующих научных конференциях и семинарах: – 4-я научно-практическая конференция «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики» (Тольятти, 2014); – 21-я межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика» (Москва, Зеленоград, 2014); – Бесконечномерный анализ, стохастика, математическое моделирование: новые задачи и методы. Проблемы математического и естественнонаучного образования (Москва, 2014); – научный семинар ЗАО «ЭЛВИС-НеоТек» (Москва, Зеленоград, 2013); – The Third Conference of Mathematical Society of Moldova IMCS-50 (Chisinau, Republic of Moldova, 2014).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 125 страницах машинописного текста, включая 44 рисунка, 4 таблицы и списка литературных источников из 122 наименований.

### Содержание работы

**Во введении** обосновывается важность и актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи работы, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, а так же положения, выносимые на защиту, приведены структура и краткое содержание работы.

**Первая глава** диссертации посвящена решению задач преобразования комплекснозначной функции двух переменных регистрируемого сигнала в соответствии с данными ТН и разработке методов получения этих данных из данных БНС.

Регистрируемые системой РСА данные (голограмма) представляют собой комплексный сигнал. На каждый зондирующий импульс (ЗИ) записывается последовательность отсчетов комплексного эхо-сигнала с частотой аналого-цифрового преобразователя (АЦП)  $f_{ADC}$ . Количество зондирующих импульсов определяется продолжительностью съемки  $T$  и частотой повторения импульсов (ЧПИ, или PRF)  $f_{PRF}$ .

Голограмма представляется в виде комплексного отображения  $G: \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$ , обозначаемого в дальнейшем  $G(n, m)$ , где  $n$  – номер зондирующего импульса,  $m$  – номер отсчета АЦП.

Процедура создания комплексного РЛИ  $I(n, m)$  из голограммы  $G(n, m)$  называется синтезом. Процедура синтеза построена на основе математической модели полета ЛА в период съемки. Одной из основных характеристик РЛИ является величина

его разрешения (способность РСА воспроизводить изображение близко расположенных точечных объектов). Разрешение определяется как ширина отклика в метрах на точечный уголкового отражатель по уровню  $-3$  дБ. Огибающая азимутального отклика системы на точечный уголкового отражатель в идеальной ситуации имеет вид:

$$I(x) = \text{sinc}(x). \quad (1.1)$$

В основу существующей модели заложена прямолинейная траектория полета. Реальная траектория за период набора апертуры  $T$  отклоняется от расчетной на некоторый вектор  $\overline{\Delta R}$ , абсолютная величина которого (по направлению наклонной дальности) равна  $\Delta R$ . Требование к точности, с которой известна траектория задается неравенством:

$$\Delta R < \frac{\rho_n^2}{\lambda}, \quad (1.2)$$

где:  $\rho_n$  – целевое разрешение по азимуту в метрах;  $\lambda$  – длина волны ЗИ.

Длина волны ЗИ для используемой аппаратной части составляет 3 см. При желаемом разрешении  $\rho_n = 0.5$  метра требования к точности траектории должны быть  $\Delta R < 8,3$  метра. Эта величина определяет параметры навигационной системы, которые были заложены технические требования к навигационной системе аппарата-носителя.

Ширина пика отклика на точечную цель по уровню  $-3$  дБ после согласованной фильтрации голограммы (синтеза, или сжатия по дальности) составляет 2 отсчета, цена одного отсчета на получаемой голограмме по дальности составляет  $\sim 25$  см.

Процедура синтеза по азимуту (СА) представляет собой согласованную фильтрацию. Ядро фильтра, содержащее информацию об адресах суммирования (адресной траектории) и фазовых корректировок для суммирования, называют опорной функцией (ОФ)  $F_{nm}(x, y)$ , где  $x = 1, 2, \dots, X$ ,  $y = 1, 2, \dots, Y$ . Для каждой точки голограммы опорная функция своя. Ядро фильтра явно зависит от всех параметров математической модели полета, что будет показано при описании различных моделей.

Синтез СА выполняется следующим образом:

$$I(n, m) = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \left( F_{nm}(x, y) \cdot G \left( n - \frac{X}{2} + x, m - \frac{Y}{2} + y \right) \right),$$

$$F_{nm}(x, y) = A(x, y) \cdot e^{-j\varphi_m(x)}, \quad (1.3)$$

$$A(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } y - 0.5 < m(x) \leq y + 0.5, \\ 0, & \text{в других случаях,} \end{cases}$$

где:  $F_{nm}(x, y)$  – опорная функция, вычисляемая для каждого элемента голограммы  $(n, m)$ ,  $x = 1, 2, \dots, X$ ,  $y = 1, 2, \dots, Y$ ;  $\varphi_m(x)$  – корректирующая фаза опорной функции;  $m(x)$  – смещение полезного сигнала по дальности;  $A(x, y)$  – амплитуда опорной функции, задающая адресную траекторию;  $j$  – мнимая единица.

Синтез фрагмента изображения  $I(n, m)$  для фиксированного  $m$  можно представить как частный случай СА в виде суммы одномерных сверток голограммы. Свертку вычисляется через дискретное преобразование Фурье (ДПФ):

$$\Phi_n \{I(n, m)\} = \sum_{i=1}^Y \Phi_x \{F_{nm}(x, i)\} \cdot \Phi_n \{G(n, m+i)\}, \quad (1.4)$$

где  $\Phi_x \{ \}$  – одномерное ДПФ по переменной  $x$ .

Возможное отклонение  $\Delta R$  приводит к ошибке в знании наклонной дальности  $dL < \Delta R$  до снимаемой точки поверхности ( $dL$  зависит от угла визирования). Ошибка  $dL$  может быть больше, чем шаг отсчетов АЦП по дальности, равный  $\frac{c}{2 \cdot f_{ADC}}$ , где:  $c$

– скорость света. Сигнал от точечной цели может смещаться по голограмме на  $dm$  отсчетов АЦП по дальности, где  $dm$  пропорционально  $dL$ . В таком случае ядро фильтра  $F_{nm}(x, y)$  больше не является ядром согласованного фильтра. Это приводит к тому, что при синтезе изображения пик сигнала не попадает в расчетную строку  $m$  по дальности и не участвует в формировании РЛИ точки  $(n, m)$ .

Присутствует и другой эффект – смещенный сигнал, записанный в голограмме по адресу  $m + dm$ , участвует в формировании РЛИ точки  $(n, m + dm)$  и создает дополнительный шум поскольку фаза  $\arg(F_{nm}(x, dm))$  опорной функции  $F_{nm}(x, y)$  не соответствует фазе  $\arg(F_{nm+dm}(x, dm))$  и не может быть компенсирована полностью. Отсюда следует необходимость построения нового фильтра для  $G(n, m)$ .

Имея данные бортовой навигационной системы как действительные функции  $Y'(k)$  и  $Z'(k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$  можно вычислить величину смещения  $dm$  для каждого ЗИ. Учитывая данные о величине смещения  $dm$ , можно модернизировать процедуру синтеза СА таким образом, чтобы для каждой точки строить согласованный фильтр  $F'_{nm}(x, y)$ , такой, что  $m'(x) = m(x) + dm$ . При этом количество строк  $Y$  функции  $F'_{nm}(x, y)$  вырастет пропорционально  $dm$ , что приведет к увеличению вычислительной сложности синтеза. Отметим, что существующие системы обработки данных используют исходный фильтр  $F_{nm}(x, y)$  с  $dm = 0$ , поэтому фазовая история точки  $(n, m)$  на голограмме будет восстановлена с ошибками. Однако существует и другой подход. Предлагается рассмотреть преобразование функции  $G(n, m)$  таким образом, чтобы фильтр  $F_{nm}(x, y)$  являлся согласованным. В таком случае будет возможна дальнейшая обработка данных в рамках существующих систем.

Для построения такого преобразования в работе рассматривается следующая модель полета РСА и процедура синтеза изображения. На Рис. 1 представлена расчетная и реальная траектории полета ЛА в период регистрации голограммы (проекция на плоскость, перпендикулярную направлению полета).

Отклонения задаются функциями  $Y(n)$  и  $Z(n)$ , где  $n$  – номер зондирующего импульса, и означают расстояния по осям  $OY$  и  $OZ$  от априорного положения ЛА до его реального положения в момент приема зондирующего импульса  $n$ .

Формулы для вычисления адресной траектории для синтеза СА произвольной точки изображения приведены ниже. Размер адресной траектории по азимуту  $X$ :

$$X = \left( \left( \frac{D_m \cdot \operatorname{tg}(\varphi_A)}{dn} \right) \left( \frac{H}{D_m} \right) \right), \quad (1.5)$$

где:  $D_m$  – минимальная наклонная дальность до снимаемой точки;  $dn$  – азимутальный шаг голограммы (в метрах), вычисляется по формуле  $dn = \frac{V_n}{f_{PRF}}$ ;  $V_n$  – скорость полета ЛА вдоль азимута;  $H$  – высота полета над уровнем Земли;  $\varphi_A$  – азимутальный угол раскрыва принимающей антенны.

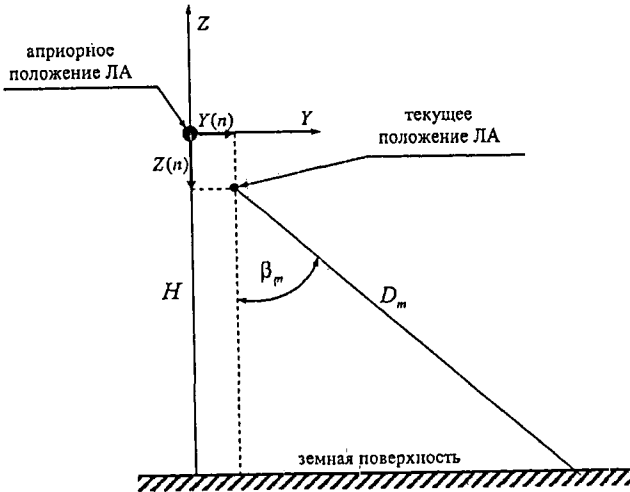


Рисунок 1 – Модель съемки с учетом траекторных нестабильностей  
Смещение адресной траектории по дальности выражается формулой:

$$m(i) = \left( \frac{2 \cdot f_{ADC}}{c} \right) \left( \sqrt{D_m^2 + (i \cdot dn)^2} - D_m \right). \quad (1.6)$$

Фазовая поправка вычисляется из наклонной дальности до снимаемой точки:

$$\varphi_m(i) = \frac{4\pi}{\lambda} \left( \sqrt{D_m^2(y) + (i \cdot dn)^2} - D_m \right). \quad (1.7)$$

В случае, когда значения  $Y(n)$  и  $Z(n)$  отличны от нуля, получается дополненная математическая модель. Влияние траекторных нестабильностей на фазу описывается следующими формулами:

$$d\varphi = \frac{4\pi \cdot dL}{\lambda}, \quad dL = \sqrt{D_m^2 + \left( V_n \cdot \frac{1}{f_{PRF}} \right)^2} - D_m, \quad (1.8)$$

где:  $d\varphi$  – изменение фазы регистрируемого сигнала в процессе съемки;  $dL$  – изменение наклонной дальности до снимаемой точки в процессе полета.

Наклонная дальность  $D_m$  может быть вычислена как:

$$D_m = \frac{H - Z(n)}{\cos(\hat{\beta}_m)}, \quad \hat{\beta}_m = \arctg\left(\operatorname{tg}(\beta_m) - \frac{Y(n)}{H - Z(n)}\right), \quad (1.9)$$

где:  $\hat{\beta}_m$  – эквивалентный угол в модели без траекторных неустойчивостей.

Предлагается процедура компенсации ТН, использующая разработанные методы преобразования функции  $G(n, m)$  в соответствии с данными БНС  $Y'(k)$ ,  $Z'(k)$  и интерполяции данных БНС для построения функции ТН  $Y(n)$ ,  $Z(n)$ .

#### Процедура компенсации ТН (КТН):

Шаг 1: [Получение функций ТН  $Y(n)$  и  $Z(n)$ ] Интерполяция данных  $Y'(k)$  и  $Z'(k)$ , полученных от навигационной системы летательного аппарата, проводится по предлагаемому методу:

Метод преобразования данных БНС в функции ТН при помощи гладкой интерполяции. В общем случае частота излучения зондирующих импульсов  $f_{PRF}$  и частота получения данных  $Y'(k)$  и  $Z'(k)$  от бортовой навигационной системы (БНС), которую можно оценить как  $K/T$ , не совпадают. Данные БНС  $Y'(k)$  и  $Z'(k)$  рассматриваются как функции дискретного переменного, которым в соответствие ставятся семейства гладких многочленов третьего порядка для их распространения на вещественную область определения. Функции ТН  $Y(n)$  и  $Z(n)$  определяются следующим образом:

$$\begin{cases} Y(n) = P_{Y_n}(n \cdot dn), \\ Z(n) = P_{Z_n}(n \cdot dn), \end{cases} \quad (1.10)$$

где:  $P_{Y_n}(x)$ ,  $P_{Z_n}(x)$  – интерполяционные полиномы, построенные в окрестности точки  $n \cdot dn$ ,  $x \in \mathbb{R}$ .

Интерполяционные полиномы строятся в области произвольной точки по значениям  $Y'(k)$  и  $Z'(k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , где  $K$  – общее количество измерений, полученных с БНС. Предлагается ввести параметр  $\tau$ , определяющий окрестность построения полинома (1.10). Для построения используются только измерения с индексом  $k$ , где  $k$  удовлетворяет условию:

$$k \in [n \cdot dn - \tau \cdot V_n; n \cdot dn + \tau \cdot V_n]. \quad (1.11)$$

Интерполяция проводится по критерию наименьших квадратов.

Шаг 2: [Вычисление значений ТН] Вычисление  $Y(n)$  и  $Z(n)$  в момент регистрации  $n$ -го ЗИ по формуле (1.10).

Шаг 3: [Компенсация ТН] Компенсация траекторных неустойчивостей  $Y(n)$  и  $Z(n)$  на голограмме  $G(n, m)$  путем ее преобразования в рамках предложенного метода.

**Теорема 1 (существования и единственности голограммы с устраненными траекторными неустойчивостями).** Пусть дано отображение  $G: \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$ , такое, что существует согласованный фильтр  $F_m(x, y)$ , определяемый формулами (1.3), зависящий от известных функций траекторных неустойчивостей

$Y(n)$  и  $Z(n)$  в соответствии с формулами (1.8)-(1.9). Тогда существует единственное отображение  $G' : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$ , для которого согласованным фильтром является  $F'_{nm}(x, y)$ , для определения которого по (1.3) входные параметры задаются формулами (1.5)-(1.7).

*Доказательство* Теоремы 1 приведено в тексте диссертации. При этом показано, что отображение  $G'(n, m)$  определяется формулами:

$$G'(n, m) = G(n, m + \Delta m) \cdot \exp(j \cdot \Delta \varphi), \quad (1.12)$$

где:  $j$  – мнимая единица;  $\Delta \varphi$  – ошибка фазы, вызванная траекторными нестабильностями;  $G(n, m + \Delta m)$  – значение функции с учетом сдвига по дальности  $\Delta m$ :

$$\Delta m(n, m) = \text{round} \left( \frac{2 \cdot dL(n, m) \cdot f_{ADC}}{c} \right), \quad (1.13)$$

$$dL(n, m) = - \left( Z(n) \cos(\beta_{n,m}) - Y(n) \sin(\beta_{n,m}) \right),$$

где:  $\text{round}(\cdot)$  – операция округления к ближайшему целому;  $dL(n, m)$  – изменение наклонной дальности;  $\beta_{n,m}$  – угол между осью  $OY$  и направлением на точку поверхности, соответствующую отсчету  $G(n, m)$  на голограмме.

Процедура компенсации ТН позволяет устранить фазовые и траекторные искажения, вызванные ТН, что делает возможным применение существующих методов обработки данных РСА. В предметной области результаты Теоремы 1 применимы, однако требуется следить за соблюдением точности знания функций  $Y(n)$  и  $Z(n)$ . У голограммы, восстановленной из  $G'(n, m)$ , должны отсутствовать неопределенность по фазе и неоднозначность в адресных траекториях.

Для отсутствия неопределенности по азимуту необходимо и достаточно соблюдение следующего условия на голограмме  $G'(n, m)$ :

$$f_{PRF} > \frac{2 \cdot V_n}{D_{antenna}}, \quad (1.14)$$

где  $D_{antenna}$  – азимутальный размер антенны в метрах.

Указанное условие гарантируется при точности БНС:

$$\Delta R \leq \frac{X \cdot D_{antenna}}{2} - \frac{X}{f_{PRF}} V_n. \quad (1.15)$$

Для отсутствия неопределенности по дальности, то есть

$$|\Delta m(n, m)| \leq 1, \quad (1.16)$$

необходимо и достаточно знание ТН с точностью не менее:

$$\Delta R \leq \frac{c\sqrt{3}}{2 \cdot f_{ADC}}. \quad (1.17)$$

Если точность БНС не удовлетворяет условиям (1.15) и (1.17), то корректировка ТН не может быть проведена однозначно. Это является основным ограничением области применимости процедуры КТН и разработанных методов.

Недостатком процедуры КТН является необходимость в дополнительных вычислениях и перезаписи данных  $G(n, m)$  при обработке данных РСА предложенными процедурами. Поэтому, затруднительно получение РЛИ в реальном времени, что является ключевым преимуществом многих систем РСА в режиме Strip Map (маршрутный режим).

Исследование эффективности предложенной процедуры проводилось на голограммах, при съемке которых собирались данные о ТН, удовлетворяющие условиям (1.15) и (1.17). Съемка проводилась в детерминированных условиях, то есть имелись данные о точной скорости полета ЛА. Проводился синтез двух РЛИ: первое синтезируется стандартной процедурой синтеза, без корректировки голограммы, второе с корректировкой голограммы предложенным методом и последующим таким же синтезом. Для объективности сравнения результатов экспериментов использовались одинаковые параметры синтеза и одинаковые параметры преобразования динамического диапазона при создании обзорных цифровых изображений для визуальной оценки.

Результаты измерений позволили сделать вывод, что энергия ярких целей (местоположение выбиралось вручную оператором), отнесенная к средней энергии всего РЛИ повышалась более чем в два раза. На основании точных данных, приведенных в тексте диссертации, сделан вывод о среднем выигрыше в отношении сигнал/шум (SNR) на 3 дБ.

Кроме того, визуально на изображении сильно уменьшается спекл-шум. Результат представлен на Рис. 2.

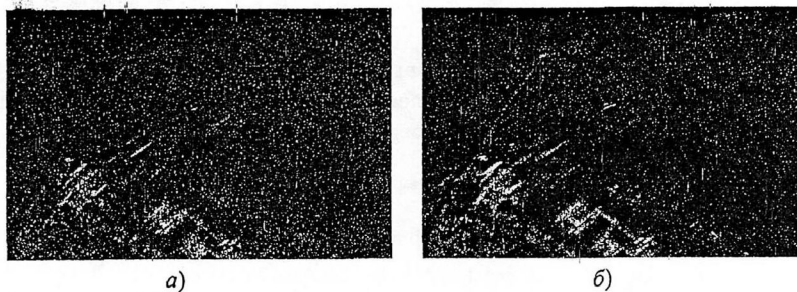


Рисунок 2 – Результаты компенсации ТН  
а) без компенсации ТН; б) после компенсации ТН

*Вторая глава* диссертации посвящена методам автофокусировки РЛИ и отображения комплексных функций в область действительных чисел, которые можно использовать для оценки качества РЛИ. Для применения методов автофокусировки, использующих фазовую историю точечной цели (как источник информации), необходимо точное знание скорости полета ЛА. Требуемая точность  $\Delta V$  знания скорости  $V_n$  описывается соотношением:

$$\frac{\Delta V}{V_n} < \frac{\rho_n^2}{\lambda D_m} \quad (2.1)$$

Для разрешения  $\rho_n = 0.5$ , при скорости полета  $V_n = 50$  м/с, длине волны ЗИ 3 см и оценочной дальности съемки 1000 м, максимальная ошибка при оценке скорости  $V_n$  составляет 0.4 м/с. Проблема состоит в том, что приборная скорость полета вычисляется по трубке Пито, которая измеряет скорость с высокой точностью, но относительно воздушного потока. Наличие ветра и турбулентности вносят погрешность в измерения и не позволяют оценить скорость  $V_n$  относительно земли с точностью выше  $\sim 10$  м/с на используемом ЛА.

Скорость  $V_n$  определяет адресную траекторию и набег фазы при синтезе. Существующие алгоритмы автофокусировки, такие как PGA<sup>1</sup>, в основном, направлены на компенсацию небольших ошибок набег фазы, вызванных высокочастотными колебаниями фазового центра принимающей антенны. Алгоритм PGA требует знания скорости  $V_n$  с точностью, которую БНС не может обеспечить.

В недетерминированных условиях информация о скорости ЛА  $V_n$  и ее оценка является нетривиальной задачей<sup>2</sup>. В диссертации предлагается метод АQ автофокусировки РЛИ, не требующий априорного знания о скорости. Метод предлагает построение поиска параметров фильтрации таким образом, что учитываются все необходимые величины из математической модели с учетом ТН.

Для метода АQ используется комплексное отображение  $G'(n, m)$ , получение которого описано в предыдущей главе, и фильтр  $F_{nmV}(x, y)$ . Фильтр  $F_{nmV}(x, y)$  строится по формулам (1.5)-(1.9) таким образом, что все параметры кроме скорости  $V_n$  фиксируются. Точность априорного знания других параметров не влияет на метод, как это показано в Теореме 2. Теорема 2 доказывается для  $G(n, m)$  до проведения КТН, что является более сильным утверждением, поскольку для построения фильтра  $F_{nm}(x, y)$  требуется больше параметров.

**Теорема 2 (о взаимосвязи параметров согласованного фильтра).** Пусть дано отображение  $G: \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$ , такое, что существует согласованный фильтр  $F_{nm}(x, y)$ , определяемый формулами (1.3), зависящий от неизвестных функций траекторных нестабильностей  $Y(n)$  и  $Z(n)$  в соответствии с формулами (1.8)-(1.9). Пусть также все параметры построения фильтра, кроме скорости ЛА  $V_n$ , зафиксированы на некоторых априорных значениях. Тогда существует значение скорости  $\hat{V}_n$ , не обязательно равное  $V_n$ , такое, что восстановленная по формулам (1.5) – (1.7) функция  $F_{nm\hat{V}}(x, y)$  является согласованным фильтром для  $G(n, m)$ , то есть  $F_{nm\hat{V}}(x, y) = F_{nm}(x, y)$ .

**Доказательство:** достаточно показать, что в рамках модели с ТН все основные параметры такие как  $Z(n)$ ,  $Y(n)$  и  $V_n$  могут быть выражены через некоторую эквива-

<sup>1</sup> D. Wahl et al., Phase gradient autofocus – a robust tool for high resolution SAR phase correction // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 30, no. 3, pp. 827–835, July 1994,

<sup>2</sup> Samczyński P., Kulpa K., Coherent MapDrift technique, in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.48, no.3, 2010, pp.1505–1517.

лентную скорость полета  $\hat{V}_n$ . Подробное доказательство приведено в тексте диссертации, результирующие зависимости величин приведены ниже. Из формул, описывающих модернизированную модель, выражается эквивалентное значение угла между нормалью и направлением на снимаемую точку:

$$\hat{\beta}_m = \arctg\left(\operatorname{tg}(\beta_m) - \frac{Y(n)}{H - Z(n)}\right). \quad (2.2)$$

Используя формулу (2.2) для дальнейших преобразований, можно получить зависимость эквивалентной высоты от ТН:

$$\hat{H} = (H - Z(0)) \cdot \frac{\cos(\beta_m)}{\cos(\hat{\beta}_m)}. \quad (2.3)$$

Выражение для эквивалентной скорости принимает вид:

$$\frac{\hat{V}_n^2}{D_m(H)} = \frac{V_n^2}{D_m(\hat{H})}, \quad D_m(H) = \frac{H - Z(0)}{\cos(\hat{\beta}_m)} \quad (2.4)$$

На точность знания  $\hat{V}_n$  накладываются ограничения, исходя из физических ограничений и предельного разрешения системы РСА:

$$\Phi_P(n) = \frac{2\pi\hat{V}_n^2}{\lambda \cdot D_m \cdot (f_{PRF})^2}. \quad (2.5)$$

Утверждается, что оптимизацию скорости можно проводить с шагом (шаг меняется в процессе поиска):

$$\Delta V = \frac{P_n^2}{\lambda D_m} \cdot V_n, \quad (2.6)$$

в следующих границах:

$$V_{\min} \geq 0, \quad V_{\max} \leq \frac{D_{\text{antenna}} \cdot f_{PRF}}{2}. \quad (2.7)$$

Метод вычисления параметров фильтра  $A_0$ :

**Шаг 1:** [Вычисление параметров оптимизации] Проводится вычисление границ оценки скорости  $V_{\min}$ ,  $V_{\max}$  и шага поиска  $\Delta V$ .

**Шаг 2:** [Синтез] На этом шаге проводится фильтрация  $G(n, m)$  фильтром  $F_{\text{лп}}(x, y)$ . В предметной области это эквивалентно синтезу РЛИ  $I(n, m)$  из голограммы  $G(n, m)$  в рамках процедуры СА.

**Шаг 3:** [Оценка качества] Оценивается качество результата фильтрации  $I(n, m)$  по средней ширине пика корреляционной функции. На данном этапе необходимо получить качественное отображение комплексной функции в область действительных чисел, учитывающее шум, присутствующий на голограмме. Отображение обозначается  $Q(I(n, m))$ . Чем больше полученное значение, тем качественнее считается изображение.

**Шаг 4:** [Условие выхода] Работа завершается, когда проверен весь диапазон значений скорости от  $V_{\min}$  до  $V_{\max}$  с шагом  $\Delta V$ .

Среди существующих критериев оценки качества РЛИ  $Q(I(n, m))$  наиболее используемыми являются Tenengrad Focus Measure (TFM) и Image Entropy<sup>3</sup> (IE).

Критерии, основанные на локальной контрастности, и критерий энтропии изображения плохо работают в случае РЛИ высокого разрешения с большим уровнем спекл-шума. На исследуемых РЛИ величина разрешения больше размеров одного пикселя. Спекл-шум на таком РЛИ является причиной высоких значений по критерию TFM меры фокусированности изображения  $TG(I)$  для РЛИ низкого качества (Рис. 3).

Критерий локальной контрастности TFM может принимать большее значение для изображения низкого качества. Это связано с тем, что спекл-шум является мультипликативным шумом. Когда точечный объект имеет отклик шире, чем радиус корреляции спекл-шума, его контрастность во многом определяется этим самым шумом. Эффект продемонстрирован на Рис. 3. На Рис. 3а изображен амплитудный отклик на точечный отражатель при неправильно подобранных условиях: отклик широкий, разрешение плохое. На Рис. 3б показан профиль сигнала на сфокусированном изображении. Однако под влиянием спекла (пунктирная линия) сигнал на Рис. 3а имеет более высокое значение контрастности (спекл образует несколько ложных пиков).

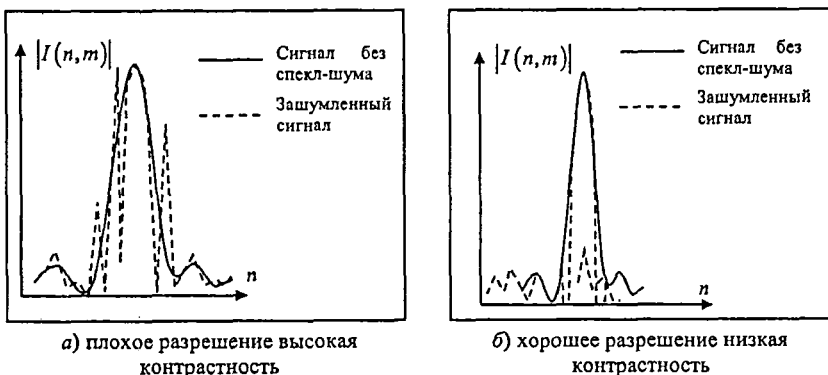


Рисунок 3 – Влияние спекл-шума на профиль фокусированного и нефокусированного сигналов

Критерий IE так же может принимать для нефокусированного изображения значения больше, чем для сфокусированного, поскольку высокочастотная шумовая составляющая сильно влияет на этот критерий.

Для минимизации влияния спекл-шума на критерий фокусированности изображения предлагается рассмотреть функцию оценки качества изображения, учитывающую площадь высокоэнергетических участков:

$$Q(I(n, m)) = \frac{M \times N}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I'(i, j)}, \quad (2.8)$$

<sup>3</sup> Zoran Sjanic, Navigation and SAR Auto-focusing in a Sensor Fusion Framework // Division of Automatic Control Department of Electrical Engineering Linköping University, SE-581 83 Linköping, Sweden, 2011.

где:  $I'(i, j)$  – бинарная маска:

$$I'(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } |I(i, j)|^2 \geq Tr, \\ 0, & \text{если } |I(i, j)|^2 < Tr, \end{cases} \quad (2.9)$$

$Tr$  – пороговый уровень мощности по уровню  $p$ :

$$Tr = p \cdot \max_{n, m} (|I(n, m)|^2). \quad (2.10)$$

**Утверждение:** критерий (2.8) имеет наибольшее значение для наиболее сфокусированного изображения, то есть для произвольной функции  $I(n, m)$ , являющейся результатом фильтрации некоторого отображения  $G(n, m)$  с ядром фильтра  $F'_{nm}(x, y)$ , выполняется следующее условие:  $Q(I(n, m)) \rightarrow \max$  при ширине пика корреляционной функции  $\rho_n \rightarrow \min$ .

*Доказательство утверждения* приведено в тексте диссертации.

На Рис. 4 иллюстрируется работа предлагаемой функции на примере одномерного случая. Параметр  $p$  подбирается таким образом, чтобы обеспечить достоверность результатов и убрать из рассмотрения фон. На практике это означает, что для каждого РЛИ, с которым проводится работа, необходимо выбирать  $p$  таким образом, чтобы средняя энергия фона была ниже  $Tr$ .

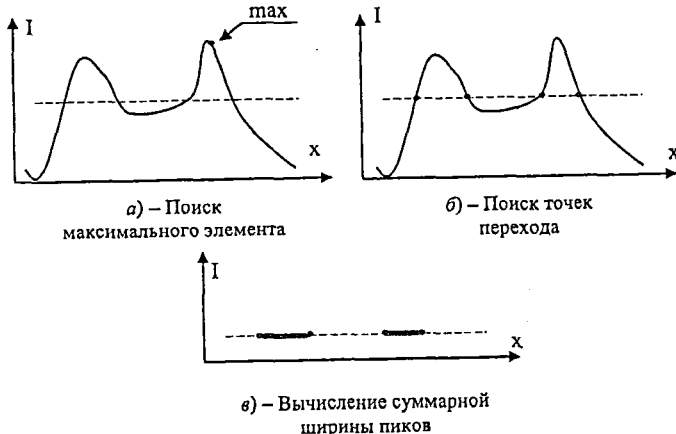


Рисунок 4 – Иллюстрация работы предлагаемого критерия оценки качества РЛИ

Метод АтФМ, основанный на ТФМ, идентичен А<sub>Q</sub> и в качестве функции  $Q(I(n, m))$  использует  $TG(I(n, m))$ . Результаты обработки тестовых голограмм программами, построенными с использованием указанных методов, представлены ниже.

Для тестирования использовалась библиотека голограмм, содержащих сигналы от уголковых отражателей с длиной ребра 50 см. Поиск уголковых отражателей на РЛИ выполнялся визуально. После выполнения автофокусировки и синтеза изображения процедурами, основанными на АтФМ и А<sub>Q</sub>, проводилась оценка величины раз-

решения. Использовалось большое количество голограмм ярких целей (всего в библиотеке 44 изображения). Подробно результаты тестирования приведены в тексте диссертации. Предлагаемый метод, основанный на  $A_0$ , позволил обеспечить величину разрешения менее 1 метра на 37 голограммах из 44 и менее 1,5 метров в остальных случаях. Что касается метода АТГМ, то он позволил обеспечить величину разрешения до 2-х метров на 35 голограммах и до 3-х метров в остальных случаях.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что использование предложенной функции  $Q(I(n, m))$  на изображениях с малым шумом и плохого разрешения не дает выигрыша по сравнению с существующими методами. Это объясняется отсутствием на них особенностей, для решения которых и была предложена функция качества  $Q(I(n, m))$ .

Примеры РЛИ уголкового отражателя, выложенных в ряд, приведены на Рис. 5.

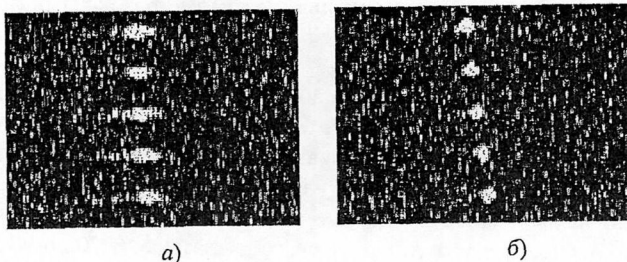


Рисунок 5 – Результаты автофокусировки по уголкового отражателям а) существующими методами; б) разработанным методом

Третья глава диссертации посвящена созданию метода преобразования динамического диапазона (ПДД). Так РЛИ подвергается ПДД, в ходе которого каждой точке изображения в зависимости от ее мощности, оцениваемой как  $z_{nm} = |I(n, m)|^2$ , ставится в соответствие значение яркости  $B$ .

$$f_B(z_{nm}) = B, \quad (3.1)$$

где:  $z_{nm}$  – мощность,  $B$  – значение яркости, для нормализованного случая  $B \in [0; 1]$ .

Таким образом, (3.1) можно рассматривать как отображение  $C \rightarrow \mathbb{R}$ .

По причине большого динамического диапазона ряд целей плохо различим на результирующем цифровом изображении. Различимость может быть оценена численно следующим образом (оценка встречается в описании закона Вебера-Фехнера):

$$\frac{B_i - B}{B} = b, \quad (3.2)$$

где:  $B$  – яркость фона, на котором расположен объект;  $B_i$  – яркость изучаемого объекта;  $b$  – константа различимости.

Различимость объектов на цифровом изображении, фон которого составляет черное пространство с нулевой яркостью, отличается от различимости объектов на другом фоне. Формула (3.2) теряет свою актуальность при низких абсолютных значениях  $B$ . Это явление объясняется влиянием «собственного света сетчатки» зритель-

ного анализатора  $B_0$ . Эта величина отражает яркость окружающих объектов, освещенность помещения, в котором оператор изучает РЛИ, фоновый свет подсветки монитора (если РЛИ изучается на мониторе персонального компьютера).

Для низкой яркости можно записать измененную формулу:

$$\frac{B_i - B}{B + B_0} = b = \text{const.} \quad (3.3)$$

Для изображений с зернистой структурой, согласно Веберу-Фехнеру, величина зрительного ощущения  $S$  пропорциональна логарифму воздействия (величина ощущения – психофизическое понятие)

$$S \sim \ln(B), \quad B \gg B_0. \quad (3.4)$$

Некоторые участки полученных изображений содержат близко расположенные и плохо различимые объекты. По результатам статистического анализа РЛИ в работе выявлены объекты, константа различимости  $b$  которых на цифровом изображении может быть потенциально увеличена:

1) В нижней части динамического диапазона от 20 до 40 дБ находятся изображения кустарника, дорог, деревянных деревянных домов и других объектов, не имеющих металлических элементов. Потенциал для улучшения различимости создает тот факт, что мощность фонового подставки не превышает 20 дБ. Кроме того, боковые лепестки целей находятся на уровне -40 дБ относительно главного пика и для данных целей они находятся под шумом.

2) В верхней части динамического диапазона, от 70 до 90 дБ находятся яркие металлические цели, такие как вышки сотовой связи и крыши домов. Потенциал для улучшения различимости заключается в том, что в данной части диапазона отсутствует шум. Фон для целей создают близко расположенные менее яркие объекты. Пики, разнесенные на исходном РЛИ<sup>4</sup>, на получаемом после ПДД цифровом изображении могут сливаться в один.

В диссертационной работе отмечается, что ПДД посвящен ряд работ отечественной компании «Вега» (ведущий разработчик в России в области РСА). Монография «Радиолокационные системы Землеобзора космического базирования» использовалась автором в качестве справочного материала. В монографии для РЛИ с динамическим диапазоном 30 дБ предлагается использование функции ПДД в виде:

$$f_B(z) = \begin{cases} 0, & \text{если: } z < z_{\min}, \\ \frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}}, & \text{если: } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}, \\ 1, & \text{если: } z > z_{\max}, \end{cases} \quad (3.5)$$

где:  $z_{\min}, z_{\max}$  – параметры нормировки, максимальная и минимальная допустимые значения энергии сигнала на входе соответственно.

<sup>4</sup> идеализирование РЛИ снимаемой земной поверхности, которое может быть получено идеальным некогерентным радиолокатором

Низкий диапазон до 40 дБ: в условиях отсутствия боковых лепестков целей (динамический диапазон до 40 дБ) и при известных характеристиках шумовой подложки оптимальным становится логарифмическое преобразование. Оно полностью удовлетворяет статистике распределения энергии. Формула логарифмического преобразования с учетом нормировки имеет вид:

$$f_b(z) = \begin{cases} 0, & \text{если: } z < z_{\min}, \\ \log_{(z_{\max} - z_{\min})} (A \cdot (z - z_{\min}) + 1), & \text{если: } z_{\min} \leq z < z_{\max}, \\ 1, & \text{если: } z \geq z_{\max}, \end{cases} \quad (3.6)$$

где:  $A = \frac{z_{\max} - z_{\min} - 1}{z_{\max} - z_{\min}}$ .

Выбор контрольных участков для оценок среднего фона и качества предлагаемого преобразования выполнялся вручную. Средний уровень фона для обрабатываемых изображений находится на уровне  $-20$  дБ, то есть  $z \approx 0.01 \cdot (z_{\max} - z_{\min})$ . Согласно формуле (3.3) максимальный прирост константы различимости  $b$  будет наблюдаться при максимальной разнице яркости цели  $B$ . Значение мощности  $z_p$ , для которого прирост константы  $b$  будет максимальным, можно найти по формуле:

$$z_p = \max_z (f_b'(z) - f_b(z)). \quad (3.7)$$

Для логарифмической функции максимум наблюдается в точке  $z_p \approx 0.32 \cdot (z_{\max} - z_{\min})$ . Значения интенсивностей соответственно  $\approx 0.32$  для линейного преобразования и  $\approx 0.58$  для логарифмического. Константа различимости по (3.2) увеличивается примерно на 84%.

Высокий диапазон от 70 до 90 дБ подразумевает наличия плотного расположения ярких целей. Для их различимости необходимо использовать полиномиальную функцию более высокого порядка, чем линейная. По результатам тестирований, оптимальный результат достигается при использовании в указанном диапазоне квадратичной функции.

$$f_b(z) = \begin{cases} 0, & \text{если: } z < z_{\min}, \\ \left( \frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \right)^2, & \text{если: } z_{\min} \leq z < z_{\max}, \\ 1, & \text{если: } z \geq z_{\max}. \end{cases} \quad (3.8)$$

С помощью (3.7) можно оценить выигрыш в различимости объектов. Особенно сильно является то, что в качестве фона выступают соседние яркие точки. Различимость оценивается по уровню мощности  $z \approx 0.5 \cdot (z_{\max} - z_{\min})$ . Уровень 0.5 в мощностной области соответствует уровню  $\approx 0.7$  по амплитуде, принятого предельным для восприятия человеческим глазом двух близких точек раздельно друг от друга. Константа различимости  $b$  яркой точки  $z_p = z_{\max}$  увеличивается примерно в три раза, то есть на 200%.

Предлагаемый метод ПДД представляет собой отображение (3.1), использующее в совокупности как существующие линейные функции ПДД в центре динамического диапазона, так и предложенные (3.6) и (3.8) в указанных оптимальных границах динамического диапазона. Условно метод обозначается как трехдиапазонное ПДД или ТПДД.

В работе получены качественные результаты при использовании предлагаемого метода ТПДД на различных участках динамического диапазона РЛИ при преобразовании в цифровую картинку. Экспериментально подтверждено, что визуальное восприятие улучшилось, а константа различимости на целевых объектах увеличилась. На Рис. 6 приведен пример использования линейной функции ПДД и метода ТПДД.

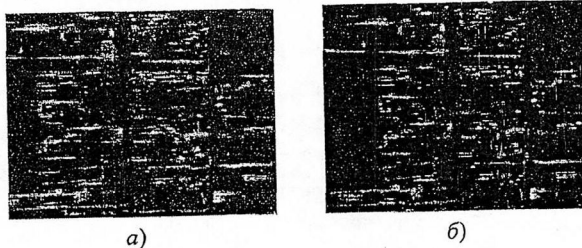


Рисунок 6 – Результат работы разных функций ПДД: а) классическое линейное преобразование; б) преобразование с использованием метода ТПДД

*Четвертая глава* диссертации посвящена созданию метода обработки данных авиационного РСА с целью получения РЛИ высокого разрешения.

Предлагается комплексная процедура  $P_1$ , основанная на использовании существующих методов обработки голограммы  $G(n, m)$ .

Процедура  $P_1$ :

**Шаг 1:** [Компенсация доплеровского смещения] На этом шаге проводится корректировка доплеровского смещения по частоте спектра голограммы  $G(n, m)$ . Известно несколько алгоритмов корректировки спектра голограммы<sup>5</sup>. В работе используется алгоритм DC, как наиболее эффективный. Он состоит в оценке доплеровского смещения, её интерполяции по дальности и азимуту в рамках модели полета, и компенсации смещения на голограмме методом фазовой корректировки.

**Шаг 2:** [Автофокусировка] Шаг включает в себя корректировку голограммы  $G(n, m)$  существующими методами автофокусировки РЛИ. Если траекторные нестабильности  $Y'(k)$  и  $Z'(k)$  таковы, что  $\Delta m = 0$ , то применяется классическая процедура: оценка азимутальной скорости алгоритмом SAC (Shift and correlate) с последующей точной фокусировкой РЛИ алгоритмом PGA (Phase gradient autofocus), адаптированным под режим работы РСА Strit Map. Если же ТН велики, проводится автофокус  $A_q$  подбором параметров на основе TFM.

**Шаг 3:** [Синтез] На данном этапе проводится синтез РЛИ  $I(n, m)$  в соответствии с классической процедурой СА.

<sup>5</sup> Jonatan Lerga, Overview of Signal Instantaneous Frequency Estimation Methods, University of Rijeka – Faculty of Engineering, Vukovarska 58, HR-51000 Rijeka, Croatia, 2009

Шаг 4: [Постобработка] Шаг включает в себя фильтрацию спекл-шума на РЛИ  $I(n, m)$  одним из существующих методов (например, Ли-Сигма фильтром<sup>6</sup>) и преобразование динамического диапазона линейной передаточной функцией (3.5).

Использование предложенной процедуры КТН автоподбора и компенсации ТН в процедуре обработки данных РСА позволило получать промежуточные РЛИ  $I_1(n, m)$  и  $I_2(n, m)$  как обзорного качества (низкое разрешение), так и весьма высокого качества в сжатые сроки (после автофокусировки подбором параметров).

Ниже представлена модернизированная процедура  $P_2$  обработки данных голограммы  $G(n, m)$  с использованием разработанных методов.

Процедура  $P_2$ :

Шаг 1: [Компенсация доплеровского смещения] Компенсация доплеровского смещения проводится аналогично Шагу 1 в  $P_1$ .

Шаг 2: [Компенсация ТН] На данном этапе голограмма  $G(n, m)$  обрабатывается процедурой КТН с применением созданных методов построения функций ТН  $Y(n)$ ,  $Z(n)$  и отображения  $G'(n, m)$ .

После получения  $G'(n, m)$ , функция проверяется на соответствие условиям однозначности и проводится процедура синтеза СА уже в контексте предметной области с использованием фильтра  $F_{nm}(x, y)$ , построенного по априорным значениям параметров полета ЛА.

Шаг 3: [Поиск оптимальных параметров фильтра] На этом шаге решается задача автофокусировки РЛИ  $I(n, m)$  с помощью поиска оптимального фильтра  $F'_{nm}(x, y)$  по предложенному методу АQ. Изображение с наибольшим значением функции  $Q(I_2(n, m))$  есть обзорное РЛИ высокого качества  $I_2(n, m)$ .

Шаг 4: [Точная автофокусировка] На данном шаге проводится автофокусировка РЛИ  $I(n, m)$  алгоритмом PGA по фрагментам голограммы  $G'(n, m)$ , выделенным на предыдущем шаге. Если по причине больших ТН  $Y(n)$  и  $Z(n)$  ( $dm > 1$ ) применение PGA невозможно, шаг пропускается. Если применяется PGA, пропускается Шаг 5. Результатом работы алгоритма PGA является РЛИ высокого разрешения  $I(n, m)$ . Подробное описание алгоритма PGA приведено в тексте диссертации.

Шаг 5: [Синтез] Проводится получение изображения  $I(n, m)$  из голограммы  $G'(n, m)$  с помощью процедуры СА с использованием фильтра  $F'_{nm}(x, y)$ , полученного на Шаге 3.

Шаг 6: [Постобработка] На данном шаге проводится преобразование динамического диапазона  $I(n, m)$  по методу ТППП с разными функциями ПДД для различных областей РЛИ с целью улучшения различимости некоторых объектов.

Ниже приводятся результаты применения процедур  $P_1$  и  $P_2$  на тестовой голограмме  $G(n, m)$ . В качестве тестовой голограммы выбрана произвольная голограмма высокого разрешения, траекторные нестабильности  $Y(n)$  и  $Z(n)$  на которой по дан-

<sup>6</sup> J.S. Lee, «A Simple Speckle Smoothing Algorithm for Synthetic Aperture Radar Images», IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Vol SMC-13, 1, p 85, 1983.

ным бортовых систем навигации, точность  $\Delta R$  удовлетворяет условиям (1.17) и (1.19). Голограмма выбиралась таким образом, чтобы на РЛИ  $I(n, m)$  присутствовали уголковые отражатели.

Использование процедуры КТН позволило уменьшить неопределенность адресной траектории  $dm$  при синтезе изображения, а использование автофокусировки  $AQ$  подбором скорости позволило получить оценку скорости полета ЛА с необходимой точностью. В совокупности это позволило применить методы автофокусировки, использующие фазовую историю точки (в работе применяется PGA). Что, в свою очередь, позволило достичь разрешения  $\sim 50$  см против  $\sim 2$  метров существующими методами. Примеры РЛИ, полученных процедурами  $P_1$  и  $P_2$ , приведены на Рис. 7.

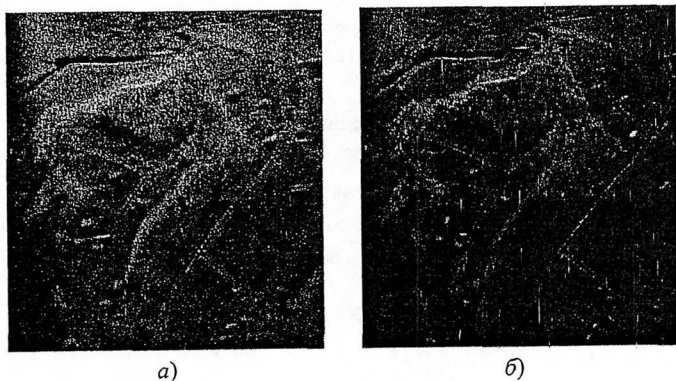
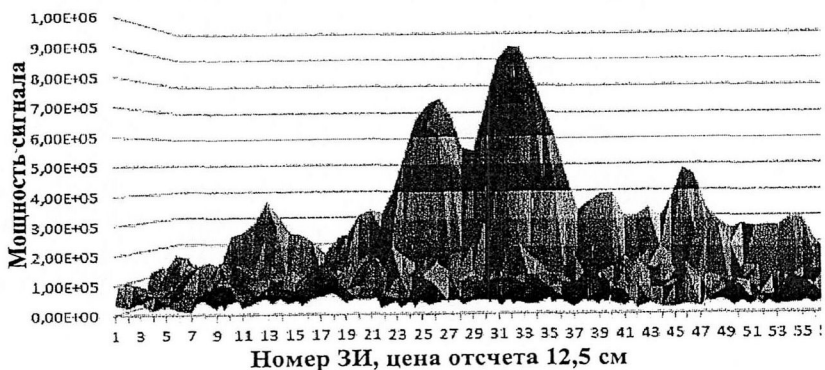


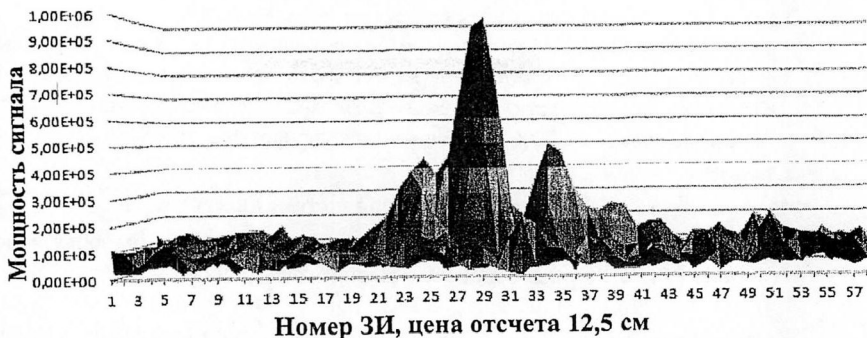
Рисунок 7 – Результаты применения процедур обработки данных:

а) результат работы  $P_1$ ; б) результат работы предложенной процедуры  $P_2$

На Рис. 8. приведены профили РЛИ уголкового отражателя, по которому проводилась оценка разрешающей способности РЛИ  $I(n, m)$ . Профили демонстрируют преимущество  $P_2$  над  $P_1$  в достигаемой разрешающей способности.



а)



б)

Рисунок 8 – Профиль отклика на угловой отражатель

- а)  $P_1$  (ширина по уровню  $-3$  дБ равна 1,75 метра (14 отсчетов по 12,5 см)),  
 б)  $P_2$  (ширина по уровню  $-3$  дБ равна 50 см (4 отсчета по 12,5 см))

#### Основные результаты и выводы

1) Разработана комплексная процедура обработки данных, включающая в себя предложенные математические методы. Она позволяет создать программу обработки данных радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) высокого разрешения и получить более качественное радиолокационное изображение (РЛИ) разрешения до 50 см из голограмм, снятых в недетерминированных условиях с использованием авиационного РСА. Процедура обработки данных, использующая только существующие методы автофокусировки, не позволяет получить разрешение меньше двух метров (при обработке тех же голограмм).

2) Предложен математический метод преобразования комплексной функции регистрируемого сигнала по данным бортовой навигационной системы, позволивший:

- упростить этап проектирования системы обработки данных за счет отсутствия необходимости учитывать траекторные нестабильности при построении согласованного фильтра;
- увеличить SNR на РЛИ на 3 дБ (за счет уменьшения неопределенности адресной траектории);
- получить данные системы РСА, удовлетворяющие требованиям существующих процедур обработки данных для систем РСА низкого разрешения.

3) Предложен эффективный метод итеративного определения характеристик фильтра, позволивший реализовать автофокусировку РЛИ и получить РЛИ разрешения до 1 метра (по уровню  $-3$  дБ) в недетерминированных условиях, в отличие от разрешения, не превышающего двух метров, получаемого ввиду особенностей снимаемой голограммы существующими методами автофокусировки.

4) Разработан математический метод оценки качества РЛИ, основанный на отображении комплексной функции принимаемого сигнала в область действитель-

ных чисел, значение которого мало подвержено влиянию шума, что позволило создать метод обработки данных с высоким уровнем шума.

5) Создан метод преобразования динамического диапазона, улучшающий различимость некоторых объектов на РЛИ с большим динамическим диапазоном. Константа различимости по закону Вебера-Фехнера для зернистых изображений показывает рост до 200% по сравнению с распространенным линейным преобразованием.

#### Публикации автора по теме диссертации

1. Гурьянов М.А. Выбор оптимальных способов преобразования динамического диапазона РЛИ // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2014. – №12. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/9/text.pdf>
2. Гурьянов М.А. Коррекция голограммы РСА в реальном времени по данным ИНС // Спецтехника и связь. – 2014. – №4. – С. 41-43.
3. Гурьянов М.А., Прокофьев А.А. Быстрый параметрический метод спектрального сравнения пикселей в процедуре сегментации изображения // Инновации и инвестиции. – 2014. – №7. – С. 105-107.
4. Гурьянов М.А. Оценка точности ярких целей на радиолокационном изображении // Глобальный научный потенциал. – 2014. – №11 – С. 103-105.
5. Гурьянов М.А. Математическая модель зондирования Земли авиационным РСА. Модифицированная процедура синтеза РЛИ. // Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики. 4-я научно-практическая конференция – Тольятти: 2014. – С. 49-54.
6. Гурьянов М.А. Автоподбор параметров синтеза радиолокационных изображений, полученных с авиационных РСА // Труды конференции МЭИнфо-2014. – Зеленоград: 2014. – 4. – С. 108.
7. Guryanov M.A. Using INS to correct SAR data on the fly // Proceedings of the Third Conference of Mathematical Society of Moldova IMCS-50. – Chisinau, Republic of Moldova: 2014. – 3. – p. 362-365.
8. Гурьянов М.А., Прокофьев А.А. Автоподбор параметров синтеза радиолокационного изображения, полученного с радиолокатора с синтезированной апертурой // Труды конференции Бесконечномерный анализ, стохастика, математическое моделирование: новые задачи и методы. Проблемы математического и естественнонаучного образования. – Москва: 2014. – 5. – С. 206-207.
9. Гурьянов М.А. Функция меры сфокусированности радиолокационного изображения, полученного с РСА // Труды конференции Перспективы развития науки и образования. – Москва: 2014. – т. 4. – С. 8-11.

Подписано в печать:

Формат 60x84 1/16. Уч.-изд.л. 4,2

Тираж 100 экз. Заказ № 17

Отпечатано в типографии ИПК МИЭТ.

124498, г. Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ