

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи



**Романов Александр Алексеевич**

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ СШИВКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ НЕИЗВЕСТНЫХ  
ЭЛЕМЕНТАХ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ**

Специальность: 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Татарский Б.Г.

Москва 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	12
1.1 Радиолокационный мониторинг земной поверхности.....	12
1.2 Обзор программных комплексов и алгоритмов сшивки изображений.....	24
1.3 Обзор методов определения качества изображений.....	28
1.4 Анализ автоматических методов обнаружения опорных точек на радиолокационных изображениях с перекрытием.....	31
1.4.1 Алгоритмы выделения и описания точек интереса на изображении.....	33
1.4.2 Интегральные изображения.....	38
1.4.3 Краткий обзор алгоритмов поиска ближайшего соседа.....	40
1.5 Постановка задачи на исследование.....	44
Выводы по главе 1.....	46
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ЕДИНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ КАРТЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	47
2.1 Оптимальный алгоритм сшивки радиолокационных изображений земной поверхности.....	47
2.2 Геометрические искажения РЛИ земной поверхности.....	50
2.3 Квазиоптимальный алгоритм сшивки радиолокационных изображений земной поверхности.....	54
2.3.1 Невозможность построения оптимального алгоритма.....	54
2.3.2 Автоматический поиск опорных точек на перекрывающихся РЛИ.....	54
2.3.3 Количественная характеристика насыщенности семантики РЛИ.....	60
2.3.4 Вычисление ориентации двух перекрывающихся РЛИ с помощью нейронных сетей.....	65

2.3.5 Вычисление ориентации двух перекрывающихся РЛИ с помощью метода наименьших квадратов.....	75
2.3.6 Построение графа связности.....	82
2.3.7 Уточнение ориентации набора перекрывающихся РЛИ.....	85
2.4 Общая структура алгоритма автоматической сшивки РЛИ земной поверхности с перекрытием при неизвестных элементах внешнего ориентирования.....	90
Выводы по главе 2.....	93
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СШИВКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	95
3.1 Поэтапное моделирование алгоритма сшивки радиолокационных изображений земной поверхности.....	95
3.1.1 Количественная оценка насыщенности семантики РЛИ земной поверхности .....	96
3.1.2 Автоматический поиск опорных точек на перекрывающихся РЛИ.....	99
3.1.3 Алгоритм поиска ориентации двух перекрывающихся РЛИ с помощью метода наименьших квадратов.....	104
3.1.4 Уточнение ориентации базового РЛИ.....	106
3.2 Предложения по формату хранения единой многослойной радиолокационной карты.....	109
3.3 Моделирование алгоритма автоматической сшивки радиолокационных изображений.....	110
3.4 Влияние высотных объектов и рельефа местности на точность сшивки.....	114
3.5 Влияние кривизны земной поверхности на точность сшивки.....	118
Выводы по главе 3.....	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	127
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	130
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	131

ПРИЛОЖЕНИЯ.....	145
Приложение А. Свойства проективного преобразования.....	145
Приложение Б. Сравнительные результаты поиска опорных точек с помощью оригинального и модифицированного алгоритмов SURF.....	147
Приложение В. Входные данные и результаты моделирования алгоритма поиска ориентации двух перекрывающихся РЛИ земной поверхности.....	149
Приложение Г. Интерфейс программы автоматической сшивки РЛИ земной поверхности.....	153
Приложение Д. Входные данные и результаты моделирования алгоритма автоматической сшивки радиолокационных изображений земной поверхности.	155
Приложение Е. Абсолютная и относительная ошибки определения расстояния на плоскости единой радиолокационной карты.....	166

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Радиолокационные станции (РЛС) землеобзора как космического, так и авиационного базирования приобретают все большее значение при решении задач мониторинга земной поверхности. Современные РЛС с синтезированием апертуры (РСА) позволяют получить радиолокационные изображения (РЛИ) высокого разрешения при любых погодных условиях и времени суток [1].

Наиболее ответственным и трудоемким видом обработки данных радиолокационного мониторинга земной поверхности является дешифрирование. Поэтому разработка теории и систем автоматизированного или автоматического дешифрирования РЛИ является одной из важнейших задач, решение которой позволит повысить оперативность получения результатов радиолокационного мониторинга [2].

Съемка большой территории множеством различных РЛС с получением РЛИ высокого разрешения (например, при прожекторном режиме РСА) способствует формированию множества отдельных изображений, дешифрировать которые целесообразно в виде единой многослойной радиолокационной карты.

Ошибка географической привязки РЛИ земной поверхности, полученной РСА авиационного базирования, может достигать сотен метров вследствие совокупности влияния множества факторов (рельефа местности, траекторных нестабильностей и прочих), что делает невозможным формирование радиолокационной карты путем простого наложения отдельных РЛИ согласно известной географической привязке. Кроме того, зачастую привязка РЛИ к местности осуществляется операторами вручную по заранее определенным эталонным объектам, что значительно увеличивает время обработки РЛИ.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности и степени автоматизации процедуры сшивки РЛИ земной поверхности с неизвестными элементами внешнего ориентирования. Для достижения

поставленной цели в ходе диссертационного исследования необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать и провести анализ алгоритмов поиска областей перекрытия двух РЛИ – областей с общей семантикой.
2. Провести оценку возможности расчета взаимной ориентации двух РЛИ на основе областей с общей семантикой.
3. Разработать и провести анализ алгоритмов расчета взаимной ориентации двух перекрывающихся РЛИ на основе областей с общей семантикой с учетом возможных геометрических искажений РЛИ земной поверхности.
4. Выполнить разработку и провести анализ алгоритмов уточнения ориентации нескольких перекрывающихся РЛИ.
5. Разработать алгоритм автоматической сшивки РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования.
6. Осуществить оценку влияния различных факторов на точность результатов сшивки РЛИ.

**Объект исследования.** В диссертационной работе в качестве объекта исследования рассматриваются РСА авиационного и космического базирования, формирующие РЛИ земной поверхности с высоким разрешением.

**Предмет исследования.** Алгоритм автоматической сшивки РЛИ земной поверхности, полученных с помощью различных РСА, при неизвестных элементах внешнего ориентирования.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана модификация алгоритма SURF обнаружения точек интереса на РЛИ с повышенной точностью вычисления их векторов описания.
2. Разработан алгоритм определения качества РЛИ через определение его формальной характеристики – насыщенности семантики изображения, которая количественно оценивается с помощью одномерных  $S$ ,  $S_{ps}$  и матричного  $S_m$  показателей. Данные показатели, в частности, позволяют

формализовать требования к насыщенности семантики РЛИ для систем автоматической обработки РЛИ.

3. Разработан алгоритм вычисления взаимной ориентации двух РЛИ по области перекрытия с учетом возможных геометрических искажений.
4. Разработан алгоритм уточнения ориентации нескольких перекрывающихся РЛИ путем уточнения ориентации базового РЛИ.
5. Разработан алгоритм автоматической сшивки РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования.

**Практическая значимость работы.** Разработанный алгоритм автоматической сшивки радиолокационных изображений позволяет создать алгоритмическое и программное обеспечения для систем автоматической обработки кадров РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования и отсутствии географической привязки.

**Методы исследования.** В ходе диссертационных исследований использовались методы обработки цифровых изображений, теории графов, нейросетевого и математического моделирования, вычислительной математики, сферической геометрии, а также теория синтеза искусственных апертур и общие методы теории статистической радиотехники.

**Достоверность полученных научных результатов** обеспечивается корректностью постановки задачи исследования, применением адекватного математического аппарата, а также непротиворечивостью полученных результатов экспериментальным данным.

**На защиту выносятся** следующие положения:

1. Разработанный модифицированный алгоритм SURF позволяет увеличить в среднем на 40% минимальное количество автоматически найденных опорных точек в области перекрытия сшиваемых РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования по сравнению с оригинальной версией алгоритма.

2. Введенные показатели оценки насыщенности семантики РЛИ и разработанный на их основе алгоритм автоматического определения качества предъявляемых изображений позволяют выбраковывать по насыщенности семантики входные изображения, подлежащие автоматизированной обработке.
3. Разработанный алгоритм вычисления взаимной ориентации двух РЛИ земной поверхности позволяет по опорным точкам определить параметры преобразования между системами координат обрабатываемых РЛИ с учетом возможных их геометрических искажений и ошибочно определенных опорных точек.
4. Полученный алгоритм уточнения ориентации базового РЛИ земной поверхности позволяет избежать ошибочной трансформации РЛИ, которая приводит к появлению в сшивке изображений бесконечного размера.
5. Разработанный алгоритм автоматической сшивки РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования обеспечивает формирование единой радиолокационной карты с точностью сшивки в единицы элементов разрешения за приемлемое время при соблюдении полученных требований к максимальному размеру сшивки и перепадам высоты местности внутри кадра РЛИ.

**Апробация результатов.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих мероприятиях:

- 56-я, 57-я и 58-я научные конференции МФТИ (2013-2015);
- 63-я научно-техническая конференция МИРЭА (2014);
- юбилейная научно-техническая конференция ОАО «Концерн «Вега» (2014);
- межрегиональный молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики» (2014);
- 13-я и 14-я международные конференции «Авиация и космонавтика» (2014, 2015);



- международная конференция «Инжиниринг & Телекоммуникации»— En&T (2014);
- VIII всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» (2014);
- молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2015» (2015);
- всероссийская конференция «Чтения по прикладным наукам», РАН (2015);
- XIII молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь – перспективные технологии» (2015);
- XLII международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения – 2016» (2016).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в монографии «Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х кн: Кн. 2. Робототехнические комплексы на основе БЛА» (М.: Радиотехника, 2016), в научно-техническом отчете о НИР «Перспектива - 500» и в 3 статьях в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России к публикации результатов диссертационных исследований соискателям ученых степеней доктора и кандидата технических наук, а так же в 10 печатных работах, включенных в сборники тезисов или докладов по результатам научных и научно-технических конференций.

#### **Внедрение результатов диссертационной работы.**

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении НИР «Перспектива - 500» в АО «Концерн «Вега», а также внедрены в учебном процессе кафедры 401 Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы из 113 наименований и 6 приложений. Текст диссертации изложен на 169 машинописных страницах, включает 81 рисунок и 22 таблицы.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, а также сведения об апробации и внедрении результатов диссертационной работы. Описана структура диссертационной работы и дано краткое содержание ее разделов.

**В первой главе** проведены краткий обзор современных РЛС землеобзора, аналитический обзор существующих алгоритмов и программных комплексов сшивки изображений различных типов, а также описаны задачи, решение которых целесообразно с помощью сшивки РЛИ земной поверхности. Особое внимание уделено анализу существующих алгоритмов обработки изображений, совокупность которых потенциально позволяет производить автоматический поиск опорных точек на РЛИ на основе их областей перекрытия.

**Во второй главе** сформулированы критерии оптимального алгоритма сшивки РЛИ земной поверхности, произведен анализ возможных геометрических искажений на РЛИ земной поверхности. Значительная часть главы посвящена разработке квазиоптимального алгоритма автоматической сшивки РЛИ земной поверхности, в составе которого описаны подходы и разработка алгоритмов автоматического поиска опорных точек, количественной оценки насыщенности семантики РЛИ, вычисления ориентации перекрывающихся РЛИ земной поверхности и уточнения ориентации базового РЛИ земной поверхности.

**В третьей главе** приведены результаты математического моделирования разрабатываемого алгоритма автоматической сшивки РЛИ земной поверхности и всех его этапов в отдельности, описаны предложения по практической реализации, а также проведена оценка влияния рельефа местности, высотных объектов и кривизны земной поверхности на точность получаемой единой радиолокационной карты.

**В заключении** представлены основные результаты диссертационного исследования. Далее, приведены списки сокращений и используемой литературы.

В приложение А вынесены основные свойства используемого в работе проективного преобразования. Приложения Б, В и Д содержат входные данные и результаты математического моделирования различных этапов обработки РЛИ разрабатываемого алгоритма автоматической сшивки РЛИ земной поверхности. В приложении Г представлены изображения консольного интерфейса программы для ЭВМ, разработанной в рамках реализации полученного алгоритма. Приложение Е содержит результаты оценки влияния кривизны земной поверхности на точность получаемой сшивки.

# ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

## 1.1 Радиолокационный мониторинг земной поверхности

Совершенствование методов радиолокационного зондирования земной поверхности привело к появлению РЛС с синтезированием апертуры (РСА).

В РСА первого поколения, размещаемых на ЛА, использовался строго боковой обзор земной поверхности и применялась аппаратурная реализация принципа синтезированной апертуры антенны, в которой сигналы с выхода фазовых детекторов приемника РСА регистрировались на первичную фотопленку в бортовом фоторегистрирующем устройстве. Картина, записанная на первичной пленке, представляла собой радиоголограмму. Для получения РЛИ после возврата ЛА с задания первичную пленку помещали в оптическое устройство обработки, где записанная радиоголограмма освещалась плоским световым пучком лазера. В результате такой процедуры восстанавливаются изменения амплитуды и фазы сигналов, принятых антенной РСА в соответствующий момент времени. Данная схема приводила к значительной задержке по времени получения РЛИ наблюдаемой поверхности [2].

В 70-х годах XX века появились первые РСА с цифровой обработкой (ЦРСА), позволяющие передавать радиолокационные данные на наземные пункты обработки, что значительно повысило оперативность получения результатов радиолокационного мониторинга. Развитие цифровых вычислительных систем в дальнейшем позволило проводить обработку данных сразу на борту носителя РСА.

Потребность в повышении разрешающей способности РСА требовала увеличения интервала синтезирования (времени когерентного накопления

отраженного сигнала), поэтому в помощь боковому способу обзора пришел телескопический (прожекторный).

При телескопическом обзоре РЛИ формируется в виде отдельного кадра в окрестности выбранной точки — центральной точки участка местности. Весь кадр формируется на одном интервале синтезирования, при этом наблюдаемый участок местности остается в зоне видимости за счет поворота ДНА. При таком способе обзора снимаются принципиальные ограничения на разрешающую способность за счет неограниченного теоретического времени обзора.

Для успешного синтезирования апертуры антенны с получением высокого разрешения необходимо знать положение и ориентацию носителя РЛС с высокой точностью в каждый момент времени на большом интервале синтезирования, что проблематично в условиях воздушных потоков атмосферы. В этой связи большую популярность приобрели РСА космического базирования, так как траектория полета космического аппарата прогнозируется с высокой точностью, что позволяет значительно уменьшить траекторные нестабильности.

Современные технологии позволяют создавать космические РСА, способные получать детальные изображения объектов на Земле с пространственным разрешением менее 1 метра [1].

Для нужд современной радиолокации Международным регламентом радиосвязи выделяются следующие диапазоны частот [1]:

- Р-диапазон, 0,432 – 0,460 ГГц,  $\lambda \sim 70$  см;
- L-диапазон, 1,215 – 1,300 ГГц,  $\lambda \sim 23$  см;
- S-диапазон, 3,100 – 3,300 ГГц,  $\lambda \sim 10$  см;
- C-диапазон, 5,250 – 5,570 ГГц,  $\lambda \sim 5,6$  см;
- X-диапазон, 8,025 – 8,650, 9,300 – 9,900 ГГц,  $\lambda \sim 3-3,5$  см;
- Ku-диапазон, 13,400 – 14,000 ГГц,  $\lambda \sim 2$  см.

Высокая эффективность решения разнообразных задач мониторинга с помощью РЛС привела к созданию множества различных РЛС землеобзора как авиационного, так и космического базирования. Следует отметить, что на

сегодняшний день среди РЛС землеобзора преобладают РСА вследствие большой разрешающей способности и бурного развития возможностей цифровой обработки сигнала на ЭВМ.

В составе комплекса БКР-1 самолета Су-24МР применяется РСА «Штык» (разработана в 1980-х годах), обеспечивающая съемку местности шириной 24 км с каждой стороны от линии пути с разрешением от 5 до 7,5 метров при «слепой» области размером 8 км непосредственно под самолетом [3]. Первичная обработка данных радиолокационного мониторинга, полученных с помощью РСА «Штык», производится после приземления самолета-носителя.

Отдельное внимание стоит уделить РСА «Абструкция» (в составе комплекса БКР-3), «Малыш-Э» и «РОНСАР» (используется на самолете Ту-214ОН для полетов по программе «Открытое небо»), разработанным АО «НИИ «Кулон» [4]. Данные РСА обеспечивают получение РЛИ высокого разрешения на борту самолета-носителя и передачу их на наземные пункты обработки в реальном масштабе времени через широкополосные средства связи. Характеристики данных РСА приведены в таблице 1.1 [5].

Таблица 1.1 – Характеристики РСА АО «НИИ «Кулон» при различных режимах работы (обзорный и детальный)

Название РСА	РОНСАР	Абструкция	Малыш-Э
Диапазон частот	X	X	X
Разрешающая способность, м			
обзорный	3	1-2	1-1,5
детальный	–	0,3-0,5	0,3-0,5
Полоса захвата, км			
обзорный	25	25	5
детальный	–	1	2
Масса, кг	230	300	300

Среди отечественных авиационных РСА также стоит отметить мобильный авиационный комплекс РСА «Компакт» [6, 7], разработанный ОАО «НИИ ТП». Параметры комплекса РСА «Компакт» представлены в таблице 1.2 [7, 8]. Данный комплекс позволяет проводить синхронную съемку в четырех диапазонах длин волн. Малогабаритность, стандартизованные конструктивные размеры и унифицированное программное обеспечение РСА «Компакт» позволяют в достаточно короткие сроки оснастить бортовой многочастотной РСА практически любой ЛА. К настоящему времени практическое применение данного комплекса было осуществлено на самолетах Ил-76, Ту-154, Ил-20, Ан-26, Ан-30, Ил-103, CN235, Y7 и вертолетах Ми-8, Ми-2, Ка-32, Bell-214.

Таблица 1.2 – Характеристики многочастотного комплекса РСА «Компакт»

Диапазон частот	X	L	P	VHF
Несущая частота, МГц	8500	1310	430	140
Полоса сигнала, МГц	300	100(200)	80	50(40)
Размеры антенны, м	0,25 x 0,25	Ø 0,35	Ø 0,5	1,3 x 0,1
Мощность импульса, Вт	60	250	200	150
Пространственное разрешение, м	~0,5	~0,8	~2,5	~3,5

Авиационная подсистема контроля земной поверхности, разработанная в АО «Концерн «Вега», состоит из многочастотного комплекса РСА и многоканального сканирующего комплекса СВЧ-радиометров «РАДИУС-М» [9, 10]. Аппаратура данной подсистемы может быть размещена на любом ЛА с диаметром фюзеляжа не менее 2,5 метра (была размещена на Ту-134А).

Многочастотный комплекс РСА описанной подсистемы имеет возможность проводить съемку одновременно в четырех диапазонах длин волн при различных поляризациях зондирующего сигнала, позволяет получать РЛИ объектов скрытых дымом, туманом, слоем растительности, снега или грунта, находящихся на

глубине до 70 метров под земной поверхностью. Обработка и отображение информации радиолокационного мониторинга происходит на борту ЛА во время полета. Характеристики данного комплекса представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Характеристики многочастотного комплекса РСА авиационной подсистемы контроля земной поверхности, разработанной АО «Концерн «Вега»

Диапазон частот	X	L	P	VHF
Длина волны, см	3,2	23	68	254
Разрешающая способность, м	0,5-4	2-5	3-8	5-12
Полоса обзора, км	3-32	12-32	24-50	
Поляризация	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ			

Сканирующий комплекс СВЧ-радиометров «РАДИУС-М» авиационной подсистемы контроля земной поверхности имеет возможность одновременной работы на четырех длинах волн. Обработка и отображение информации происходит после приземления ЛА. Характеристики комплекса «РАДИУС-М» представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Характеристики комплекса СВЧ-радиометров «РАДИУС-М»

Диапазон частот	Q	X	C	L	P
Длина волны, см	0,8	1,9	5,5	21	43
Разрешающая способность, м	10-50				
Полоса обзора, км	Равна высоте полета				
Поляризация	Горизонтальная				

Отдельные образцы иностранных авиационных РСА – «PAMIR», работающая в X-диапазоне (Германия); «LYNX» и «Prowler II», работающие в Ku-диапазоне (США) и другие – достигли уровня разрешения менее 10-15 см [11].

Малогабаритная РСА «NanoSAR-B» (США) массой менее 1 кг используется на борту БЛА «Scan Eagle», работает в X-диапазоне и имеет разрешение



0,3-5 метров. Среди малогабаритных иностранных авиационных РСА стоит отметить «PicoSAR» (Великобритания), установленную на БЛА «Falco», которая также работает в X-диапазоне и имеет пространственное разрешение менее 1 м.

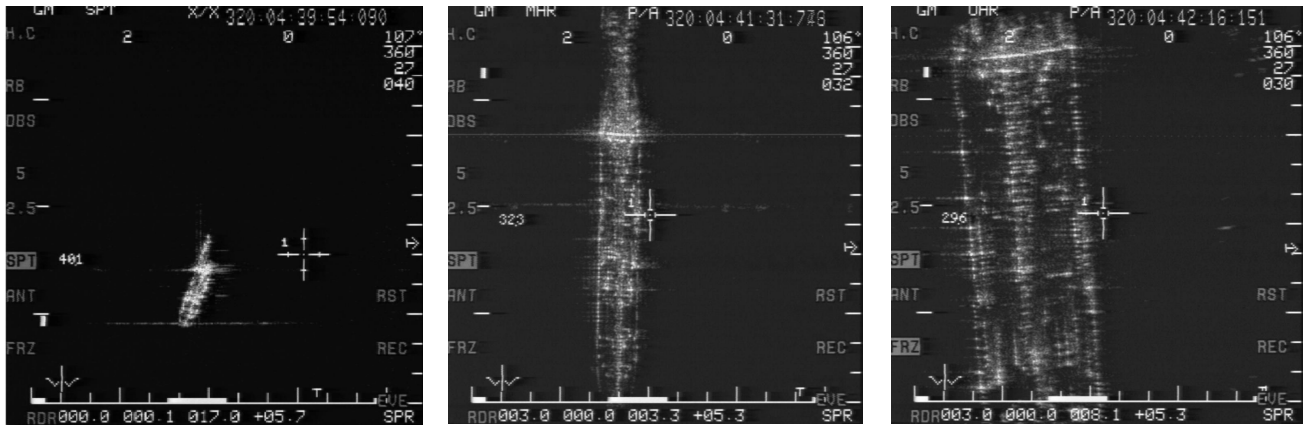
Авиационные РСА «E-SAR» и «F-SAR», разработанные Microwaves and Radar Institute (Германия), устанавливаются на ЛА Dornier Do 228, позволяют осуществлять радиолокационную съемку местности с разрешением до 0,25 м и 0,2 м [12]. Технические характеристики данных РСА представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Характеристики РСА «E-SAR» и «F-SAR»

РСА	E-SAR				F-SAR				
Диапазон частот	X	C	L	P	X	C	S	L	P
Несущая частота, МГц	9600	5300	1300	350	9600	5300	3250	1325	350
Полоса сигнала, МГц	50, 100				800	400	300	150	100
Разрешение									
по дальности, м	2, 4	2, 4	2, 4	2, 4	0,3	0,6	0,75	1,5	2,25
по азимуту, м	0,25	0,3	0,4	1,5	0,2	0,3	0,35	0,4	1,5
Полоса обзора, км	3, 5				12,5				

Среди иностранных многочастотных авиационных РСА, применяющихся в гражданских целях, можно отметить «AIRSAR» (P-, L-, C-диапазоны, США) и «RAMSES» (Франция), работающий в 8-ми частотных диапазонах – от P-диапазона до W-диапазона (длина волны около 3,2 мм) [11].

РСА «APG-76 MMRS», установленная на модернизированных многофункциональных истребителях F-4E израильских ВВС, позволяет во время полета на борту ЛА формировать РЛИ земной поверхности с разрешением 3, 1 и 0,3 метра (рисунок 1.1) [13].



а)

б)

в)

Рисунок 1.1 – РЛИ танкера, полученные авиационной РСА APG-76 MMRS, с разрешениями 3 м (а), 1 м (б) и 0,3 м (в)

Среди подповерхностных иностранных авиационных РСА необходимо отметить систему «Mineseeker» (Великобритания). Данная РСА, размещаемая на дирижабле, предназначена для обнаружения мин с воздуха и имеет разрешение порядка 5 см. РСА «CARABAS II» (Швеция) также позволяет производить наблюдения скрытых под растительным покровом или земной поверхностью объектов. Система «CARABAS II» работает в VHF-диапазоне (длины волн от 3,3 м до 15 м, горизонтальная поляризация) и имеет разрешающую способность от 3,3 до 15 метров [11].

Авиационных РСА, использующих вертолет в качестве носителя, значительно меньше. РСА «Forester», разработанная в США, работает в диапазоне частот VHF/UHF, позволяет обнаруживать людей и транспортные средства под покровом растительности. Антенна данной РСА располагается под фюзеляжем беспилотного вертолета A-160T [11]. Особенности работы вертолетных РСА землеобзора с примерами широко освещены в [14].

Среди действующих российских РСА космического базирования стоит отметить РСА «Северянин-М» для метеорологического космического аппарата (КА) «Метеор-М» [15], работающую на частоте 9615 МГц. В отличие от большинства современных РСА, оснащенных активной фазированной антенной

решеткой (АФАР), в РСА «Северянин-М» используется волноводно-щелевая антенна размерами 13,4 м x 0,25 м, обеспечивающая полосу обзора в 600 км при протяженности кадра 10 или 500 км, при этом пространственное разрешение настраивается в диапазонах 450-600, 800-1300 метров.

Два российских малых КА с РСА «Кондор-Э» [1, 16] были выведены на орбиту в 2013-2014 годах. Данная РСА, разработанная в АО «Концерн «Вега», работает на частоте 3191МГц и обладает широким набором режимов работы:

- прожекторный или телескопический (разрешение порядка 1 м, полоса съемки 8-10 км);
- маршрутный детальный (разрешение около 3 м, полоса съемки 10-25 км);
- обзорный (разрешение около 1,8 м, полоса съемки 20-40 км);
- широкозахватный (разрешение около 8 м, полоса съемки 120 км).

За рубежом интерес к РСА космического базирования значительно выше, чем к авиационным РСА [17]. Бурное развитие иностранных космических РСА продиктовано возможностью охвата большей территории при мониторинге, по сравнению с авиационными РСА, а также высоким уровнем коммерциализации дистанционного зондирования Земли, в то время как в России проблематично использование РСА в целях частных компаний.

В настоящее время на орбите действует множество иностранных РСА космического базирования, работающих в X-диапазоне [15, 18]: «TerraSAR-X» (Германия), «Tandem-X» (Германия), «SAR-2000» (Италия), «XSAR» (Германия), «TecSAR» (Израиль), «Lacrosse» (США), «FIA Radar» (США), «IGS-Radar» (Япония) и другие.

Отдельное внимание стоит уделить коммерческим РСА «TerraSAR-X» и «TanDEM-X» (точная копия «TerraSAR-X»). Данные РСА работают на частоте 9,6 ГГц в прожекторном, маршрутном и широкозахватном режимах с пространственным разрешением 1, 3 и 15 метров и полосой съемки 15, 30 и 100 км соответственно. В настоящий момент данные РСА задействованы в бистатическом режиме, при этом орбита «TerraSAR-X» стабильна, а «TanDEM-X

поддерживает движение на удалении 300-600 метров от него. Основной задачей тандема РСА является создание трехмерной модели поверхности Земли с использованием интерферометрической съемки. В скором времени планируется запуск третьей копии РСА «TerraSAR-X» под обозначением «Paz SAR-X», которая будет работать в интересах Испанского агентства CDTI.

Среди зарубежных космических РСА С- и S-диапазонов [15] следует отметить коммерческие РСА «Radarsat-2» (Канада), «ASAR» (Европейское космическое агентство), «RISAT-1» (Индия) и «HJ 1C» (Китай). Характеристики данных РСА представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Характеристики зарубежных космических РСА С- и S-диапазонов

РСА	Radarsat-2	ASAR	RISAT-1	HJ-1C
Несущая частота, МГц	5405	5331	5350	3200
Полоса обзора, км	150-500	400-500	400	-
Полоса съемки, км				
маршрутный	20, 25, 70	100	30	40
прожекторный	-	-	10	-
широкозахватный	100-500	405	120, 240	100
съемки морских волн	-	5	-	-
Разрешение, м				
маршрутный	3, 11, 28	28	3, 12	5
прожекторный	-	-	~1	-
широкозахватный	25-100	150, 980	25, 50	20
съемки морских волн	-	30	-	-

Космические РСА L-диапазона значительно меньше распространены. Новейшие китайские разведывательные РСА серии «Yaogan», работающие в данном диапазоне, могут обеспечивать разрешение до 1,5 м.

РСА «TerraSAR-L» (Германия) работает на частоте 1268 МГц и имеет следующие режимы съемки:

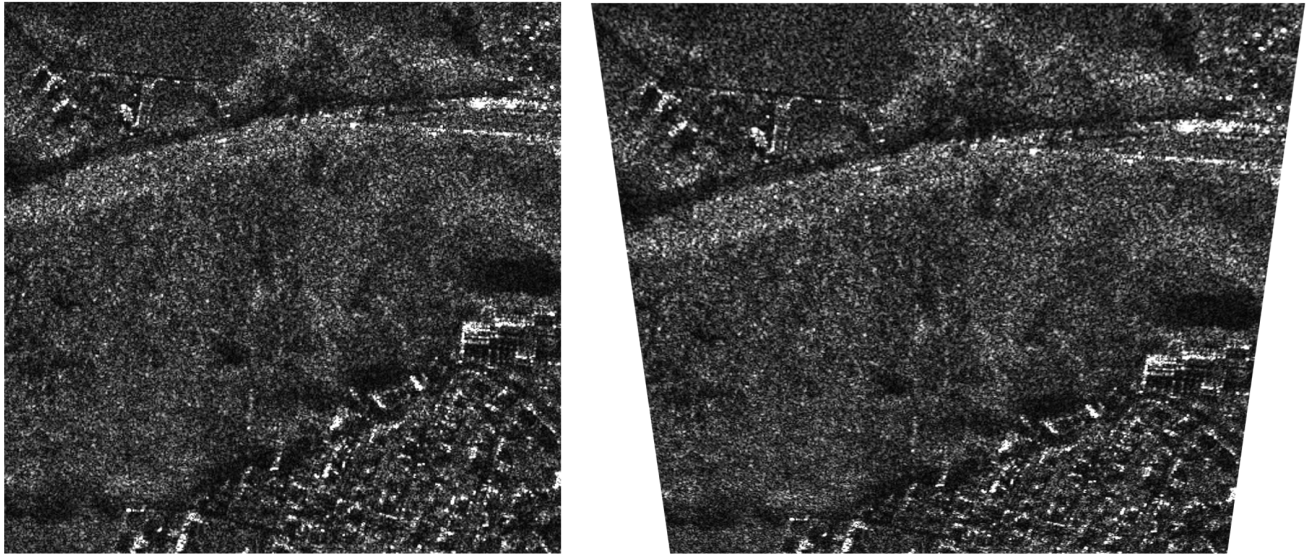
- маршрутный (разрешение 5 и 9 м при полосе съемки 40 и 60 км соответственно);
- широкозахватный (разрешение 50 м при полосе съемки 180 или 260 км).

Космический РСА «PALSAR-2» (Япония), работающий на частоте 1,2 ГГц, позволяет в прожекторном режиме получать разрешение около 1 метра при размере одного кадра 25 x 25 км. При работе в маршрутном и широкозахватном режимах обеспечивается разрешение 3-10 и 100 м при полосе съемки 50-70 и 350 км соответственно.

Процесс обработки данных радиолокационного мониторинга земной поверхности подразделяется на два этапа.

К первому этапу – первичной обработке данных – относятся:

- 1) обработка первичных радиолокационных сигналов с формированием РЛИ местности, в том числе операции сжатия по наклонной и путевой дальностям, компенсация флуктуаций фаз сигналов с помощью методов микронавигации или алгоритмов автофокусировки [19], подавление шумов и других искажающих факторов;
- 2) дешифрирование РЛИ, включающее в себя обнаружение и классификацию объектов на изображении;
- 3) радарграмметрическая обработка РЛИ, позволяющая определить координаты и размеры объектов на РЛИ, а так же провести коррекцию геометрических искажений изображения (рисунок 1.2) и его географическую привязку к местности;
- 4) обработка РЛИ с целью сокращения избыточности для передачи по радиоканалу или более компактного хранения в ПЗУ.



а)

б)

Рисунок 1.2 – РЛИ земной поверхности с проективными искажениями до (а) и после (б) радарграмметрической обработки

Ко вторичной обработке данных радиолокационного мониторинга относятся анализ результатов первичной обработки данных путем сопоставления с результатами предыдущих полетов радиолокационного или других средств мониторинга (оптико-электронных, радиотехнических, аэрофотографических и прочих) и уточнение географической привязки РЛИ земной поверхности по обнаруженным и распознанным ориентирам. Результаты вторичной обработки данных обеспечивают повышение полноты, точности и достоверности получаемой информации [2]

Из всех перечисленных этапов обработки полной автоматизации меньше всего поддаются процессы дешифрирования и вторичной обработки данных. Данные этапы обработки относятся к наиболее интеллектуальному и трудно формализуемому виду деятельности человека. В этой связи в целях повышения оперативности и эффективности обработки данных радиолокационного мониторинга для оператора должны формироваться изображения, отвечающие его субъективным требованиям к их качеству, иначе говоря, наиболее удобные для анализа.

Высокая информативность современных РСА, обеспечиваемая повышенной детальностью формируемых РЛИ, а также применением многочастотных РСА с поляризационной обработкой данных, способствует увеличению объема получаемой радиолокационной информации, что, в свою очередь, усложняет процедуры дешифрирования и вторичной обработки данных радиолокационного мониторинга. В этом случае для удобства анализа данных оператором целесообразно формирование единой многослойной радиолокационной карты путем совмещения имеющихся РЛИ земной поверхности.

Географическая привязка РЛИ в современных РСА проводится в основном двумя способами:

- 1) с использованием телеметрии носителя РСА (элементов внешнего ориентирования);
- 2) по обнаруженным и распознанным опорным объектам (точечным или протяженным ориентирам или эталонам цифровой карты местности), координаты которых известны.

Первый способ географической привязки полностью автоматический, однако может давать погрешность до нескольких сот метров или даже нескольких километров [2].

Второй способ географической привязки обладает большей точностью, выполняется как с участием оператора, так и автоматически (за исключением начального формирования набора опорных объектов для заданного района мониторинга, который проводится с участием оператора) [20]. К недостаткам данного способа можно отнести возможную недоступность цифровой карты местности на заданный район мониторинга или недостаточное количество найденных опорных объектов на одиночном РЛИ. В крайнем случае эффективнее проводить географическую привязку единой радиолокационной карты, составленной из одиночных РЛИ земной поверхности.

Приведенный обзор систем радиолокационного мониторинга показал, что современные РСА землеобзора как авиационного, так и космического

базирований позволяют получать РЛИ земной поверхности в широком спектре диапазонов длин волн с различной степенью детализации и проникающей способностью сигналов в зависимости от поставленных задач мониторинга. Кроме того, стоит подчеркнуть, что полностью исключить оператора из обработки данных радиолокационного мониторинга земной поверхности в настоящее время и в ближайшей перспективе не удастся. Тем не менее, для повышения оперативности получения информации на основе РЛИ целесообразно сводить его участие к минимуму.

## 1.2 Обзор программных комплексов и алгоритмов сшивки изображений

Амплитудное РЛИ представляет собой полутоновое изображение разрядностью 8 или 16 бит, по форматам хранения ничем не отличающееся от любого другого изображения. В этой связи для более полного анализа необходимо в том числе рассмотреть программные комплексы и алгоритмы сшивки нерадиолокационных изображений.

Задачи сшивки или совмещения различных одиночных изображений актуальны в различных областях человеческой деятельности: медицина, компьютерное зрение, фотография, дистанционное зондирование земли и другие [21, 22]. Процесс сшивки изображений состоит из следующих этапов: ориентации изображений друг относительно друга и их последующего наложения [23].

Цель этапа **ориентации** (корегистрации) изображений заключается в приведении всех изображений в единую систему координат (СК). В ряде случаев, в СК одного из исходных изображений, которое называется базовым (опорным, эталонным). Различные алгоритмы ориентации изображений специфичны и зависят от способа формирования изображений.

Алгоритмы наложения преобразованных на этапе ориентации изображений друг на друга большей частью универсальны – не зависят от типа и способа формирования изображений. Алгоритмы наложения различаются по способам



сглаживания видимых границ на стыке изображений, а так же по формату хранения результатов наложения: единое изображение или множество отдельных преобразованных изображений с информацией об их ориентации.

Программные комплексы и алгоритмы создания панорам из отдельных фотографий, такие как Hugin [24], [25], [26] и многие другие, не используют параметры внешнего ориентирования, проводя корегистрацию по опорным точкам, автоматически найденным в областях перекрытия изображений. Однако в процессе расчетов подразумевается, что все изображения сформированы из одной точки обзора, но при разных направлениях линии визирования. Такая модель формирования изображений не позволяет использовать данные методы для сшивки РЛИ земной поверхности. Алгоритмы создания панорам, предполагающие движение точки обзора, такие как [27] и [28], дают визуально приемлемый результат, однако допускают на результирующем изображении неоднородности масштаба, приводящие к искажений дешифровочных признаков, поэтому также не применимы в нашем случае.

Сшивка аэрофотографий с получением фотосхем и ортофотопланов является одной из актуальных задач совмещения изображений. Среди программных комплексов, решающих данную задачу, стоит отметить Photomod (Photomod GeoMosaic, Photomod UAS), разработанный компанией ЗАО «Ракурс» [29], и Photoscan компании ООО «Агисофт» [30]. Для корректной работы помимо самих изображений данным программным продуктам требуются координаты центров проекций изображений или элементы внешнего ориентирования носителя фотоаппарата. В рамках этапа ориентации изображений поддерживается возможность как ручного, так и автоматического нахождения опорных точек, позволяющих проводить уточнение корегистрации. К недостаткам данных программных продуктов стоит отнести низкую стабильность автоматической сшивки аэрофотографий, полученных в зимний период (содержащих помимо снежных однотонных областей некоторое количество контрастных объектов), а также огромное потребление ресурсов ЭВМ в случае Photoscan.

К сожалению, в силу особенностей формирования и прочих отличий РЛИ от фотографий применение в радиолокации программных комплексов и алгоритмов сшивки аэрофотографий не дает стабильного и качественного результата.

В радиолокации и радионавигации сшивка или сопоставление РЛИ земной поверхности как с другими РЛИ, так и с изображениями, полученными иными способами, также является актуальной задачей [5].

Совмещение РЛИ земной поверхности с оптическими изображениями (например, аэрофотографиями) позволяет повысить вероятность обнаружения и качество распознавания объектов [31, 32].

Задача совмещения РЛИ земной поверхности с географически привязанными эталонными изображениями, хранящимися на борту ЛА, решается в корреляционно-экстремальных навигационных системах (КЭНС), позволяющих проводить уточнение местоположения и навигацию ЛА. Эталонные изображения в таких системах могут быть получены как с помощью цифровой карты местности, так и с помощью аэрофото- или радиолокационной съемки, проведенной заранее [20, 33, 34].

Совмещение нескольких РЛИ одного участка местности, полученных в одном диапазоне длин волн, но в разное время, позволяет выявлять изменения на местности [35], возникающие в результате природных катаклизмов (разливы рек [36], последствия цунами, просадки земной поверхности [37]) или человеческой деятельности (вырубки леса, нефтяные разливы [38], прокладка дорог, возведение оборонительных сооружений).

Электромагнитные волны разных частотных диапазонов отличаются по проникающей способности. Так РЛС, излучающие в Х-диапазоне, не способны достичь объекта под кронами деревьев, в то время как РЛС Р-диапазона обнаруживают подземные протечки дамб. Совмещение нескольких РЛИ одного участка местности, полученных при съемке в различных диапазонах длин волн или поляризациях, позволяет повысить информативность радиолокационного

мониторинга, а также вероятность обнаружения замаскированных или скрытых под покровом растительности объектов [5].

В настоящее время, задачи совмещения или сшивки РЛИ земной поверхности, полученных с помощью космических РСА, позволяют решать следующие программные комплексы:

- система Photomod Radar [39], разработанная компанией ЗАО «Ракурс», поддерживает форматы данных большого количество космических РСА;
- линейка программный продуктов Scanex (Scanex Image Processor, Scanex ENVISAT Processor и другие) [40] проводит обработку данных, полученных от широкого спектра космических аппаратов как радиолокационного, так и оптического зондирования Земли;
- программное обеспечение Geomatica Radar Suite [41], разработанное компанией PCI Geomatics, поддерживает обработку данных небольшого количества определенных космических РСА;
- проекты с открытым исходным кодом Next ESA SAR Toolbox (NEST) [42] и Science Toolbox Exploitation Platform (STEP) [43], разрабатываемые Европейским космическим агенством, обрабатывают данные космических РСА, эксплуатируемых в рамках программы Scientific Exploitation of Operational Missions (SEOM).

Данные программные комплексы предназначены для обработки данных радиолокационного мониторинга, полученных с помощью ряда космических РСА, содержат множество инструментов визуализации, дешифрирования, радарграмметрической обработки, оценки качества, улучшения и анализа РЛИ земной поверхности. Кроме того, указанные программные продукты позволяют проводить автоматическое совмещение РЛИ земной поверхности, полученных в режиме интерферометрической съемки. Сшивка РЛИ, полученных иным способом, осуществляется автоматически с помощью набора параметров внешнего ориентирования носителя РСА в момент съемки или массива наземных контрольных (опорных) точек, составленного оператором заранее.

Из представленного обзора программных комплексов совмещения и сшивки изображений, полученных в различных диапазонах длин волн, следует, что в настоящее время не существует решения задачи полностью автоматической сшивки РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования.

### 1.3 Обзор методов определения качества изображений

**Семантикой** изображения называют смысловое содержание изображения. Под семантическим анализом изображения подразумевается автоматическое получение семантического описания (аннотации) изображения, а также поиск в пространстве таких описаний – поиск по содержанию изображения [44].

Многим системам автоматизированной или автоматической обработки РЛИ (например, решающим задачи сшивки РЛИ земной поверхности или поиска и распознавания объектов на изображении) требуются семантически насыщенные изображения (рисунок 1.3, а) или, другими словами, РЛИ, которым присущи ярко выраженные изменения контрастности в пределах кадра изображения. Использование таких систем для обработки изображений со скудной однородной семантикой (рисунок 1.3, б) приведет только к потере времени без достижения требуемого результата, поэтому целесообразно проводить объективную оценку насыщенности семантики РЛИ перед обработкой.

Субъективность восприятия изображений человеком сильно усложняет применение формализованных подходов для решения задач обработки и описания изображений [45]. Разработка объективных показателей оценки изображений, способных заменить субъективную оценку человека, является важным шагом на пути к полной автоматизации систем обработки изображений.

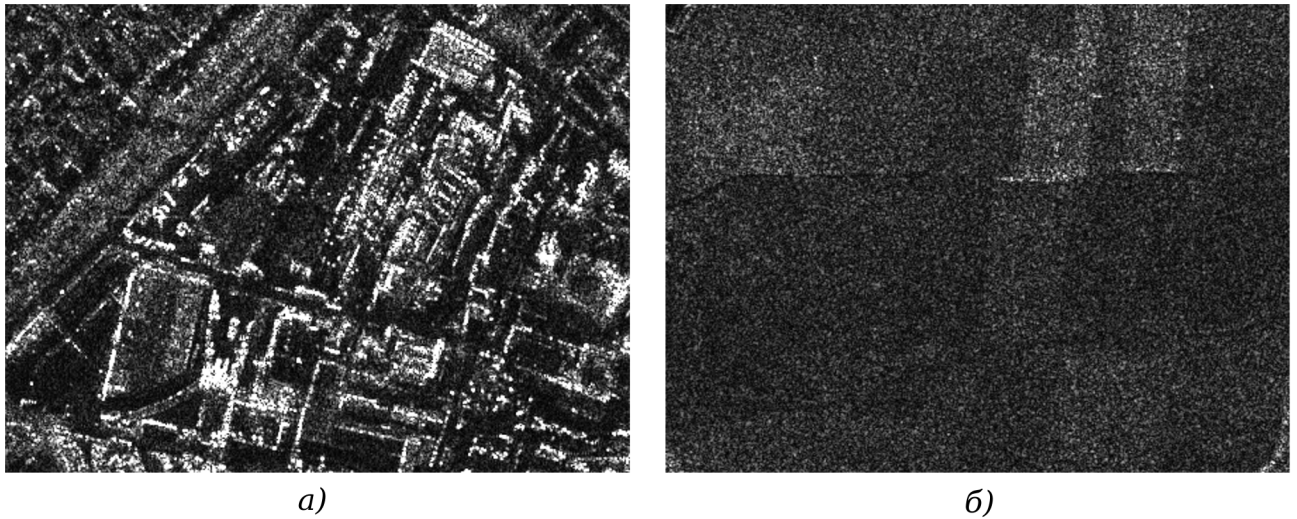


Рисунок 1.3 – РЛИ городских построек (а) и сельскохозяйственного поля (б)

На сегодняшний день большое внимание было уделено объективным показателям, позволяющим судить о схожести изображений или их фрагментов. К таким показателям можно отнести коэффициент Бхаттачария [46, 47], индексы структурного сходства SSIM (structural similarity measure), MISIM (moment invariants based similarity measure) [48] и множество других. Показатели данной группы подразумевают наличие двух изображений, между которыми и рассчитывается тот или иной показатель сходства, поэтому применить подобные показатели в задаче оценки насыщенности семантики РЛИ не представляется возможным.

Похожая задача оценки информативности (не путать с информативностью из области теории информации, качественно не имеющей ничего общего с семантикой изображения) решается в алгоритмах составления видео сводки – минимального набора наиболее информативных кадров, способных кратко описать содержание видеозаписи [49]. Однако информативность кадра в таких алгоритмах определяется не анализом семантики, присущей данному кадру, а отличием его от остальных кадров видеопоследовательности, что не позволяет использовать данные алгоритмы для решения задачи определения насыщенности семантики РЛИ.

Алгоритмы эталонной (в зарубежной литературе full-reference) оценки качества и информативности изображения, например, предложенные в работах [50], [51] и [52], фактически оценивают отличие обрабатываемого (искаженного) изображения от эталонного (оригинального). Аналогичные безэталонные (в зарубежной литературе no-reference) алгоритмы оценки качества, описанные, например, в [53] и [54], получают количественную оценку уровня шумов, артефактов (искажения из-за алгоритмов сжатия с потерями) или степени размытия объектов на изображении, что не имеет ничего общего с насыщенностью семантики изображения.

В [55] предложена следующая процедура вычисления количественного параметра  $Q$  насыщенности семантики (в работе используется термин «информационная насыщенность», аналогичный по описанию) изображения:

$$Q = \frac{1}{8(n-2)(m-2)} \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=1}^{m-2} G_{i,j}, \quad (1)$$

$$G_{i,j} = \sum_{i1=i-1}^{i+1} \sum_{j1=j-1}^{j+1} \begin{cases} 1, & \text{если } I(i,j) = I(i1,j1), \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $I(i,j)$  – входное изображение, а  $n$  и  $m$  – его размеры. Информационная насыщенность полутонового изображения  $Q$  равна 1, когда яркость каждого пикселя отличается от яркости пикселей его окрестности, и 0 в противном случае. Данный подход чувствителен к малейшему шуму на изображении, в частности, к спекл-шуму – неотъемлемой составляющей каждого РЛИ. В этой связи применять данный параметр для оценки насыщенности семантики РЛИ неэффективно.

Из анализа рассмотренных показателей оценки качества изображений следует, что в настоящее время не существует алгоритма, способного проводить объективную оценку насыщенности семантики РЛИ земной поверхности.

## 1.4 Анализ автоматических методов обнаружения опорных точек на радиолокационных изображениях с перекрытием

Для поиска ориентации (корегистрации) двух перекрывающихся изображений в рамках решения задач сшивки или совмещения РЛИ земной поверхности без географической привязки при неизвестных или известных с большой погрешностью элементах внешнего ориентирования необходимо проводить анализ непосредственно самих изображений, а точнее, их области перекрытия.

В настоящее время существуют различные подходы к вычислению ориентации изображений с помощью анализа их области перекрытия [56]:

- корреляционно-экстремальные алгоритмы;
- на основе различных интегральных преобразований;
- на основе оптического потока;
- на основе выделения, описания и сопоставления точек интереса.

Корреляционно-экстремальные методы сводятся к поиску экстремума функции сходства между двумя изображениями, которые называют обрабатываемым и эталонным. В качестве функции сходства часто используется нормированная взаимная корреляционная функция:

$$F(x, y) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} f_{ЭИ}(i, j) f_{ОИ}(i+x, j+y)}{\sqrt{\left[ \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} f_{ЭИ}^2(i, j) \right] \cdot \left[ \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} f_{ОИ}^2(i+x, j+y) \right]}}, \quad (3)$$

где  $f_{ЭИ}(i, j)$  и  $f_{ОИ}(i, j)$  – яркости эталонного и обрабатываемого изображения в точке  $(i, j)$  соответственно, а  $M, N$  – размеры эталонного изображения.

Корреляционно-экстремальные методы позволяют успешно определить взаимное расположение двух обрабатываемых изображений при параллельном

переносе одного относительно другого, однако практически неустойчивы к изменению масштаба (менее 0,925 или более 1,075), повороту (более 3,5 градусов) или проективным искажениям [34]. Для успешного использования методов данного типа в этом случае необходимо искать сходство не только с исходным изображением, но и всячески преобразованным, согласно описанным искажениям, что значительно увеличивает затрачиваемое на обработку время и потребляемые ресурсы ЭВМ.

Методы интегральных преобразований могут основываться на преобразовании Фурье, разложению по различным вейвлетам [57] и прочих. К недостаткам данных методов можно отнести низкую устойчивость к перспективным (проективным) искажениям, малый максимальный определяемый сдвиг и, как правило, высокие требования к отношению сигнал/шум [58], что неприемлемо для РЛИ земной поверхности в виду наличия спекл-шума.

Точку, попавшую в область перекрытия сшиваемых или сопоставляемых изображений, будем называть **опорной**, если известны ее координаты в СК обоих изображений.

Различные методы определения оптического потока [59, 60] фактически вычисляют сдвиг каждого пикселя из СК одного изображения в СК другого, что дает очень плотный набор опорных точек. Такие методы не имеют ограничений на тип преобразования СК между изображениями, однако дают стабильный результат только в случае сравнительно небольших смещений пикселей [58]. В этой связи методы на основе оптического потока незаменимы при поиске изменений на последовательных кадрах видеопоследовательности, однако не применимы в задачах сшивки или совмещения РЛИ земной поверхности.

В настоящее время существует множество методов автоматического поиска опорных точек на основе выделения, описания и сопоставления точек интереса [56, 61]. В составе данных методов выделяют алгоритмы:

- поиска (выделения) точек интереса (LoG [62], DoG [63] и другие);



- вычисления векторов описания (дескрипторов) точек интереса (GLOH [64], LESH [65] и другие);
- сопоставления векторов описания точек интереса с целью поиска опорных точек (на основе k-мерных деревьев [66], RANSAC [67] и другие).

Кроме того, существуют алгоритмы, объединяющие в себе как выделение, так и описание точек интереса. К таким алгоритмам можно отнести SIFT и SURF, показывающие наилучший результат.

Приведенный обзор показывает, что для поиска опорных точек на перекрывающихся РЛИ земной поверхности необходимо использовать алгоритмы на основе выделения, описания и сопоставления точек интереса.

#### 1.4.1 Алгоритмы выделения и описания точек интереса на изображении

Выделение точек интереса в SURF (Speeded-Up Robust Features) [68] происходит путем обнаружения локальных максимумов детерминанта матриц следующего вида:

$$H(x, y, \sigma) = \begin{vmatrix} L_{xx}(x, y, \sigma) & L_{xy}(x, y, \sigma) \\ L_{yx}(x, y, \sigma) & L_{yy}(x, y, \sigma) \end{vmatrix}, \quad (4)$$

$$L_{xx}(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \sum_a \sum_b e^{-\frac{-(a)^2+(b)^2}{2\sigma}} I(x-a, y-b), \quad (5)$$

где  $L_{xy}(x, y, \sigma)$ ,  $L_{yx}(x, y, \sigma)$ ,  $L_{yy}(x, y, \sigma)$  вычисляются аналогично (5),  $\sigma$  – степень размытия изображения фильтром Гаусса [69], а  $I(x, y)$  – обрабатываемое РЛИ.

**Пирамидой изображения** называется набор уменьшенных копий изображения, включая исходное.

Для обрабатываемого РЛИ строится набор пирамид с различной степенью размытости ( $\sigma$ ) фильтром Гаусса, для каждом изображения которых и происходит поиск точек интереса. Таким образом, найденная точка интереса характеризуется

координатами  $(x,y)$ , а так же параметрами изображения из пирамиды, на котором она была обнаружена, — масштабом  $(s)$  и степенью размытости  $(\sigma)$  фильтром Гаусса.

Рассмотрим одну найденную точку интереса. Для устойчивости вектора описания повороту семантики изображения между двумя РЛИ, его вычисление происходит относительно некоторого угла (ориентации точки интереса), получаемого следующий образом.

В каждой точке окрестности точки интереса радиусом  $6s$  проводится двумерное горизонтальное и вертикальное вейвлет-преобразования Хаара [69], при этом длина стороны вейвлета равна  $4s$  (рисунок 1.4).

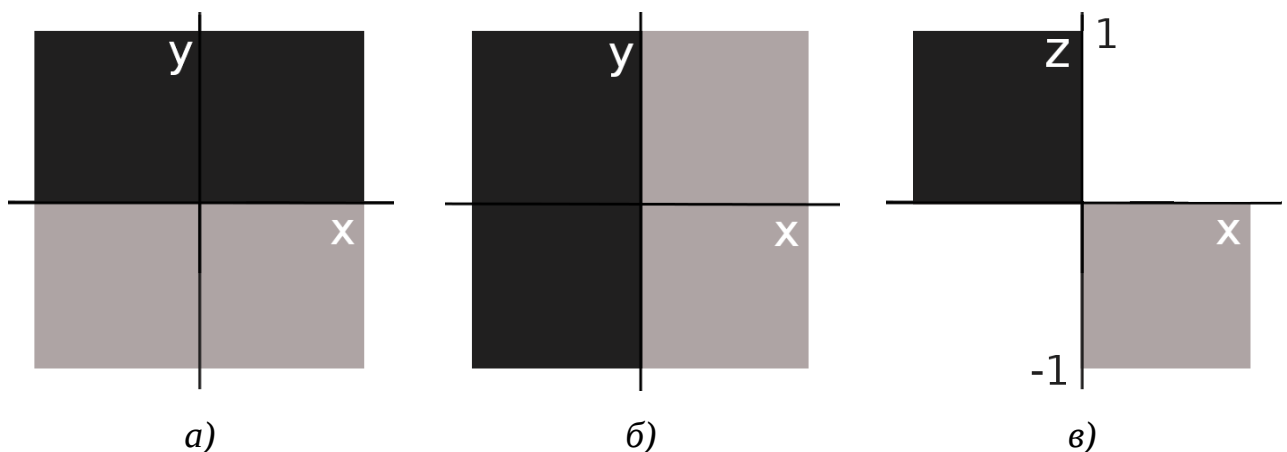


Рисунок 1.4 – Горизонтальный (а) и вертикальный (б) вейвлеты Хаара, проекция горизонтального вейвлета Хаара на плоскость, перпендикулярную изображению (в)

Таким образом, каждую точку рассматриваемой окрестности можно представить в пространстве  $Odx dy$ , где по осям откладываются  $dx$  и  $dy$  – значения горизонтального и вертикального двумерного вейвлет-преобразования Хаара соответственно (рисунок 1.5, а). Направление из начала координат, в котором сумма  $dx$  и  $dy$  всех точек, попавших в окно  $\pi/3$  по этому направлению, максимальна, считается ориентацией данной точки интереса.

Далее, с учетом полученной ориентации точки, ее окрестность делится на 16 квадратных сегментов (рисунок 1.5, б), размер которой зависит от масштаба изображения, на котором была найдена точка интереса. Для каждой точки сегмента окрестности снова вычисляются значения горизонтального и вертикального двумерного вейвлет-преобразования Хаара  $dx$  и  $dy$  соответственно (в связи с поворотом системы координат на угол ориентации точки интереса, предыдущие значения  $dx$  и  $dy$  не подойдут). В итоге каждый сегмент определяют четыре величины  $\sum dx$ ,  $\sum |dx|$ ,  $\sum dy$ ,  $\sum |dy|$ , где суммируются значения  $dx$  и  $dy$  каждой точки данного сегмента. Искомый дескриптор состоит из описания всех 16 сегментов – является вектором с размерностью  $16 \cdot 4 = 64$ .

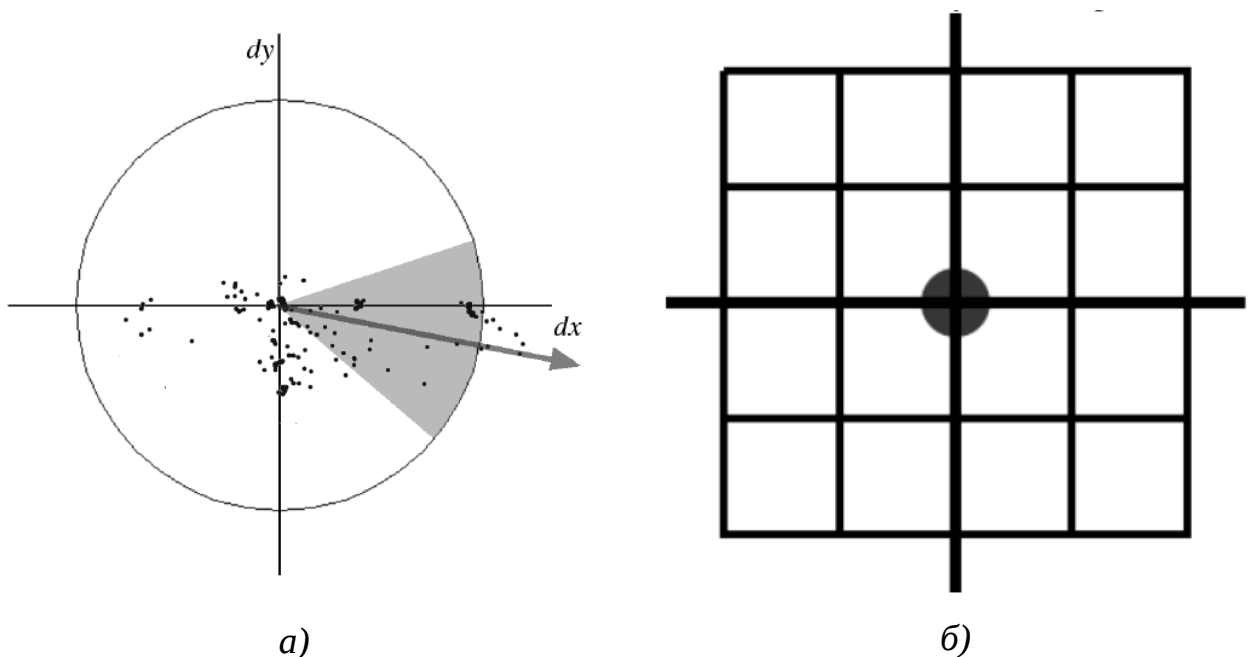


Рисунок 1.5 – Определение ориентации точки интереса по двумерному вейвлет-преобразованию Хаара в точках ее окрестности (а) и разбиение окрестности точки интереса при вычислении вектора описания (б)

В SIFT (Scale-invariant feature transform) [70] поиск точек интереса основан на определении точек локального экстремума функции дифференциала размытого фильтром Гаусса изображения:

$$D(x, y, \sigma) = \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{1}{2\pi\sigma} \sum_a \sum_b e^{-\frac{((a)^2+(b)^2)}{2\sigma}} I(x-a, y-b) . \quad (6)$$

Значения данной функции вычисляются путем попиксельного вычитания двух копий изображений одинакового масштаба (в SIFT обработка также проводится по набору пирамид изображения) с различной степенью размытости ( $\sigma$ ) фильтром Гаусса.

Далее, происходит уточнение координат найденной точки интереса с помощью аппроксимации рядом Тейлора второго порядка в этой точке:

$$D(\mathbf{x}) = D + \frac{\partial D}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{x} + \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \frac{\partial^2 D}{\partial \mathbf{x}^2} \mathbf{x} , \quad (7)$$

$$\mathbf{x} = (x, y, \sigma)^T . \quad (8)$$

В (8) первая производная  $D$  является градиентом, вторая – матрицей Гессе. Экстремум многочлена Тейлора находится путем приравнивания нулю его производной, при этом смещение найденной точки относительно точных координат экстремума:

$$\hat{\mathbf{x}} = \frac{-\partial^2 D^{-1} \partial D}{\partial \mathbf{x}^2} . \quad (9)$$

Далее, проверяется на малость значение функции (6) в полученной точке. Не прошедшие проверку точки интереса выкидываются.

Ориентация точки интереса вычисляется исходя из гистограммы направлений градиентов точек ее окрестности радиусом  $1,5s$ . Гистограмма состоит из 36 компонент, которые равномерно покрывают 360 градусов. Искомой ориентацией считается направление максимальной компоненты гистограммы.

Далее, как и в SURF, учитывая ориентацию точки интереса, для вычисления вектора описания используется окрестность найденной точки интереса, разбитая

на 16 сегментов (рисунок 1.5, б). Каждый сегмент характеризуется гистограммой градиентов пикселей региона из 8 компонент, разбивающих 360 градусов на равные сектора по 40 градусов. Каждая компонента является суммой величин градиентов ее направления. Гистограмма нормируется, после чего все ее компоненты, значение которых больше 0,2, принимают значение 0,2, и проводится повторная нормировка. Таким образом, вектор описания в SIFT имеет размерность 128 (16 сегментов имеют гистограмму из 8 компонент).

При приблизительно схожем качестве получаемых точек интереса к преимуществам SIFT перед SURF можно отнести большее их количество (до 1,5 раз) при обработке одного и того же изображения, однако при этом SIFT затрачивает примерно в 2,5 раза больше времени, чем SURF. Объем ОЗУ, потребляемый SIFT при обработке РЛИ большой площади значительно превышает объем ОЗУ, необходимый для SURF, что существенно ужесточает требования к ЭВМ. Оба алгоритма в одинаковой степени устойчивы к смене угла обзора подстилающей поверхности (до 50 градусов) в угломестной плоскости [68].

Две точки интереса на различных изображениях считаются **совпавшими** (составляют опорную точку), если евклидово расстояние между их векторами описания не превышает порогового значения. Если у точки есть два совпадения, выбирается ближайшее.

В [71] к недостаткам SURF относят большую уязвимость дескрипторов точек интереса к повороту семантики изображения в сравнении с SIFT. Действительно, при сопоставлении дескрипторов точек интереса двух РЛИ со стопроцентным перекрытием имеет место существенное уменьшение количества найденных совпадений (опорных точек) при приближении угла поворота семантики к значениям  $\alpha = \pi/4 + \pi n/2$ , где  $n$  – целое число (рисунок 1.6). Уменьшение количества найденных опорных точек влияет на точность определения взаимной ориентации двух РЛИ.

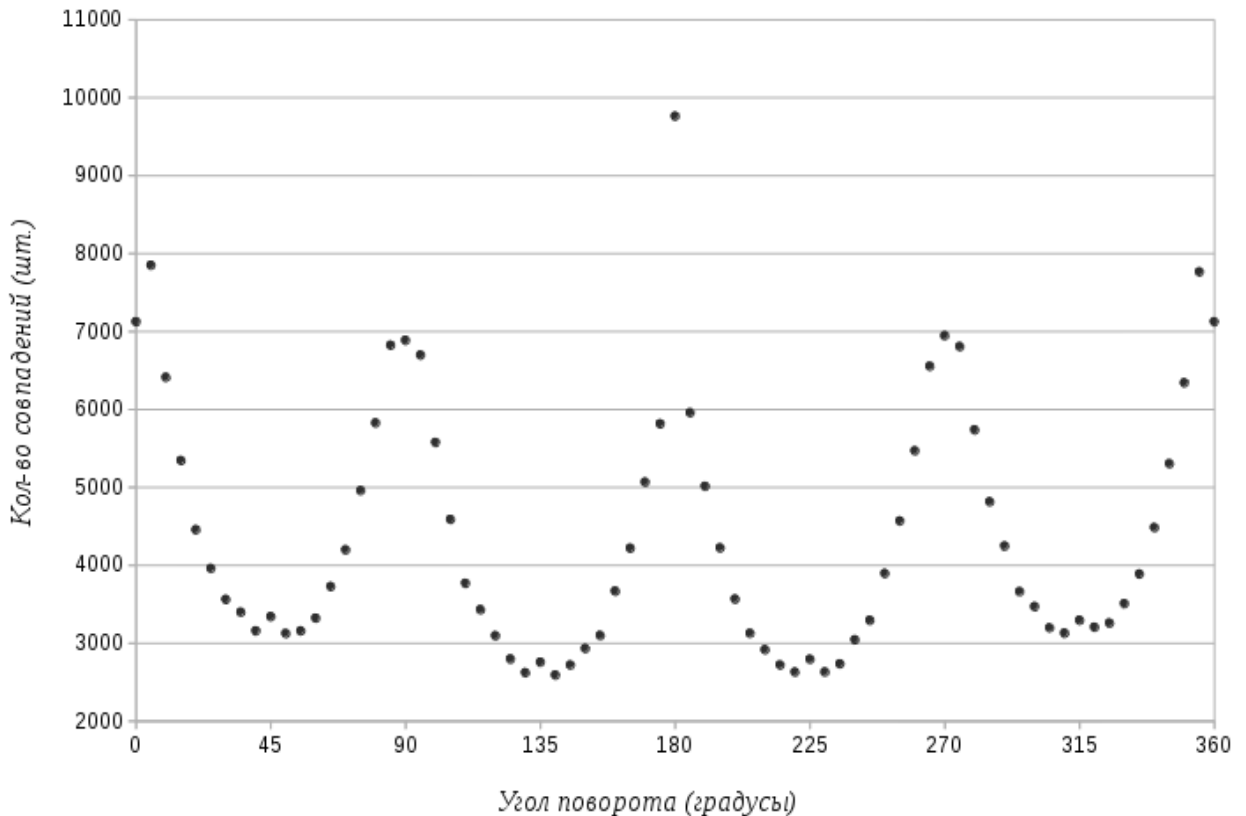


Рисунок 1.6 – Количество найденных совпадений между точками интереса SURF двух РЛИ со стопроцентным перекрытием при различных углах поворота их семантики друг относительно друга

Учитывая меньшие требования к ЭВМ и более оперативную обработку изображений, для эффективного поиска точек интереса на РЛИ необходимо модернизировать алгоритм SURF с целью ослабления уязвимости дескрипторов точек интереса к повороту семантики изображения.

#### 1.4.2 Интегральные изображения

На всех этапах алгоритма SURF вместо исходных изображений применяются интегральные:

$$I_{\Sigma}(x, y) = \sum_{i=0}^{i \leq x} \sum_{j=0}^{j \leq y} I(i, j), \quad (10)$$

где  $I(i, j)$  – исходное изображение. Стоит отметить, что размер интегрального изображения равен размеру исходного изображения, из которого оно было получено.

Интегральное изображение позволяет оперативно находить сумму значений пикселей исходного изображения в заданной прямоугольной области. Например, для прямоугольника ABCD (рисунок 1.7) на исходном изображении имеем:

$$\sum_{L \in ABCD} I(L) = I_{\Sigma}(C) + I_{\Sigma}(A) - I_{\Sigma}(B) - I_{\Sigma}(D). \quad (11)$$

Стоит отметить, что выражение (11), содержащее всего 4 операции сложения, справедливо для области ABCD любого размера.

Использование интегральных изображений в значительной степени ускоряет вычисление вейвлет-преобразование Хаара, так как вне зависимости от масштаба (параметр  $s$ , описанный в подразделе 1.4.1) заданной точки  $O$  свертка ее окрестности с двумерным вейвлетом Хаара (рисунок 1.4) потребует всего 6 операций сложения [68] (рисунок 1.7):

$$\begin{aligned} [I_{\Sigma}(F) + I_{\Sigma}(A) - I_{\Sigma}(E) - I_{\Sigma}(D)] - [I_{\Sigma}(C) + I_{\Sigma}(E) - I_{\Sigma}(B) - I_{\Sigma}(F)] = \\ = 2I_{\Sigma}(F) + I_{\Sigma}(A) - 2I_{\Sigma}(E) - I_{\Sigma}(D) - I_{\Sigma}(C) + I_{\Sigma}(B). \end{aligned} \quad (12)$$

Стоит отметить, что умножение на 2 не является трудоемкой операцией для ЭВМ, так как в случае двоичной записи представляет собой сдвиг вправо на 1 бит.

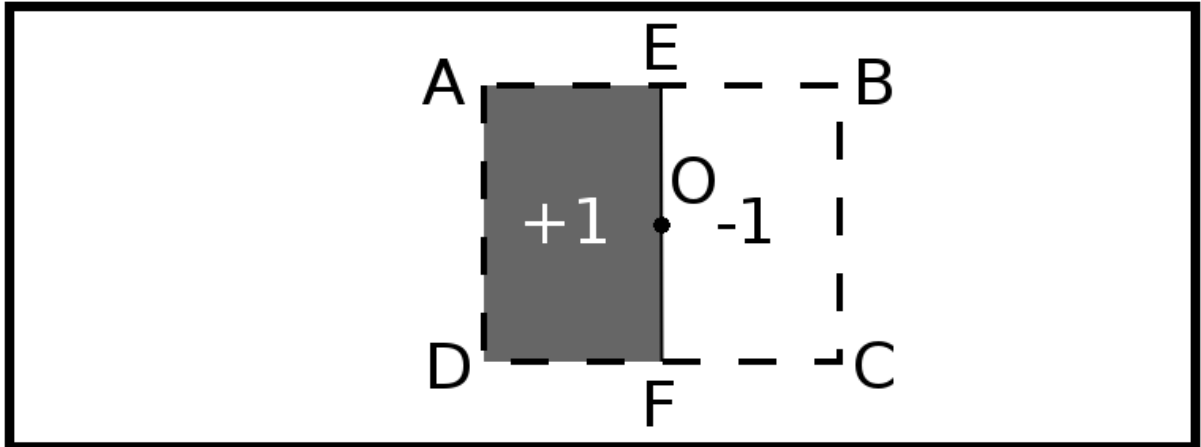


Рисунок 1.7 – Двумерный вейвлет Хаара, наложенный на изображение

Приблизительное вычисление второй производной из (5) алгоритма SURF в [68] происходит также с использованием интегральных изображений, что дает значительный выигрыш в производительности по сравнению с традиционными методами.

Из вышесказанного следует, что при обработке изображений целесообразно применение методов, основанных на интегральных изображениях.

### 1.4.3 Краткий обзор алгоритмов поиска ближайшего соседа

Для решения задачи перебора и сравнения дескрипторов точек интереса разных РЛИ целесообразно рассмотреть алгоритмы поиска ближайшего соседа. Данные алгоритмы делятся на точные (найденная точка гарантированно будет ближайшей к заданной) и неточные (найденная точка будет ближайшей или дальше ближайшей не более чем на заданное  $\epsilon$ ), а также классифицируются по способу разбиения пространства элементов (точек), среди которых проводится поиск [72]. В связи с необходимостью получения наиболее достоверных опорных точек исключим из рассмотрения неточные алгоритмы поиска.



В настоящее время существует множество точных алгоритмов поиска ближайшего соседа, среди которых можно выделить:

- полный перебор или линейный поиск (без разбиения пространства элементов);
- поиск в BSP-дереве;
- поиск в R-дереве;
- поиск в  $k$ -мерном дереве ( $kd$ -дереве);
- поиск в VP-дереве.

Пусть оба РЛИ имеют по  $n$  точек интереса ( $n \sim 10^4$ - $10^7$ , как правило на практике), с размерностью  $k$  их дескрипторов (64 для SURF).

Наиболее простым способом поиска опорных точек является полный перебор точек интереса каждого изображения и сравнение их дескрипторов. Однако, принимая во внимание возможное огромное количество точек интереса, этот способ требует значительных вычислительных затрат. Сложность метода полного перебора для поиска совпадения одной точки интереса (поиска 1 ближайшего соседа) оценивается  $O(n)$ , для всех точек –  $O(n^2)$ .

При построении BSP-дерева [73] пространство элементов разбивается на два подпространства с равным (или близким к равному) количеством элементов гиперплоскостью размерности  $k-1$ , которые аналогично разбиваются далее, пока в каждом подпространстве не останется не более заданного  $l$  элементов (как правило значение  $l$  близко к 1). Таким образом, BSP-дерево является бинарным (двоичным) сбалансированным деревом (рисунок 1.8, а), каждый узел которого связан с очередной разбивающей гиперплоскостью, а каждый лист дерева содержит не более  $l$  элементов.

Поиск по BSP-дереву широко используется в визуализации трехмерной компьютерной графики, однако построение такого дерева значительно осложняется в рассматриваемых многомерных пространствах дескрипторов точек интереса необходимостью поиска корректной многомерной гиперплоскости.

Разбиение по R-дереву [73] широко применяется для поиска среди протяженных элементов — каждый лист такого дерева является не точкой, а интервалом допустимых значений (ограничивающий кубоид). Такой подход позволяет быстро ответить на вопрос о различных множествах, в которые попала заданная точка, что не соответствует типу решаемой нами задачи.

Kd-дерево или k-мерное дерево [74] является частным случаем BSP-дерева с упрощенным способом поиска разделяющих гиперплоскостей. В данном дереве разбиение пространства элементов происходит по одной из координатных осей. Гиперплоскость проводится перпендикулярно выбранной координатной оси через медианный для этой оси элемент поиска — разбивает пространство на два подпространства с равным количеством элементов, в которых рекурсивно строятся k-мерные поддеревья. В каждом последующем разбиении координатные оси циклически чередуются. Пример разбиения двумерного пространства в kd-дерево показан на рисунке 1.8, б.

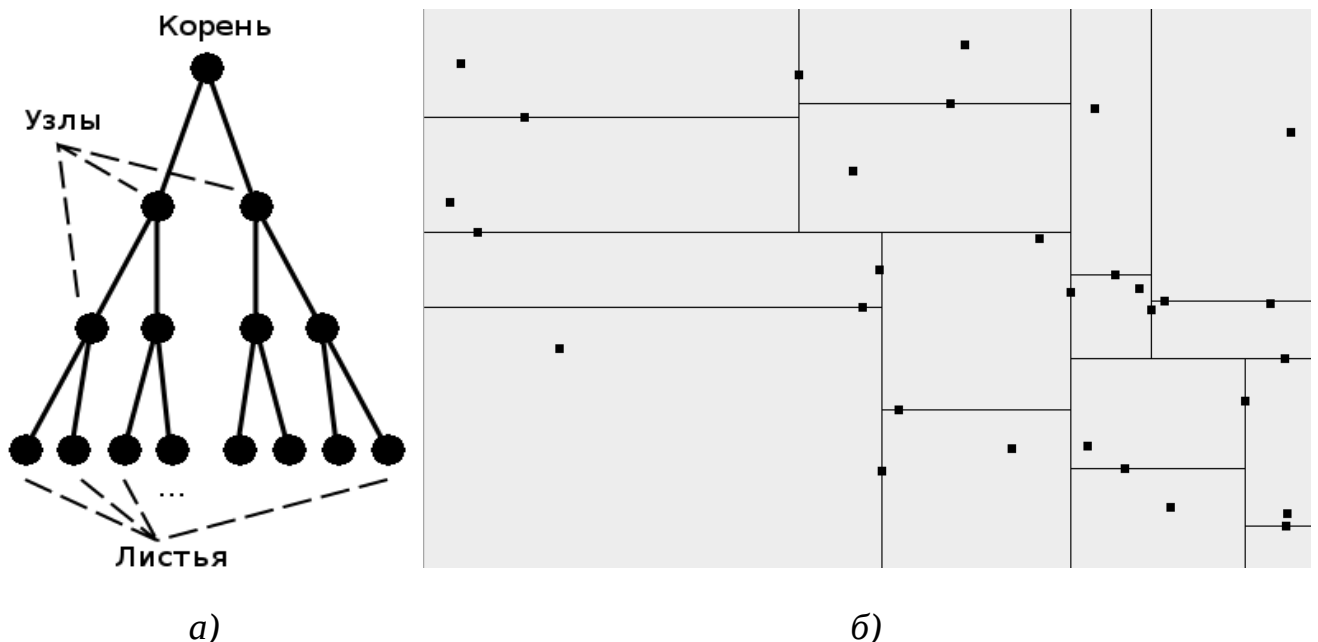


Рисунок 1.8 – Пример бинарного сбалансированного дерева (а) и разбиение двумерной плоскости с 30 точками для формирования kd-дерева с листьями, содержащими одну точку (б)

Таким образом, каждый узел kd-дерева содержит запись о выбранной для разбиения координатной оси, а также элемент, через который прошла гиперплоскость разбиения. Каждый лист дерева содержит не более заданного  $l$  элементов.

Поиск ближайшего соседа по kd-дереву проводится в два этапа.

Первоначально для заданной точки ищется элемент-кандидат на роль ближайшего соседа путем спуска от корня дерева к его листьям. При этом для выбора поддерева дальнейшего пути в каждом узле происходит сравнение значения одной координаты заданной точки и точки данного узла, так как разбивающая гиперплоскость перпендикулярна выбранной координатной оси. При достижении листа дерева проводится линейный поиск среди  $l$  его точек и выбирается ближайшая, которая становится элементом-кандидатом. Расстояние от заданной точки до найденного кандидата обозначим через  $r$ .

Второй этап предполагает повторный спуск по kd-дереву с поиском точек, лежащих в окрестности радиусом  $r$  заданной точки. Найденная во время спуска такая точка становится элементом-кандидатом, радиус окрестности корректируется, и спуск продолжается дальше. По окончании спуска элемент-кандидат и есть ближайший сосед к заданной точке.

Сложность построения kd-дерева определяется сложностью выбора медианного элемента для каждого разбиения. Один из популярных способов предлагает до разбиения проводить сортировку элементов по каждой координатной оси ( $k$  раз), тогда сложность построения данного дерева в худшем случае оценивается  $O((k+1)n \log n)$ . Поиск 1 ближайшего соседа по kd-дереву в среднем оценивается  $O(\log n)$ .

Vr-деревья [75] также являются бинарными, основываются на выборе для каждого разбиения опорной точки (случайно или путем поиска точки с наибольшей дисперсией расстояний до других точек). Каждый узел такого дерева содержит выбранную опорную точку и радиус  $r$ . Пространство элементов делится на два подпространства (которые аналогично разбиваются рекурсивно) с помощью

гиперсферы радиуса  $r$  с центром в опорной точке. Значение  $r$  выбирается как среднее расстояние от опорной до всех остальных точек (или до случайной выборки из них в случае большого  $n$ ), что на практике дает разбиение, близкое к медианному. Каждый лист  $vr$ -дерева содержит не более заданного  $l$  элементов.

Поиск по  $vr$ -дереву проводится аналогично поиску по  $kd$ -дереву, но с учетом разбиения гиперсферами – при прохождении узла вычисляется расстояние от заданной точки до опорной и сравнивается с радиусом  $r$  данного узла.

Сложность построения  $vr$ -дерева не зависит от размерности пространства и в худшем случае оценивается  $O(n \log n)$ . Поиск 1 ближайшего соседа по  $vr$ -дереву в среднем оценивается  $O(\log n)$ , как и у  $kd$ -дерева.

В [72] и [76] утверждают, что поиск ближайшего соседа по  $kd$ -дереву в многомерных пространствах неэффективен и значительно проигрывает по скорости  $vr$ -дереву. Действительно, для поиска одной опорной точки, суммарная сложность операций (построение и поиск) у алгоритма с  $kd$ -деревом составляет  $O((n(k+1)+1)\log n)$  против  $O((n+1)\log n)$  для  $vr$ -дерева. Однако, в нашем случае ( $k = 64$  для SURF,  $n \sim 10^4-10^7$ ), вследствие многократного ( $n$ ) поиска по одному и тому же разбиению, разница становится менее заметной. Кроме того, в каждой операции при работе с  $vr$ -деревом присутствует вычисление расстояния от заданной точки до опорной, что в 64-мерном пространстве занимает гораздо больше времени, чем сравнение всего одной координаты в аналогичных операциях  $kd$ -дерева.

Приведенный обзор показывает, что для сопоставления множеств дескрипторов точек интереса алгоритма SURF с целью определение опорных точек целесообразно использовать алгоритм поиска ближайшего соседа с разбиением по  $kd$ -дереву.

## 1.5 Постановка задачи на исследование

Для повышения эффективности и степени автоматизации дешифрирования и вторичной обработки большого массива РЛИ земной поверхности

целесообразно формирование единой многослойной радиолокационной карты с помощью сшивки. Существующие алгоритмы сопоставления и сшивки изображений не позволяют проводить автоматическую сшивку РЛИ при неизвестных элементах внешнего ориентирования.

В этой связи необходимо разработать алгоритм автоматической сшивки РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования. Искомый алгоритм, опираясь на массив РЛИ земной поверхности с попарным перекрытием, полученных с помощью различных РСА, должен осуществлять формирование единой многослойной радиолокационной карты с точностью в единицы элементов разрешения. При этом обрабатываемые РЛИ могут быть получены при съемке в различных диапазонах длин волн и отличаться пространственным разрешением.

Вопросы географической привязки полученной единой радиолокационной карты в данной диссертационной работе не поднимаются, так как в настоящее время уже существуют алгоритмы автоматизированной географической привязки РЛИ земной поверхности по аэрофотографиям или цифровым картам местности (например, [5]).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать и провести анализ алгоритмов поиска областей перекрытия двух РЛИ – областей с общей семантикой.
2. Провести оценку возможности расчета взаимной ориентации двух РЛИ на основе областей с общей семантикой.
3. Разработать и провести анализ алгоритмов расчета взаимной ориентации двух перекрывающихся РЛИ на основе областей с общей семантикой с учетом возможных геометрических искажений РЛИ земной поверхности.
4. Выполнить разработку и провести анализ алгоритмов уточнения ориентации нескольких перекрывающихся РЛИ.
5. Разработать алгоритм автоматической сшивки РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования.

6. Осуществить оценку влияния различных факторов на точность результатов сшивки РЛИ.

### **Выводы по главе 1**

1. РЛС землеобзора позволяют проводить мониторинг земной поверхности вне зависимости от времени суток и погодных условий, а также обнаруживать скрытые под покровом растительности или земной поверхностью объекты. Автоматизация процессов обработки данных радиолокационного мониторинга является актуальным и востребованным направлением развития современных РЛС.
2. Задача совмещения и сшивки РЛИ земной поверхности, полученных в различное время с помощью множества РСА в различных диапазонах длин волн, актуальна во множестве случаев. В настоящее время не существует алгоритмов полностью автоматической сшивки РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования.
3. Необходимо проводить объективную оценку насыщенности семантики РЛИ перед обработкой в системах автоматизированной или автоматической обработки РЛИ во избежание потерь времени без достижения требуемого результата. В настоящее время не существует алгоритма, способного проводить объективную оценку насыщенности семантики РЛИ.
4. При неизвестных элементах внешнего ориентирования и географической привязки РЛИ земной поверхности корегистрацию изображений необходимо проводить путем анализа областей перекрытия. Для поиска опорных точек в областях перекрытия целесообразно модернизировать алгоритм SURF и использовать его в совокупности с алгоритмом поиска ближайшего соседа с разбиением в kd-дерево.

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ЕДИНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ КАРТЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

### 2.1 Оптимальный алгоритм сшивки радиолокационных изображений земной поверхности

Пусть во входном наборе РЛИ земной поверхности имеется  $I_i$  –  $i$ -е изображение, которое может быть описано, как:

$$I_i: P_i \rightarrow B_i, P_i \subset \mathbb{R}^2, B_i \subset \mathbb{R}, \quad (13)$$

где  $P_i$  – множество точек на изображении, а  $B_i$  – множество яркостей.

Тогда процесс формирования РЛИ  $I_i$  можно представить, как отображение  $F_i$ :

$$F_i: P_{Ei} \rightarrow P_i, P_{Ei} \subset \mathbb{R}^3, \quad (14)$$

где  $P_{Ei}$  – область земной поверхности, попавшая в район съемки. Проекцию множества  $P_{Ei}$  на плоскость земной поверхности представим, как отображение  $J_i$  (рисунок 2.1):

$$J_i: P_{Ei} \rightarrow P_{Si}, P_{Si} \subset \mathbb{R}^2, \quad (15)$$

где  $P_{Si}$  – ортогонально спроецированное на плоскость земной поверхности множество  $P_{Ei}$ .

Для входного набора перекрывающихся РЛИ земной поверхности  $\Omega$  справедливо:

$$\forall I_i \in \Omega \exists I_j \in \Omega: O_{Eij} = P_{Ei} \cap P_{Ej} \neq \emptyset, \quad (16)$$

где  $O_{Eij}$  – область местности, попавшая одновременно на РЛИ  $I_i$  и  $I_j$ , тогда области перекрытия (области с общей семантикой) на РЛИ  $I_i$  и  $I_j$ :

$$O_{ij}^i = F_i(O_{Eij}), O_{ij}^j = F_j(O_{Eij}), O_{ij}^i \subset P_i, O_{ij}^j \subset P_j. \quad (17)$$

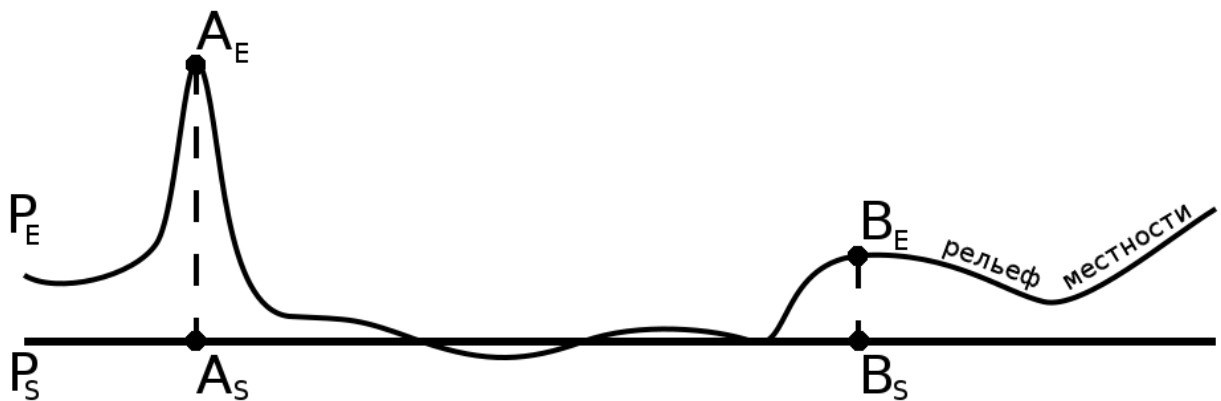


Рисунок 2.1 – Ортогональная проекция области земной поверхности, попавшей в район съемки, на плоскость земной поверхности

Целью оптимального алгоритма сшивки является формирование единой радиолокационной карты путем преобразования всех входных изображений в некую единую СК. Таким образом, для каждого изображения необходимо найти преобразование  $G_i$ :

$$G_i: P_i \rightarrow L_i, L_i \subset P_R, P_R = \bigcup_i L_i, \quad (18)$$

где  $L_i$  – множество точек РЛИ земной поверхности  $I_i$ , преобразованного в единую СК, а  $P_R$  – искомая единая радиолокационная карта такая, что:

$$\exists af: P_S \rightarrow P_R, \quad (19)$$



где  $af$  – некоторое аффинное преобразование. Условие (19) обеспечивает сохранение информативности полученной единой радиолокационной карты – позволяет сохранить дешифровочные признаки объектов интереса, а также представление об их взаимном расположении на местности. Фактически данное условие говорит о минимизации угла между плоскостями единой радиолокационной карты и земной поверхности.

Для существования взаимно-однозначного отображения (19) необходимо, чтобы для всех пар перекрывающихся РЛИ  $I_i$  и  $I_j$  из (16) выполнялось уравнение:

$$\int_{x_E} \|G_i(x^i) - G_j(x^j)\|^2 dx_E = 0, \quad (20)$$

$$x_E \in O_{Eij}, \quad x^i = F_i(x_E), \quad x^j = F_j(x_E), \quad (21)$$

где  $x_E$  – точка на местности, попавшая на оба РЛИ  $I_i$  и  $I_j$ , а  $x^i$  и  $x^j$  – ее изображения на них.

Таким образом, опираясь на (18) – (21), можно сформулировать следующие критерии оптимальной процедуры сшивки РЛИ. *Первый критерий оптимальности* искомого алгоритма сшивки РЛИ земной поверхности, опираясь на (20) и (21), может быть представлен, как:

$$E = \sum_i \sum_j E_{ij} = 0, \quad E_{ij} = \begin{cases} \int_{x_E} \|G_i(x^i) - G_j(x^j)\|^2 dx_E, & \text{если } O_{Eij} \neq \emptyset, \\ 0, & \text{если } O_{Eij} = \emptyset. \end{cases} \quad (22)$$

*Второй критерий оптимальности* алгоритма сшивки РЛИ земной поверхности с учетом пояснений к условию (19) представим, как:

$$\alpha_{SR} = 0, \quad (23)$$

где  $\alpha_{SR}$  – угол между плоскостями  $P_S$  и  $P_R$ .

Таким образом, необходимо разработать алгоритм автоматической сшивки РЛИ земной поверхности, удовлетворяющий указанным критериям.

## 2.2 Геометрические искажения РЛИ земной поверхности

Точность передачи на изображении относительного положения элементов местности и объектов мониторинга на ней является важной характеристикой как каждого РЛИ, так и искомой единой радиолокационной карты. Плоскость РЛИ, сформированного с помощью РЛС землеобзора, отличается от плоскости земной поверхности данного участка местности, в результате чего возникают геометрические искажения.

Под геометрическими искажениями РЛИ земной поверхности будем понимать нарушение геометрического подобия и расположения при радиолокационном отображении местности и объектов на ней.

Геометрические искажения РЛИ земной поверхности, согласно [2] и [19], могут быть обусловлены следующими факторами:

- флуктуация фазы траекторных сигналов на интервале синтезирования апертуры;
- траекторные нестабильности носителя РЛС;
- атмосферная рефракция радиоволн;
- кривизна Земли;
- разноракурсная съемка;
- ошибки пересчета наклонной дальности в горизонтальную;
- смещения отметок, обусловленные случайным характером изменения высот местности;
- эффекты наложения и радиотени у высотных объектов;
- смещение отметок, вызванные движением наблюдаемых объектов относительно подстилающей поверхности.

Современные алгоритмы этапа первичной обработки РЛИ значительно уменьшают влияние траекторных нестабильностей носителя РЛС и флуктуаций фазы траекторных сигналов на формирование РЛИ, поэтому данные факторы можно не учитывать.

Явление атмосферной рефракции радиоволн обусловлено изменением показателя преломления атмосферы с высотой, что вызывает искривление траектории радиоволн и увеличение времени их распространения [2]. Изменением дальности из-за искривления траектории радиоволн можно пренебречь вследствие его малых значений (единицы метров для космических РСА), в то время как увеличение времени распространения радиоволн вызывает значительно большую ошибку по дальности:

$$\Delta R_p \approx R \cdot \left[ n + \left( \frac{H}{2} \right) \frac{\delta n}{\delta H} - 1 \right], \quad (24)$$

где  $R$  – полученная наклонная дальность,  $H$  – высота полета носителя РЛС,  $n$  – коэффициент преломления тропосферы на уровне моря ( $\sim 1,00035$ ), а  $\delta n / \delta H$  – градиент коэффициента преломления по высоте ( $\sim 4 \cdot 10^{-8}$ ). В этой связи при ведении съемки с больших высот будут наблюдаться сдвиг и масштабные (гомографические) искажения по дальности на изображениях.

Ошибки при формировании РЛИ, вызванные кривизной земной поверхности, оцениваются выражением [77]:

$$\Delta R_k \approx \frac{y^2 \operatorname{tg} \beta}{2 R_3}, \quad (25)$$

где  $y$  – горизонтальная дальность,  $\beta$  – угол падения радиоволн, а  $R_3$  – радиус Земли ( $\sim 6371$  км). В полной мере данные ошибки проявляют себя при обработке РЛИ, полученных с помощью РСА космического базирования.

Положение изображений элементов местности и объектов мониторинга на РЛИ земной поверхности в значительной степени обуславливается ракурсом съемки, который характеризуется положением носителя РЛС и углом падения радиоволн (или углом визирования наблюдаемых объектов). Геометрические искажения в данном случае имеют вид сдвига (параллельного переноса), поворота или изменения масштаба (в том числе неоднородного – разного по осям ординат и абсцисс, который называется гомографическими искажениями) изображения относительно снимаемого участка местности.

Ошибки пересчета наклонной дальности в горизонтальную приводят к гомографическим или проективным искажениям (рисунок 1.2). Похожий эффект возникает при изменении линейного размера элемента разрешения вдоль линии пути с удалением от носителя РСА, что наблюдается при одинаковом времени синтезирования апертуры для каждого значения наклонной дальности при формировании РЛИ.

Возвышение отдельных объектов над подстилающей поверхностью или изменение высот местности приводят к смещению отметок по горизонтальной дальности, что порождает эффекты наложения и радиотени (рисунок 2.2) [2, 78]. Смещение отметок по дальности обусловлено тем, что верхняя часть возвышенности расположена ближе к РЛС (точка 2 на рисунке 2.2, а), чем объекты, которые находятся внизу на той же горизонтальной дальности (точка 1 на рисунке 2.2, а). Смещение высотного объекта на РЛИ происходит в сторону уменьшения дальности (в то время как радиотень от него отбрасывается в противоположную сторону), в результате чего изображения двух соседних объектов могут сблизиться или наложиться друг на друга. Такой случай показан на рисунке 2.2, б, где изображение высотного здания наложилось на изображение площади.

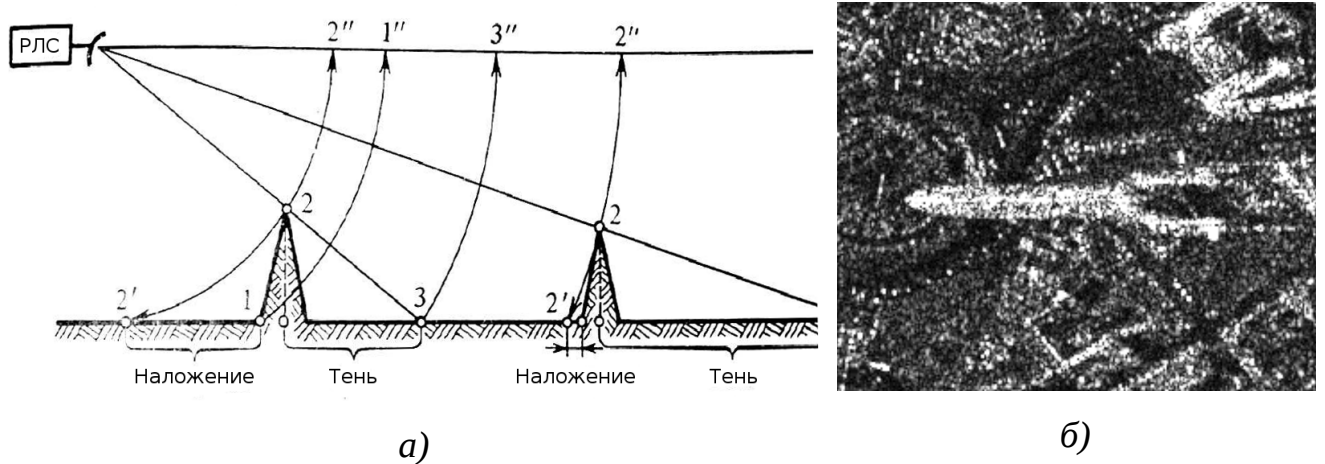


Рисунок 2.2 – Смещение отметок возвышенностей по горизонтальной дальности, порождающее эффект наложения (инверсию) и области радиотени (а), и пример наложения изображения высотного здания на РЛИ земной поверхности (б)

Смещение отметок, вызванные движением наблюдаемых объектов, чаще всего носят локальный характер на РЛИ земной поверхности. При использовании РСА изображение движущегося объекта размывается вследствие изменения его положения на интервале синтезирования апертуры. Кроме того, из-за эффекта Доплера, возникающего при движении объекта относительно подстилающей поверхности, наблюдается смещение его изображения на РЛИ относительно реального положения (рисунок 2.3).

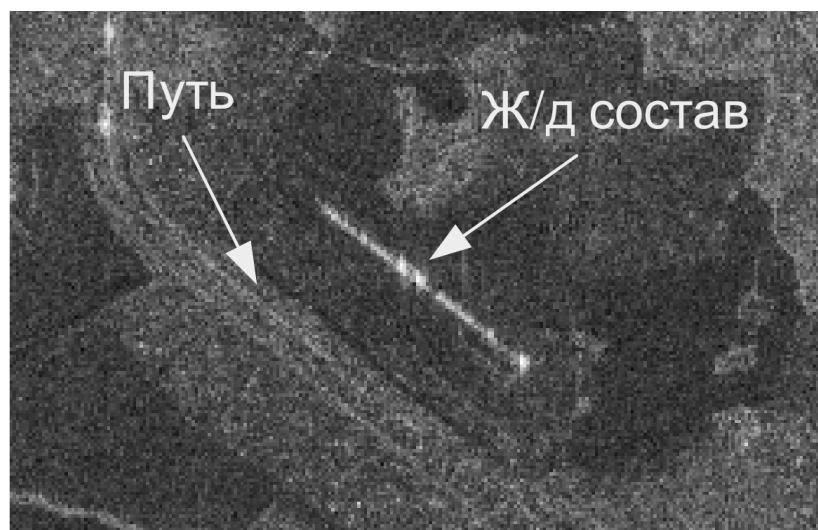


Рисунок 2.3 – Смещение движущегося поезда на РЛИ земной поверхности

## **2.3 Квазиоптимальный алгоритм сшивки радиолокационных изображений земной поверхности**

### **2.3.1 Невозможность построения оптимального алгоритма**

Геометрические искажения локального характера являются неотъемлемой частью РЛИ земной поверхности. Смещение изображений высотных объектов (эффект наложения или инверсия) в значительной степени зависит от ракурса съемки, что приводит к различным их положениям относительно подстилающей поверхности на разных РЛИ. Из-за эффекта Доплера похожая картина наблюдается при сдвиге относительно подстилающей поверхности движущихся объектов. В этой связи невозможно построение алгоритма, для которого будет справедлив первый критерий оптимальности (22) в виде равенства.

Отсутствие информации об элементах внешнего ориентирования и географической привязке обрабатываемых РЛИ земной поверхности затрудняет выбор СК искомой единой радиолокационной карты так, чтобы ее плоскость была параллельна плоскости земной поверхности для точного выполнения второго критерия оптимальности (23).

В этой связи в дальнейшем будем искать квазиоптимальный автоматический алгоритм сшивки РЛИ земной поверхности, минимизируя функционалы первого и второго критериев оптимальности.

### **2.3.2 Автоматический поиск опорных точек на перекрывающихся РЛИ**

В подразделе 1.4 рассмотрены различные алгоритмы автоматического поиска опорных точек интереса, среди которых выделены алгоритмы выявления и описания точек интереса SIFT и SURF с последующим сравнением их дескрипторов с помощью алгоритма поиска ближайшего соседа.

Рассмотрим два РЛИ земной поверхности  $I_1$  и  $I_2$  с одинаковой разрешающей способностью, на которые попал один и тот же участок местности, наблюдаемый под разными углами в азимутальной плоскости. Изображение  $I_1$  будем считать исходным, а  $I_2$  – изображением с повернутой относительно  $I_1$  семантикой.

Алгоритм SURF значительно быстрее и значительно менее требователен к доступному объему ОЗУ ЭВМ в сравнении с SIFT, однако обладает уязвимостью к повороту семантики изображения, которая приводит к существенному уменьшению количества найденных опорных точек (рисунок 1.6) при приближении угла поворота семантики к значениям:

$$\alpha_{\Pi} = \frac{\pi}{4} + \frac{\pi n}{2}, \quad n \in \mathbb{Z}. \quad (26)$$

При малом перекрытии двух РЛИ данная уязвимость может привести к его необнаружению при вышеописанных углах поворота, что недопустимо.

Анализ работы алгоритма SURF (подраздел 1.4.1) показывает, что искомая ошибка может появляться на этапах *поиска точек интереса* и *вычисления их ориентации*.

Действительно, авторы алгоритма SURF в [68] показывают снижение количества повторно найденных точек интереса на  $I_2$  по отношению  $I_1$  в зависимости от угла поворота семантики изображения на этапе *поиска точек интереса* (рисунок 2.4). Величина, равная отношению количества повторно найденных точек интереса в области перекрытия на РЛИ  $I_2$  к числу точек интереса в области перекрытия на РЛИ  $I_1$ , встречается в литературе под названием *повторяемость точек интереса*. Показанное на рисунке 2.4 снижение повторяемости точек интереса несомненно вносит вклад в наблюдаемую уязвимость, однако не объясняет ее столь резкого спада при приближении угла поворота семантики к значениям (26).

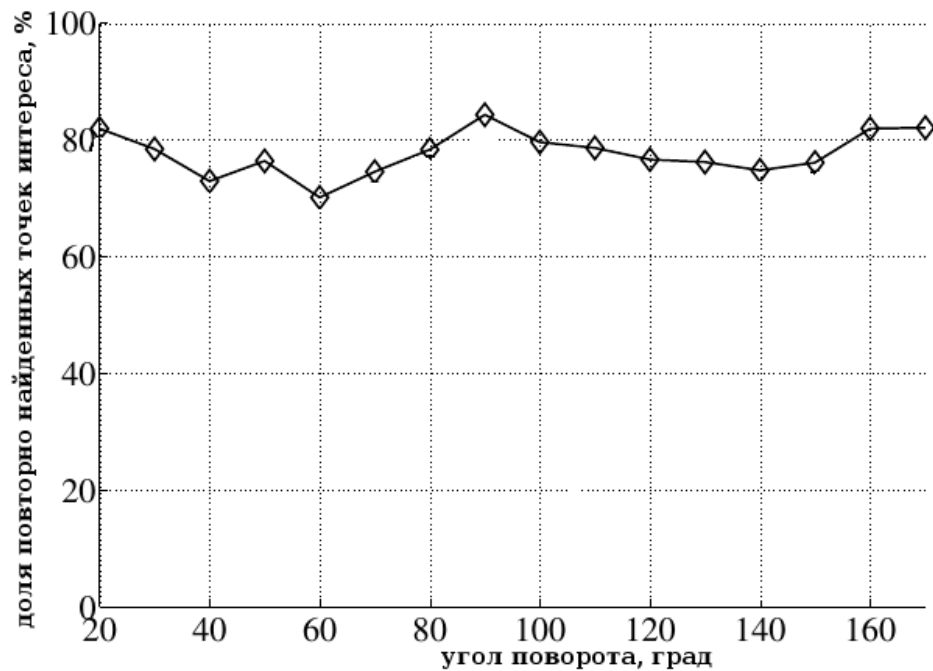
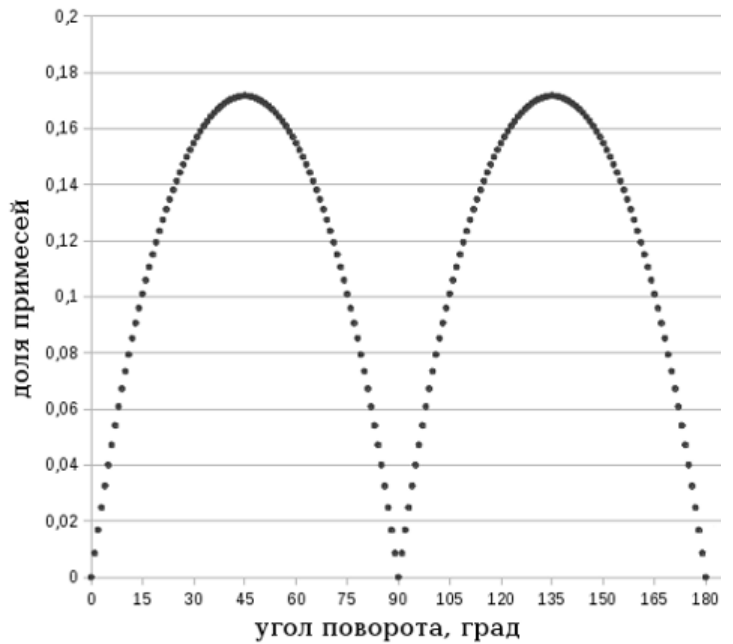
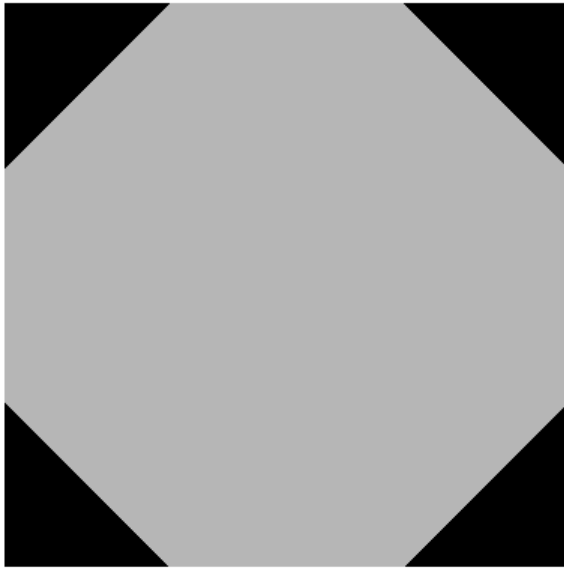


Рисунок 2.4 – Снижение повторяемости точек интереса при повороте семантики изображения

На этапе *определения ориентации точки интереса* вычисление двумерного вейвлет-преобразования Хаара (рисунок 1.4) жестко привязано к СК изображения, поэтому области семантики, попавшие под вейвлет-преобразование в одной и той же точке местности на РЛИ  $I_1$  и  $I_2$ , совпадают не полностью. На рисунке 2.5, а серым отмечены области семантики, попавшие в зону вейвлет-преобразования Хаара на обоих изображениях, при угле поворота в  $\pi/4$ , в то время как черным изображены примеси – области, попавшие в зону преобразования на одном изображении, но не попавшие на другом. В силу наличия примесей значение вейвлет-преобразования для одной и той же точки местности на двух рассматриваемых изображениях будут отличаться, что может привести к ошибочному вычислению ориентации точки интереса и, как следствие, ее дескриптора. Действительно, зависимость площади примесей от угла поворота семантики, показанная на рисунке 2.5, б, обратна зависимости количества найденных совпадений среди точек интереса от угла поворота семантики (рисунок 1.6).





а)

б)

Рисунок 2.5 – Примеси областей, не попавших в зону вейвлет-преобразования Хаара, при угле поворота семантики изображения  $45^{\circ}$  (а, обозначены черным) и зависимость доли примесей от угла поворота семантики изображения (б)

Для ослабления наблюдаемой уязвимости необходимо уменьшить площадь примесей при всевозможных углах поворота семантики в процессе вычисления двумерного вейвлет-преобразования. В случае с применяемыми двумерными вейвлетами Хаара, зона преобразования представляет собой квадрат со стороной  $4s$  (параметр  $s$ , характеризующий масштаб, был введен в рамках описания работы алгоритма SURF в подразделе 1.4.1).

Идеальной формой в данном случае является круг, так как круглая зона преобразования совсем не содержит описанных примесей при любом угле поворота. Однако, применять «круглый вейвлет Хаара» нецелесообразно, так как с помощью интегральных изображений, оптимизацию под которые делают авторы алгоритма SURF, вычислять круглые области затратно по времени. Хранение же вместе с интегральными изображениями исходных позволило бы ненамного

ускорить процесс, но в два раза увеличило бы необходимый для работы алгоритма объем оперативной памяти, что также неприемлемо.

Значительную роль при выборе формы искомого вейвлета также играет факт дискретизации изображения. РЛИ с высоким разрешением обладают высокой детальностью, что приводит к тому, что большинство точек интереса обнаруживаются на масштабе  $s = 2$ , сторона двумерного вейвлета Хаара при этом имеет длину 8 пикселей (рисунок 1.4).

Принимая во внимание вышесказанное, было решено использовать составные вейвелеты Хаара в виде, приведенном на рисунке 2.6 [79].

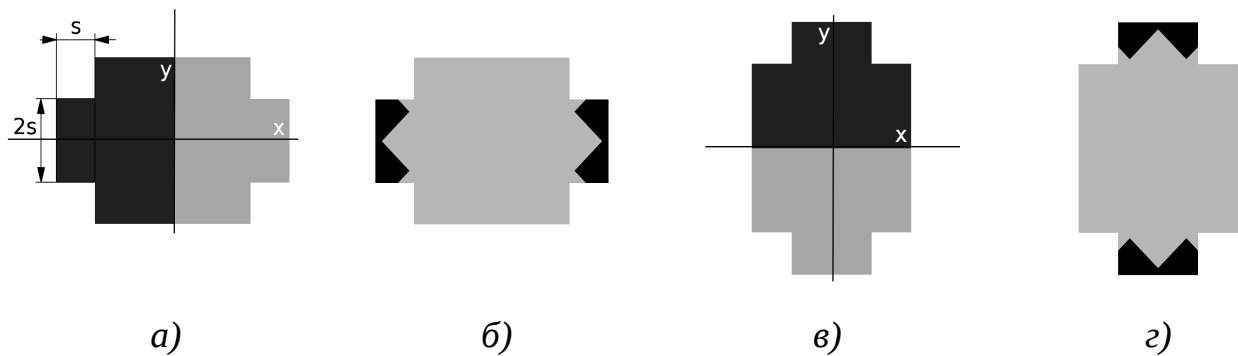


Рисунок 2.6 – Составные вейвелеты для горизонтального (а) и вертикального (в) двумерных вейвлет-преобразований и примеси в них при угле поворота семантики  $45^\circ$  (б и г, соответственно)

Зона преобразования предлагаемого двумерного вейвлета позволяет охватить всю область, запланированную авторами алгоритма SURF для вейвлет-преобразования, при любом значении угла поворота семантики. Явный прямоугольный характер зоны преобразования позволяет применять интегральные изображения для вычисления вейвлет-преобразования с новым вейвлетом, что не должно сильно сказаться на суммарном времени работы алгоритма. Вертикальный и горизонтальный вейвелеты покрывают разные области изображения, не дублируя «примеси» на вытянутых крайних «отростках» вейвлета, но дублируя области, гарантировано попадающие в зону преобразования при любом угле поворота

семантики. На рисунке 2.7 показано, что новый вейвлет позволяет значительно уменьшить долю примесей.

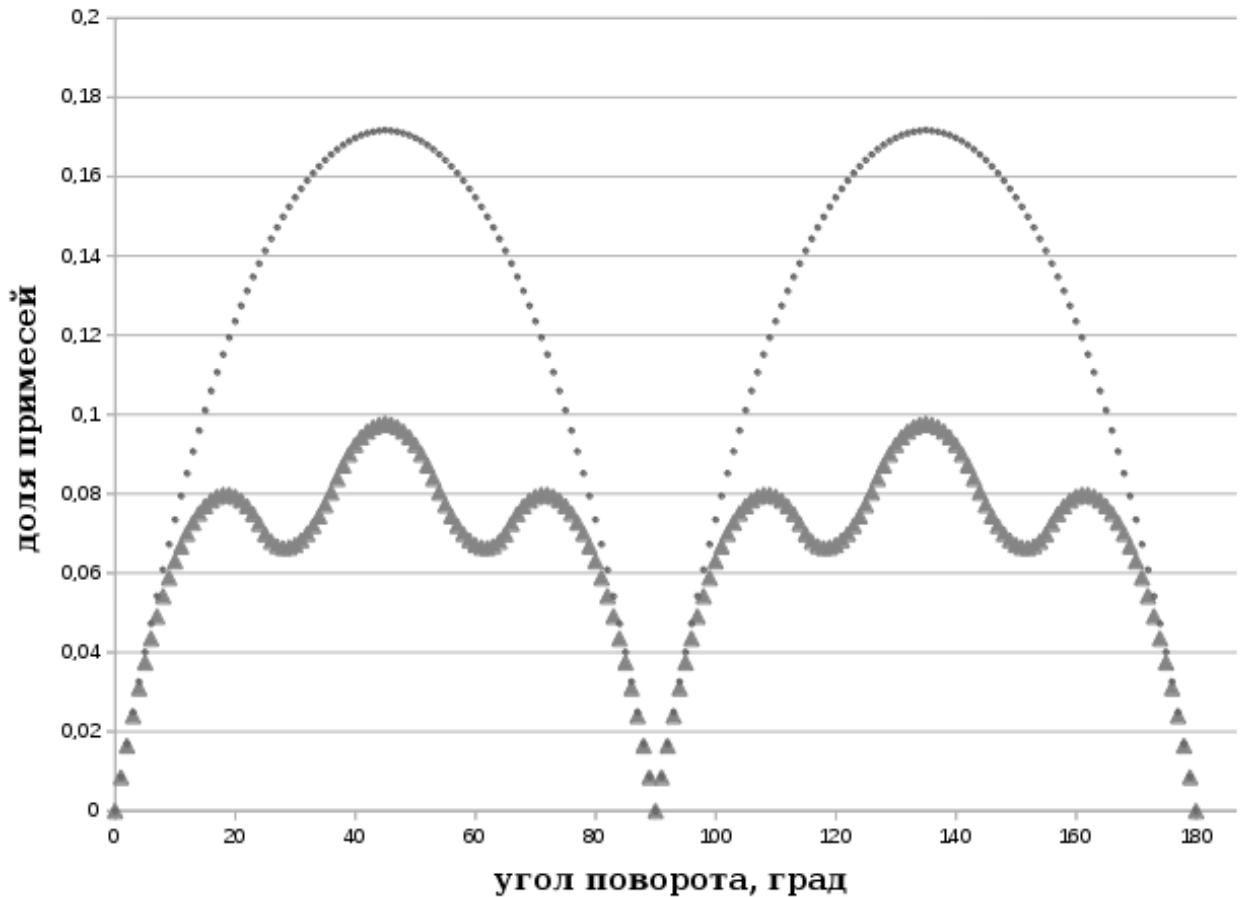


Рисунок 2.7 – Зависимость доли примесей от угла поворота семантики изображения при использовании двумерного вейвлета Хаара (обозначена точками) и предлагаемого двумерного вейвлета (обозначена треугольниками)

Алгоритм SURF изначально проектировался для обработки оптических изображений, а именно фотографий. Различные размеры по вертикали и горизонтали элементов разрешения у фотографий встречаются только при сильных проективных искажениях, поэтому пирамида изображений алгоритма SURF содержит только копии исходного изображения, уменьшенные одинаково как по вертикали, так и по горизонтали.

Для РЛИ земной поверхности подобная картина встречается гораздо чаще. В этой связи целесообразно добавление в пирамиду изображений копий исходного изображения, уменьшенных в различное число раз по вертикали и горизонтали (например, сжатое в 2 раза по вертикали, но в 4 раза по горизонтали). Данный подход увеличит время обработки изображения, однако даст большее количество опорных точек в описанном случае.

Для сопоставления дескрипторов точек интереса на различных изображениях целесообразно применять алгоритм поиска ближайшего соседа с помощью  $k$ -мерного дерева, подробно описанный в подразделе 1.4.3 [80].

### 2.3.3 Количественная характеристика насыщенности семантики РЛИ

Искомая характеристика качества РЛИ должна абсолютно и количественно оценивать насыщенность семантики изображения, а также быть устойчивой к шуму, в то время как ее вычисление на современных ЭВМ не должно занимать много времени.

Для построения алгоритма вычисления искомой характеристики будем отталкиваться от подхода, рассмотренного в [62], который основывается на процедуре поиска точек интереса на изображениях в рамках решения задачи сопоставления изображений. Наличие таких точек интереса будем воспринимать, как показатель насыщенности семантики изображения — чем больше точек интереса, тем насыщеннее изображение.

Как и в используемом нами модернизированном алгоритме SURF, для нахождения точек интереса, в соответствии с данным подходом, на пирамидах изображений  $I(x,y)$  с различной степенью размытости ( $\sigma$ ) фильтром Гаусса необходимо найти локальные максимумы детерминанта матрицы Гессе (4). Применение схожего подхода позволяет дать более корректную оценку насыщенности семантики изображений с точки зрения разрабатываемого алгоритма сшивки, что приведет к установке наиболее корректных требований ко

входным РЛИ на основе искомой характеристики. Благодаря использованию фильтра Гаусса, данный подход устойчив к шуму на изображении, в частности, к спекл-шуму на РЛИ земной поверхности.

Для быстрого вычисления первых производных изображения применяют операторы Превитта [69]:

$$M_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad M_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Вычисление первой производной происходит путем свертки окрестности каждой точки изображения с масками (27). Вычисление второй производной изображения, как требуется в (4) и (5), достигается повторением процедуры. Двух операций свертки можно избежать, рассчитав композитные матрицы на основе матриц (27). Кроме того, для анализа большей окрестности каждой точки изображения увеличим размер данных матриц. Полученные матрицы для расчета вторых производных размерностью 9x9 показаны на рисунке 2.8.

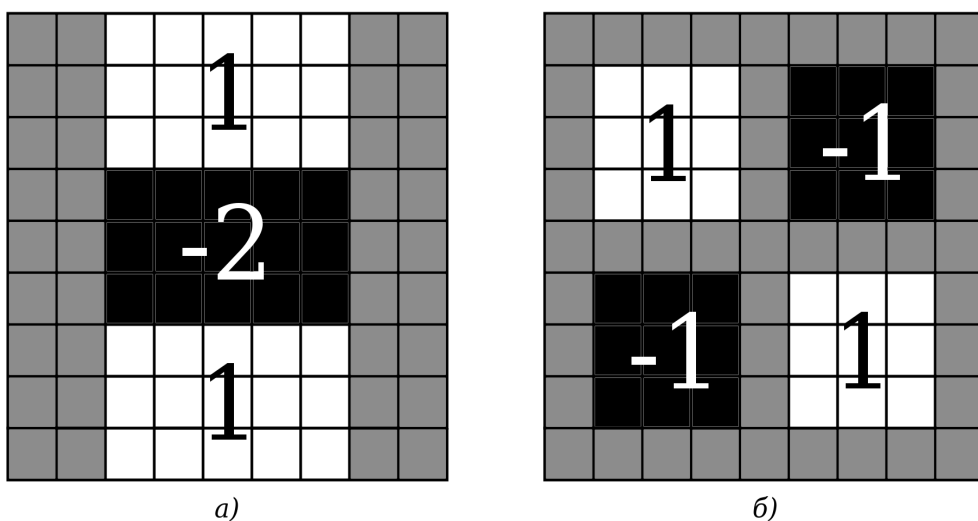


Рисунок 2.8 – Композитные матрицы для поиска вторых производных  $d^2y/dy^2$  (a) и  $d^2x/dx^2$  (б). Серые элементы равны 0. Поиск второй производной  $d^2x/dx^2$  производится с помощью транспонированной матрицы  $d^2y/dy^2$

Полученные матрицы подходят для использования интегральных изображений, что значительно ускорит вычисление второй производной.

Для выделения более значимых точек следующим этапом выполним пороговую фильтрацию полученных локальных максимумов, отсеивая значения меньше  $T$ . Точки интереса с большим значением максимума в [62] считаются более существенными.

Искомый показатель насыщенности семантики изображения  $S$  (от лат. *satietaem* — насыщенность) вычисляется путем подсчета оставшихся после вышеописанной фильтрации точек интереса. Таким образом, показатель насыщенности семантики  $S$  зависит от следующих факторов:

- собственно, насыщенность семантики изображения;
- величина порога  $T$ ;
- количество уменьшенных копий в каждой пирамиде изображения  $N_p$ ;
- величины параметра фильтра Гаусса  $\sigma$  в различных пирамидах изображения;
- площадь изображения (чем больше площадь при том же характере семантики, тем больше точек интереса).

Примем в дальнейшем, что при сравнении насыщенности семантики двух изображений их характеристики  $S$  были вычислены при одинаковых значениях  $T$ ,  $N_p$  и величинах  $\sigma$  в пирамидах изображений.

Зависимость  $S$  от площади обрабатываемого изображения не позволяет полноценно сравнивать насыщенность семантики двух изображений различного размера. Для решения данной проблемы введем относительный показатель насыщенности семантики вида:

$$S_{ps} = S/S_I, \quad (28)$$

где  $S_I$  – площадь обрабатываемого изображения. Идентификатор «ps» в данном случае обозначает, что параметр рассматривается как «per square» (на единицу площади).

К сожалению, для больших изображений, содержащих участки с различной насыщенностью семантики, данный подход не всегда приемлем. В качестве примера рассмотрим РЛИ на рисунке 2.9.

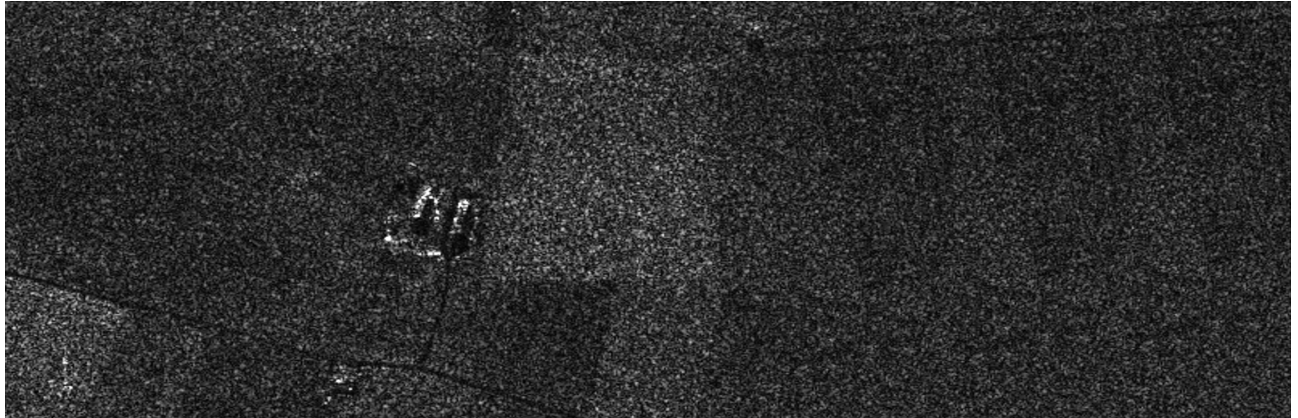


Рисунок 2.9 – Радиолокационное изображение построек фермы в поле

Несмотря на небольшую область повышенной насыщенности семантики (область с постройками) на представленном РЛИ, величина показателя насыщенности семантики  $S_{ps}$  для всего изображения не будет сильно отличаться от  $S_{ps}$  аналогичного РЛИ без построек.

Для устранения вышеописанного недостатка проведем дополнительную обработку изображения. Наложим на полученное изображение сетку с шагом  $P$ . Для каждого узла сетки с координатами  $(i,j)$  подсчитаем количество  $N_{ij}$  найденных локальных максимумов, попадающих в окрестность данного узла с радиусом  $P$ . Таким образом, получим матрицу  $S_m$  (« $m$ » — matrix, матрица), состоящую из  $N_{ij}$ , которая фактически описывает распределение насыщенности семантики на РЛИ.

Значения элементов полученного матричного показателя  $S_m$  насыщенности семантики зависят, собственно, от насыщенности семантики в окрестности соответствующих узлов сетки, от шага сетки  $P$ , а также, как и характеристика  $S$ , от  $T$  и параметров ( $N_p$  и  $\sigma$ ) построения пирамид изображения. Таким образом, зафиксировав  $P$ ,  $T$  и параметры построения пирамид, анализируя значения элементов матрицы  $S_m$ , можно объективно судить о насыщенности семантики

различных областей на различных РЛИ земной поверхности, а также о пригодности данных РЛИ к сшивке.

Предложенный алгоритм вычисления показателей насыщенности семантики  $S$ ,  $S_{ps}$ ,  $S_m$  РЛИ представлен на рисунке 2.10 [81, 82, 83, 84].

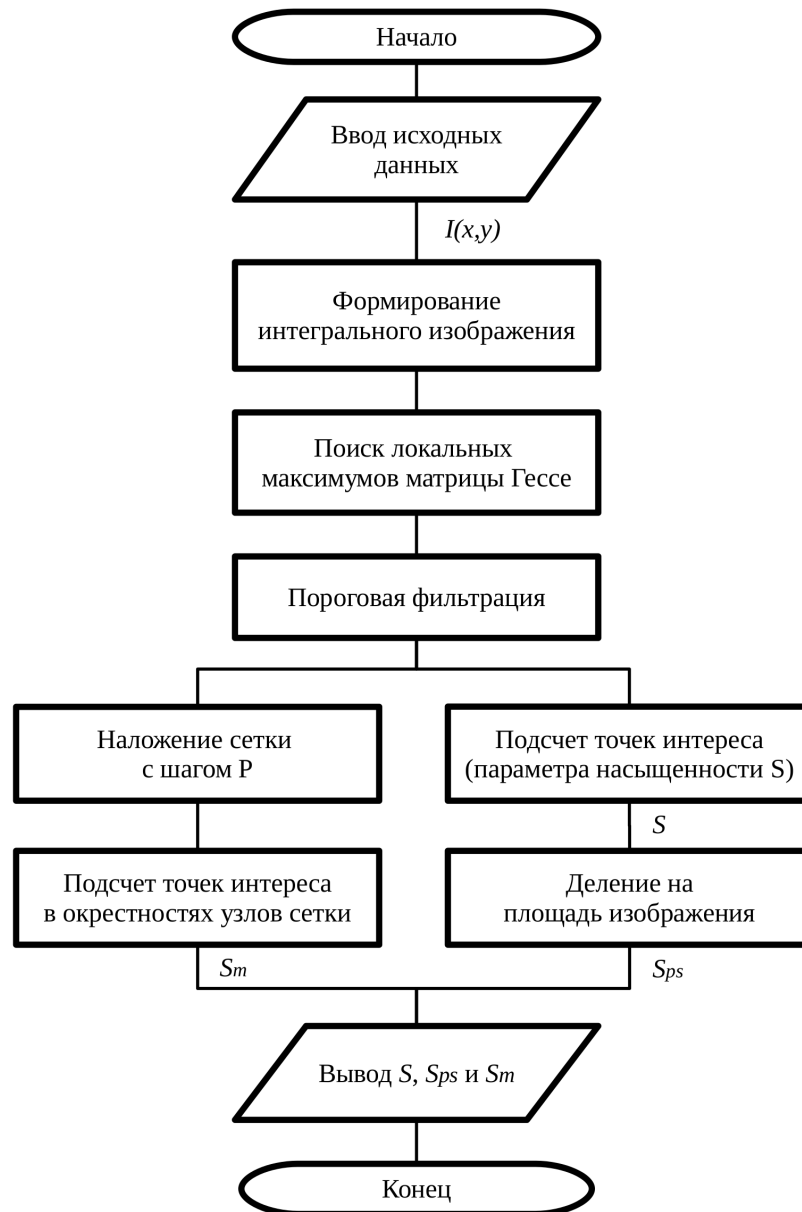


Рисунок 2.10 – Схема алгоритма определения количественной оценки насыщенности РЛИ



### 2.3.4 Вычисление ориентации двух перекрывающихся РЛИ с помощью нейронных сетей

Ключевым этапом алгоритма сшивки РЛИ земной поверхностью является этап ориентации (корегистрации) – поиск преобразования из СК каждого изображения в некую единую СК. Для решения данной задачи сперва необходимо найти *взаимную ориентацию* в каждой паре перекрывающихся изображений – преобразование из СК одного изображения в СК другого.

Для двух перекрывающихся РЛИ земной поверхности первый критерий оптимальности (22) можно переписать в виде:

$$E_{12} = \int_{x_E} \|G_{12}(x^1) - (x^2)\|^2 dx_E \rightarrow 0, \quad (29)$$

где  $x_E$  – точка на местности, попавшая на оба РЛИ  $I_1$  и  $I_2$ ,  $x^1$  и  $x^2$  – ее изображения на них (если известны координаты, то составляют опорную точку), а  $G_{12}$  – искомое преобразование из СК одного изображения в СК другого.

Используя координаты опорных точек, можно рассчитать искомое преобразование внутри большей части области перекрытия, однако для остального изображения необходимо проводить экстраполяцию.

В решении задач аппроксимации и прогнозирования, в частности, экстраполяции преуспели искусственные нейронные сети (ИНС) [85, 86]. Вычислительные системы на основе ИНС обрабатывают информацию по тому же принципу, что и мозговые центры живых существ. Достоинствами ИНС являются высокая обобщающая способность и независимость их элементов – нейронов – что позволяет значительно ускорить процесс обработки с помощью распараллеливания.

При построении ИНС особое внимание необходимо уделить формату входных и выходных данных решаемой задачи.

Рассмотрим пару перекрывающихся РЛИ земной поверхности  $I_1$  и  $I_2$ . *Входными данными* в нашем случае являются координаты точки  $(x_1, x_2)$  в СК  $I_1$  – независимые друг от друга и от времени параметры. *Выходными данными* являются компоненты вектора  $(y_1, y_2)$ , определяющего сдвиг данной точки в СК  $I_2$ . Как входные, так и выходные данные в нашем случае не подлежат нормализации.

Для успешного обучения ИНС необходима обучающая выборка — пары входных и выходных значений, на основании которых ИНС формирует аппроксимацию искомого преобразования СК. В качестве обучающей выборки будем использовать координаты опорных точек в формате  $(x_1, x_2)$  и  $(y_1, y_2)$ , описанном выше. Таким образом, количество элементов обучающей выборки напрямую зависит от площади перекрытия РЛИ.

Для тестирования полученных ИНС сформируем пары из исходных РЛИ и их искаженных копий (рисунок 2.11). Перекрытие в таком случае будет равно 100%. После поиска опорных точек выборочно искажим координаты найденных точек для имитации смены ракурса при наблюдении высотных объектов, добавив к их координатам гауссовский шум с  $\sigma = 5$ . Далее, отсеем половину опорных точек, имитируя перекрытие в 50%. Таким образом, одну половину площади РЛИ будем использовать для обучения ИНС (обучающая выборка), другую — для проверки (проверочная выборка).

Для формирования искаженных копий РЛИ были выбраны следующие характерные геометрические искажения для РЛИ земной поверхности:

- смещение (перенос точки начала координат), размытие (имитация меньшего разрешения, так как РЛИ в паре могут быть получены с помощью различных РЛС),  $I_{21}$  (рисунок 2.11, б);
- смещение, размытие и поворот,  $I_{22}$  (рисунок 2.11, в);
- смещение, размытие и изменение масштаба,  $I_{23}$  (рисунок 2.11, г);
- смещение, размытие, изменение масштаба и поворот,  $I_{24}$  (рисунок 2.11, д);
- смещение, размытие, изменение масштаба, поворот и проективное искажение,  $I_{25}$  (рисунок 2.11, е).

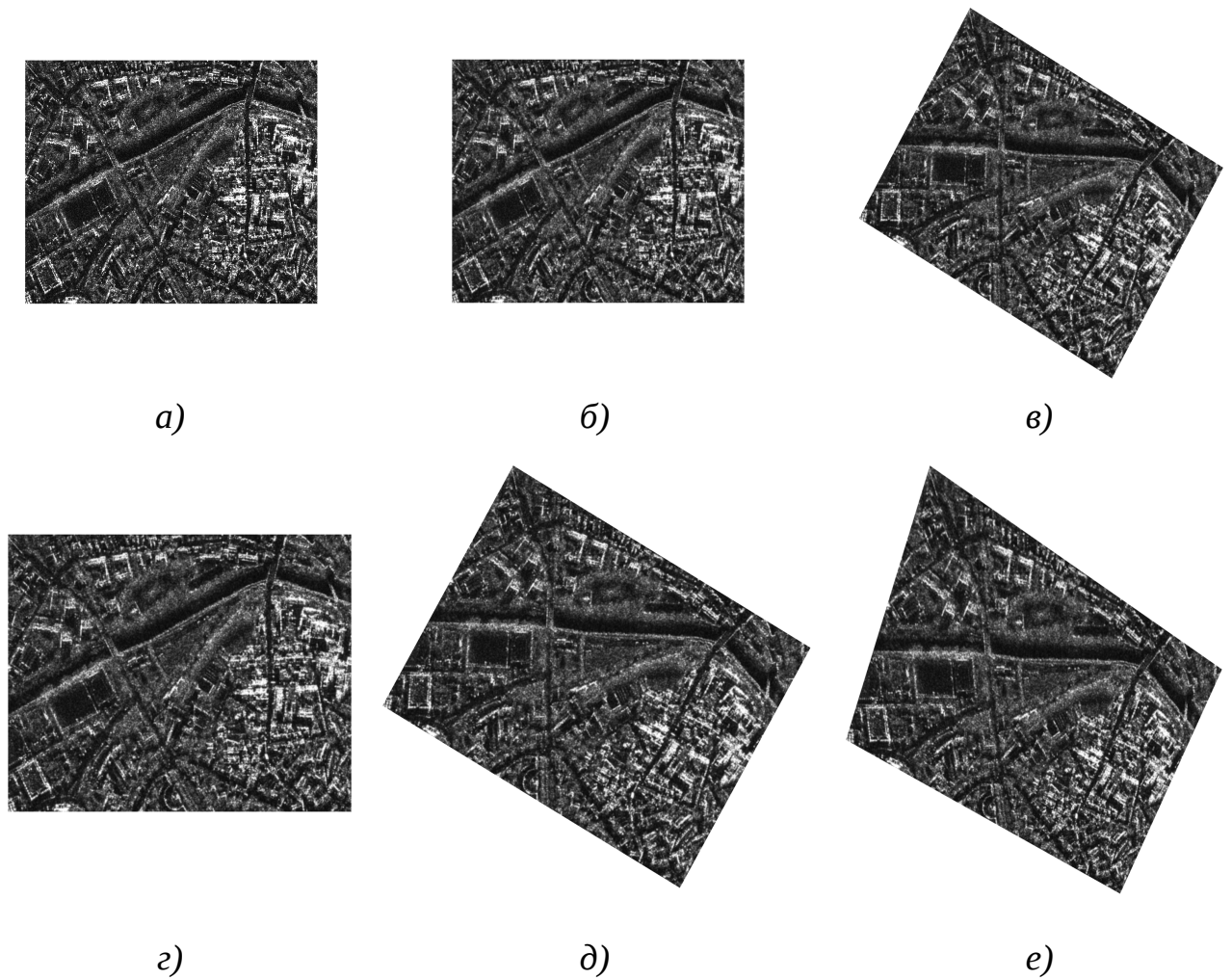


Рисунок 2.11 – Исходное РЛИ земной поверхности  $I_1$  (a) и его искаженные копии  $I_{21}$  (б),  $I_{22}$  (в),  $I_{23}$  (г),  $I_{24}$  (д) и  $I_{25}$  (e)

Показателем эффективности  $\xi$  экстраполяции искомого преобразования будем считать среднеквадратичное отклонение (СКО) точек, полученных с помощью нейронной сети, от точек проверочной выборки. Под отклонением будем подразумевать евклидово расстояние между точками.

Элементом ИНС является нейрон (рисунок 2.12), выполняющий преобразование [87]:

$$y = F(S), \quad S = \sum_i w_i x_i + w_0, \quad (30)$$

где  $w_i$  – весовые коэффициенты входных связей,  $F(S)$  – функция активации (ФА) нейрона, а  $x_i$  – входные сигналы.

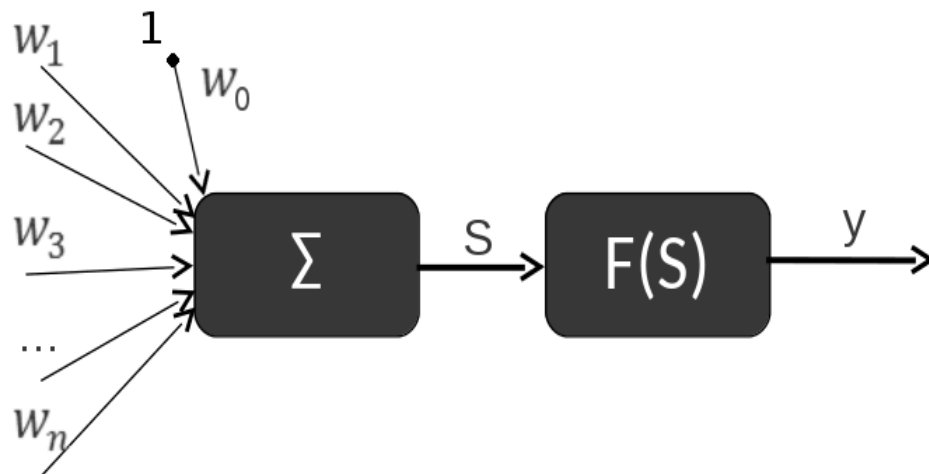


Рисунок 2.12 – Строение нейрона – элемента нейронной сети

ФА может быть одинаковой для всех нейронов одного слоя, в этом случае ИНС называют однородной (гомогенной). Если же ФА зависит от параметров, значения которых меняются от нейрона к нейрону, то такая ИНС является неоднородной (гетерогенной) [88].

Типовая схема ИНС включает в себя входной, скрытые и выходной слои. Входной слой не обладает весовыми коэффициентами и чаще всего имеет линейную ФА:

$$F(S) = S, \quad (31)$$

Входной слой служит распределителем входных сигналов между нейронами следующего слоя, поэтому часто входной слой опускают. Таким образом, название «трехслойная ИНС» подразумевает наличие входного, двух скрытых и выходного слоев.

Архитектура ИНС определяет способы соединения нейронов слоев между собой и, в некоторых случаях, их ФА. Существует множество архитектур ИНС, подходящих для решения тех или иных задач [85, 87].

При решении задач прогнозирования и аппроксимации применяются следующие архитектуры ИНС:

- радиально-базисная сеть;

- обобщенно-регрессионная сеть;
- сеть с прямыми связями;
- сеть с перекрестными связями (каскадная нейронная сеть);
- сеть Вольтерри;
- сеть Эльмана.

Сеть Вольтерри принимает на вход последовательности значений входных данных, измеренных в различные моменты времени, поэтому не может применяться в нашем случае в силу независимости входных данных от времени [85]. Сеть Эльмана имеет обратные связи с задержкой от выходов нейронов скрытых слоев к их входам, что также подразумевает зависимость входных параметров от времени.

Радиально-базисные и обобщенно-регрессионные сети не требуют итеративного обучения (весовые коэффициенты изначально рассчитываются из обучающего набора входных данных), однако их целесообразно использовать с нормализованным набором входных данных, что также не подходит, так как невозможно нормализовать координаты на РЛИ в рамках процесса сшивки.

Таким образом, необходимо исследовать ИНС с прямыми и перекрестными связями (рисунок 2.13) на предмет пригодности к решению поставленной задачи.

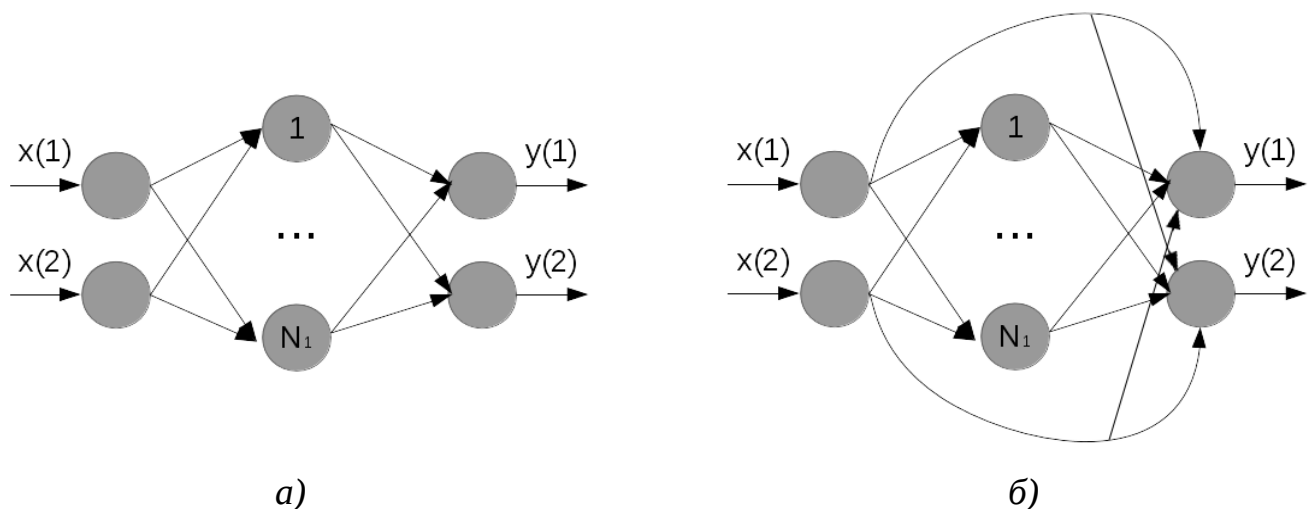


Рисунок 2.13 – Двухслойные нейронные сети с прямыми (а) и перекрестными (б) СВЯЗЯМИ

Обучение ИНС представленных архитектур целесообразно производить с помощью метода, основанном на алгоритме Левенберга-Марквардта [85, 89]. Алгоритм Левенберга-Марквардта в данном методе применяется для минимизации функции невязки с помощью итеративного процесса и фактически объединяет в себе градиентный метод и метод Гаусса-Ньютона:

$$w_{i+1} = w_i - (H + \lambda \text{diag}[H])^{-1} \nabla f_E(w_i), \quad (32)$$

где  $w_i$  – вектор параметров ИНС (весов)  $i$ -й итерации,  $f_E(w_i)$  – функция невязки,  $H$  – матрица Гессе функции невязки, а  $\lambda$  – параметр, варьирующийся во время работы алгоритма.

В качестве минимизируемой функции невязки используется сумма квадратов ошибок откликов сети на обучающей выборке, что фактически является дискретным приближением первого критерия оптимальности (29) для пары перекрывающихся РЛИ земной поверхности.

Выбранный метод обучения наиболее эффективен на ИНС с прямыми и перекрестными связями, так как позволяет проводить обучение при наименьших временных затратах [89].

Количество нейронов входного и выходного слоев определяется количеством входных и выходных параметров соответственно (в нашем случае по 2 нейрона на входной и выходной слое). Количество же нейронов в каждом скрытом слое ИНС, построенной на основе выбранной архитектуры, а также их ФА обычно подбирают эвристическим или эмпирическим путем [86].

Для ИНС характерно наличие интервалов допустимых значений входных и выходных данных, которые определяются ФА нейронов данной ИНС [90]. Таким образом, в искомым сетях нельзя применять только ограниченные ФА (которые являются наиболее популярными).

Первые близкие к приемлемым результаты были получены при использовании двухслойных ИНС с прямыми и перекрестными связями

(рисунок 2.13) с линейными ФА (31) нейронов скрытого и выходного слоев. Значения ранее введенного показателя эффективности  $\xi$  при симуляции ИНС на проверочной выборке для различных искажений РЛИ представлены в таблице 2.1, где  $N$  – количество нейронов в скрытом слое.

Таблица 2.1 – Эффективность экстраполяции с помощью двухслойных ИНС с прямыми и перекрестными связями

Архитектура	N	Показатель эффективности $\xi$ (пкс)				
		$I_{21}$	$I_{22}$	$I_{23}$	$I_{24}$	$I_{25}$
ИНС с прямыми связями	3	0,7715	1,1491	1,1377	1,1145	14,6666
	5	0,7583	1,2069	1,2501	1,2011	14,1022
	7	0,7642	1,1303	1,1587	1,2893	15,3256
	9	0,7522	1,1298	1,1028	1,2084	14,9011
	11	0,7662	1,1573	1,1001	1,2260	15,6532
	13	0,7513	1,2034	1,1351	1,1816	14,1677
	15	0,7759	1,1826	1,1271	1,1977	14,9610
	18	0,7456	1,1535	1,1963	1,2079	14,3303
	20	0,7584	1,1708	1,0983	1,2194	15,2526
	25	0,7541	1,1279	1,1423	1,3482	14,6241
ИНС с перекрестными связями	3	0,7638	1,2677	1,2298	1,1674	15,3362
	5	0,7560	1,1549	1,1063	1,1230	14,6334
	7	0,7826	1,1692	1,2237	1,1822	13,9740
	9	0,7736	1,1264	1,1487	1,3132	14,9741
	11	0,7478	1,1754	1,1624	1,1706	15,1150
	13	0,7552	1,2025	1,0875	1,1587	16,4186
	15	0,7541	1,1350	1,0813	1,1838	15,6869
	18	0,7568	1,1829	1,1699	1,1436	15,0128
	20	0,7620	1,1421	1,0625	1,2917	14,1629
	25	0,7469	1,1437	1,1432	1,1605	16,2449

Как видно из представленных результатов, ИНС данной архитектуры хорошо подходят для экстраполяции преобразования СК для большинства видов рассматриваемых искажений, однако дают неприемлемо большую ошибку при наличии на РЛИ проективных искажений.

Из теоремы Колмогорова-Арнольда и дальнейшего ее развития Хехт-Нильсеном следует, что любую многомерную функцию нескольких переменных можно представить с помощью ИНС фиксированной размерности [85, 88, 91]. В частности, теорема Хехт-Нильсена доказывает представимость функции многих переменных с помощью двухслойной ИНС с прямыми связями с  $2m+1$  нейронами скрытого слоя ( $m$  — размерность входных данных, в нашем случае  $m = 2$ ) с параметризованными сигмоидными ФА [91]. В качестве такой ФА можно использовать параметризованную логистическую функцию:

$$F(S) = \frac{a_0}{(1 + e^{-a_1 S})} + a_2, \quad (33)$$

а также модифицированный гиперболический тангенс [92]:

$$F(S) = \frac{e^{a_0 S} - e^{-a_1 S}}{e^{a_2 S} + e^{-a_3 S}} + a_4, \quad (34)$$

где  $a_i$  — уникальные для каждого нейрона параметры, настраиваемые методом обучения аналогично весам ИНС.

Однако, теорема Колмогорова-Арнольда диктует ограничение на область определения аппроксимируемой функции (искомого преобразования СК перекрывающихся РЛИ), поэтому построенные на данных рассуждениях ИНС (двухслойные, с ФА (33) или (34) нейронов скрытого слоя и ФА (31), (33) или (34) нейронов выходного слоя) не дали приемлемых результатов.

Тем не менее, удалось несколько улучшить показатель эффективности  $\xi$  для РЛИ с проективными искажениями  $I_{25}$  при использовании в скрытом слое одновременно нейронов с ФА (31) и (33), при ФА (31) нейронов в выходном слое.



Выборка наилучших результатов таких ИНС представлена в таблице 2.2, где  $N_S$  – количество в скрытом слое нейронов с ФА (33), а  $N_L$  – с ФА (31).

Таблица 2.2 – Эффективность экстраполяции с помощью двухслойных ИНС с прямыми связями с линейной и параметризованной логистической ФА у нейронов скрытого слоя

$N_S$	$N_L$	Показатель эффективности $\xi$ (пкс)				
		$I_{21}$	$I_{22}$	$I_{23}$	$I_{24}$	$I_{25}$
5	5	0,7524	1,1475	1,3303	1,3557	12,4662
7	7	0,7455	1,1451	1,3385	1,3399	11,9981
8	7	0,7695	1,6359	1,4744	1,3341	12,5299

Наилучшие результаты были получены при использовании трехслойной ИНС с перекрестными связями (рисунок 2.14) с логистической ФА:

$$F(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}} \quad (35)$$

нейронов первого скрытого слоя и линейной ФА (31) нейронов второго скрытого и выходного слоев.

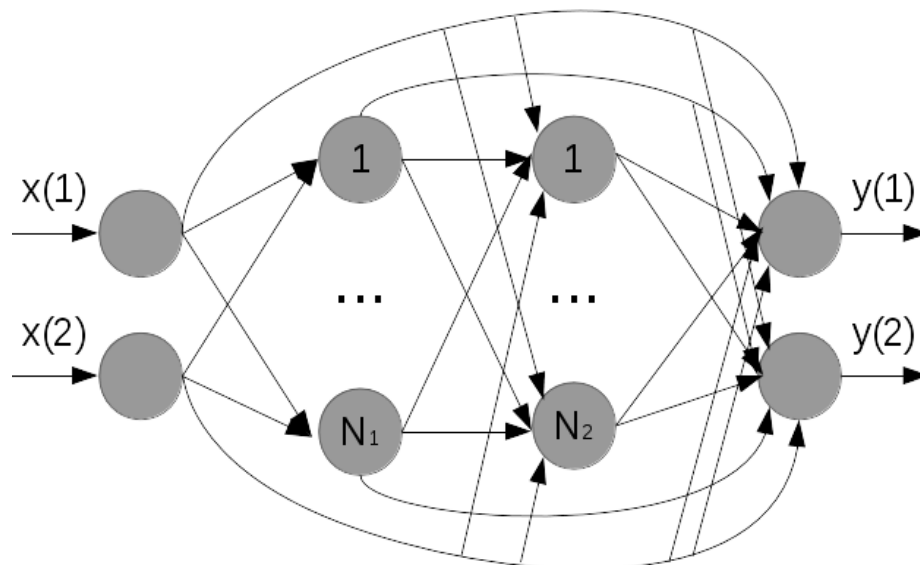


Рисунок 2.14 – Трехслойная нейронная сеть с перекрестными связями

Значения показателя эффективности  $\xi$  таких ИНС при симуляции на проверочной выборке представлены в таблице 2.3, где  $N_1$  и  $N_2$  — количество нейронов первого и второго скрытых слоев соответственно.

Таблица 2.3 – Эффективность экстраполяции с помощью трехслойной ИНС с перекрестными связями с логистической ФА первого скрытого слоя и линейной ФА второго скрытого и выходного слоев

$N_1$	$N_2$	Показатель эффективности $\xi$ (пкс)				
		$I_{21}$	$I_{22}$	$I_{23}$	$I_{24}$	$I_{25}$
5	5	0,7957	1,1239	2,4782	3,1275	5,6484
3	5	0,7897	1,2735	2,3911	1,3679	2,0632
5	3	0,8972	1,1338	1,8823	2,8162	7,4969
5	10	1,2610	1,1948	1,4034	1,7345	9,1402
10	5	2,1914	1,1351	2,9077	2,9769	10,3323
5	7	0,9855	2,5656	1,3932	2,1190	12,6537
7	5	1,0192	1,2107	3,2688	3,7976	8,8230
4	4	1,3913	1,1698	3,0659	2,8779	2,5622
4	5	0,9786	1,1946	1,2733	2,8634	2,5153
5	4	0,8879	1,2362	1,2362	1,5206	2,0658

Как видно из представленных результатов, среди ИНС данной архитектуры наилучший результат показали сети с  $N_1 = 3$ ,  $N_2 = 5$  и  $N_1 = 5$ ,  $N_2 = 4$  [93, 94, 95].

К сожалению, все рассматриваемые ИНС при решении поставленной задачи обладали следующими значительными недостатками.

**Первый** недостаток заключается в некорректной работе ИНС при малом перекрытии обрабатываемых РЛИ. При уменьшении области перекрытия количество найденных опорных точек также уменьшается, что приводит к сокращению обучающей выборки (и ее полноты). Сокращение обучающей выборки, в свою очередь, ведет к недостаточному обучению ИНС и, как следствие, к увеличению погрешности определения искомого преобразования.

Иными словами, использование ИНС при малом количестве опорных точек или малом перекрытии неэффективно.

Несмотря на приемлемые значения показателя эффективности  $\xi$ , который является СКО преобразованных точек для всего РЛИ в целом, абсолютные значения отклонения отдельных, рядом стоящих точек могут значительно колебаться. Данное явление, являющееся **вторым** недостатком ИНС, приводит к «дрожанию» изображений объектов на РЛИ после преобразования, что значительно искажает их дешифровочные признаки.

В этой связи использование ИНС для вычисления ориентации двух перекрывающихся РЛИ земной поверхности нецелесообразно.

### 2.3.5 Вычисление ориентации двух перекрывающихся РЛИ с помощью метода наименьших квадратов

Альтернативным способом получения взаимной ориентации перекрывающихся РЛИ земной поверхности является построение математической модели искомого преобразования и вычисление ее параметров.

Для двух перекрывающихся РЛИ земной поверхности  $I_1$  и  $I_2$  будем считать, что  $\mathbf{x}^1 = \|x \ y\|^T$ ,  $\mathbf{x}^2 = \|u \ v\|^T$ , где  $x$  и  $y$  – координаты точки в СК  $I_1$ , а  $u$  и  $v$  – в СК  $I_2$ .

Искомое преобразование должно максимально учитывать геометрические искажения, описанные в подразделе 2.2.

В [5] при решении задачи совмещения РЛИ и цифровой карты местности аналогичное преобразование описывается аффинным преобразованием:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & C \\ D & E & F \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (36)$$

где параметры  $A, B, D$  и  $E$  отвечают за изменение масштаба и поворот СК, а  $C$  и  $F$  – за параллельный перенос. Данный подход корректен, если оба РЛИ прошли радарграмметрическую обработку и были должным образом спроецированы на единую плоскость (например, плоскость земной поверхности). Однако, применение преобразования вида (36) дает ошибочный результат в случае, например, если  $I_1$  не проходил радарграмметрическую обработку и остался в координатах  $(r, \gamma)$ , где  $r$  – наклонная дальность, а  $\gamma$  – азимут, при этом линейный размер элемента разрешения вдоль линии пути увеличивается с удалением от носителя РСА (рисунок 1.2).

Анализ геометрических искажений и литературы [20] показал, что более точно искомое преобразование описывает проективное преобразование [96]:

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ t \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{pmatrix}, \quad \det M \neq 0, \quad (37)$$

$$u = \frac{u'}{t}, \quad v = \frac{v'}{t},$$

где параметры  $a, b, d, e$  отвечают за изменение масштаба и поворот СК,  $c$  и  $f$  – за параллельный перенос, а  $g$  и  $h$  – за перспективные искажения. Стоит отметить, что при  $g = h = 0$  преобразование (37) тождественно аффинному (36).

Свойства проективных преобразований описаны в [97]. Среди них стоит отметить следующие:

- проективное преобразование взаимно-однозначно;
- преобразование обратное проективному является проективным;
- композиция проективных преобразований является проективным.

Математические выкладки данных свойств описаны в приложении А.

Проективное преобразование (37) будем считать искомым. Таким образом, задача определения взаимной ориентации двух перекрывающихся РЛИ земной поверхности сводится к определению параметров преобразования (37).

Пусть известно  $N$  опорных точек, тогда первый критерий оптимальности (29) с учетом (37) в дискретном случае можно записать в виде:

$$E_{12} = \sum_{i=1}^N (u_i \cdot (gx_i + hy_i + 1) - ax_i - by_i - c)^2 + \sum_{i=1}^N (v_i \cdot (gx_i + hy_i + 1) - dx_i - ey_i - f)^2. \quad (38)$$

Предполагая, что ошибка определения координат опорных точек в виду погрешности метода определения, случайных изменений рельефа местности и прочих геометрических искажений локального характера имеет распределение Гаусса с нулевым математическим ожиданием, для определения значения параметров искомого преобразования (37) будем использовать метод наименьших квадратов [98], минимизируя функцию невязки (38).

Для обеспечения минимума (38) должны быть справедливы следующие равенства:

$$\frac{\partial E_{12}}{\partial c} = -2 \sum_{i=1}^N (u_i \cdot (gx_i + hy_i + 1) - ax_i - by_i - c) = 0, \quad (39)$$

$$\frac{\partial E_{12}}{\partial f} = -2 \sum_{i=1}^N (v_i \cdot (gx_i + hy_i + 1) - dx_i - ey_i - f) = 0. \quad (40)$$

Выражая  $c$  из (39), получим:

$$Nc = \sum_{i=1}^N (gu_i x_i + hu_i y_i + u_i - ax_i - by_i), \quad (41)$$

$$c = g\bar{u}\bar{x} + h\bar{u}\bar{y} + \bar{u} - a\bar{x} - b\bar{y}, \quad (42)$$

где  $\bar{u}\bar{x}, \bar{u}\bar{y}, \bar{u}, \bar{x}, \bar{y}$  – средние значения произведений  $ux, uy$  и величин  $u, x, y$  соответственно.

Аналогично, выражая  $f$  из (40), получим:

$$f = g \bar{v} \bar{x} + h \bar{v} \bar{y} + \bar{v} - d \bar{x} - e \bar{y}. \quad (43)$$

Подставив (42) и (43) в  $E_{12}$  (38), получим:

$$E_{12} = \sum_{i=1}^N (g(u_i x_i - \bar{u} \bar{x}) + h(u_i y_i - \bar{u} \bar{y}) + (u_i - \bar{u}) - a(x_i - \bar{x}) - b(y_i - \bar{y}))^2 + \sum_{i=1}^N (g(v_i x_i - \bar{v} \bar{x}) + h(v_i y_i - \bar{v} \bar{y}) + (v_i - \bar{v}) - d(x_i - \bar{x}) - e(y_i - \bar{y}))^2. \quad (44)$$

В случае искомого минимума справедливо:

$$\frac{\partial E_{12}}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^N [g(u_i x_i - \bar{u} \bar{x}) + h(u_i y_i - \bar{u} \bar{y}) + (u_i - \bar{u}) - a(x_i - \bar{x}) - b(y_i - \bar{y})] \cdot (x_i - \bar{x}) = 0, \quad (45)$$

$$\frac{\partial E_{12}}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^N [g(u_i x_i - \bar{u} \bar{x}) + h(u_i y_i - \bar{u} \bar{y}) + (u_i - \bar{u}) - a(x_i - \bar{x}) - b(y_i - \bar{y})] \cdot (y_i - \bar{y}) = 0, \quad (46)$$

$$\frac{\partial E_{12}}{\partial d} = -2 \sum_{i=1}^N [g(v_i x_i - \bar{v} \bar{x}) + h(v_i y_i - \bar{v} \bar{y}) + (v_i - \bar{v}) - d(x_i - \bar{x}) - e(y_i - \bar{y})] \cdot (x_i - \bar{x}) = 0, \quad (47)$$

$$\frac{\partial E_{12}}{\partial e} = -2 \sum_{i=1}^N [g(v_i x_i - \bar{v} \bar{x}) + h(v_i y_i - \bar{v} \bar{y}) + (v_i - \bar{v}) - d(x_i - \bar{x}) - e(y_i - \bar{y})] \cdot (y_i - \bar{y}) = 0, \quad (48)$$

$$\frac{\partial E_{12}}{\partial g} = 2 \sum_{i=1}^N [g(u_i x_i - \bar{u} \bar{x}) + h(u_i y_i - \bar{u} \bar{y}) + (u_i - \bar{u}) - a(x_i - \bar{x}) - b(y_i - \bar{y})] \cdot (u_i x_i - \bar{u} \bar{x}) + 2 \sum_{i=1}^N [g(v_i x_i - \bar{v} \bar{x}) + h(v_i y_i - \bar{v} \bar{y}) + (v_i - \bar{v}) - d(x_i - \bar{x}) - e(y_i - \bar{y})] \cdot (v_i x_i - \bar{v} \bar{x}) = 0, \quad (49)$$

$$\frac{\partial E_{12}}{\partial h} = 2 \sum_{i=1}^N [g(u_i x_i - \bar{u} \bar{x}) + h(u_i y_i - \bar{u} \bar{y}) + (u_i - \bar{u}) - a(x_i - \bar{x}) - b(y_i - \bar{y})] \cdot (u_i y_i - \bar{u} \bar{y}) + 2 \sum_{i=1}^N [g(v_i x_i - \bar{v} \bar{x}) + h(v_i y_i - \bar{v} \bar{y}) + (v_i - \bar{v}) - d(x_i - \bar{x}) - e(y_i - \bar{y})] \cdot (v_i y_i - \bar{v} \bar{y}) = 0, \quad (50)$$

тогда, обозначив:

$$S_{ux \ ux} = \sum_{i=1}^N (u_i x_i - \bar{u} \bar{x})^2, \quad S_{ux \ uy} = \sum_{i=1}^N (u_i x_i - \bar{u} \bar{x})(u_i y_i - \bar{u} \bar{y}), \quad (51)$$

получим систему линейных уравнений:

$$\begin{pmatrix} S_{ux\ x} & S_{uy\ x} & -S_{x\ x} & -S_{x\ y} & 0 & 0 \\ S_{ux\ y} & S_{uy\ y} & -S_{x\ y} & -S_{y\ y} & 0 & 0 \\ S_{vx\ x} & S_{vy\ x} & 0 & 0 & -S_{x\ x} & -S_{x\ y} \\ S_{vx\ y} & S_{vy\ y} & 0 & 0 & -S_{x\ y} & -S_{y\ y} \\ S_{ux\ ux} + S_{vx\ vx} & S_{uy\ ux} + S_{vy\ vx} & -S_{ux\ x} & -S_{ux\ y} & -S_{vx\ x} & -S_{vx\ y} \\ S_{ux\ uy} + S_{vx\ vy} & S_{uy\ uy} + S_{vy\ vy} & -S_{uy\ x} & -S_{uy\ y} & -S_{vy\ x} & -S_{vy\ y} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} g \\ h \\ a \\ b \\ d \\ e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -S_{u\ x} \\ -S_{u\ y} \\ -S_{v\ x} \\ -S_{v\ y} \\ -S_{ux\ u} - S_{vx\ v} \\ -S_{uy\ u} - S_{vy\ v} \end{pmatrix}. \quad (52)$$

В случае ненулевого детерминанта матрицы из (52) искомые параметры проективного преобразования  $g, h, a, b, d, e$  равны:

$$\begin{pmatrix} g \\ h \\ a \\ b \\ d \\ e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{ux\ x} & S_{uy\ x} & -S_{x\ x} & -S_{x\ y} & 0 & 0 \\ S_{ux\ y} & S_{uy\ y} & -S_{x\ y} & -S_{y\ y} & 0 & 0 \\ S_{vx\ x} & S_{vy\ x} & 0 & 0 & -S_{x\ x} & -S_{x\ y} \\ S_{vx\ y} & S_{vy\ y} & 0 & 0 & -S_{x\ y} & -S_{y\ y} \\ S_{ux\ ux} + S_{vx\ vx} & S_{uy\ ux} + S_{vy\ vx} & -S_{ux\ x} & -S_{ux\ y} & -S_{vx\ x} & -S_{vx\ y} \\ S_{ux\ uy} + S_{vx\ vy} & S_{uy\ uy} + S_{vy\ vy} & -S_{uy\ x} & -S_{uy\ y} & -S_{vy\ x} & -S_{vy\ y} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -S_{u\ x} \\ -S_{u\ y} \\ -S_{v\ x} \\ -S_{v\ y} \\ -S_{ux\ u} - S_{vx\ v} \\ -S_{uy\ u} - S_{vy\ v} \end{pmatrix}. \quad (53)$$

Подставляя (53) в (42) и (43), получаем значения параметров  $c$  и  $f$  соответственно.

Определитель матрицы из (52) равен нулю, когда все опорные точки в СК одного из РЛИ лежат на одной прямой. Данный случай маловероятен на практике и не позволяет получить искомые параметры проективного преобразования.

К сожалению, данный подход может привести к некорректным параметрам преобразования при наличии небольшого числа ошибочно определенных опорных точек или сильных локальных геометрических искажений (например, из-за эффекта Доплера, рисунок 2.3). На практике доля ошибочных опорных точек значительно меньше доли корректных (как правило менее 1%, максимум – не более 10%).

В этой связи целесообразно добавление М-оценок [99] путем введения весовых коэффициентов  $w_{il}$  в функцию невязки (38):

$$E_{12} = \sum_{i=1}^N w_{il} \cdot (u_i \cdot (gx_i + hy_i + 1) - ax_i - by_i - c)^2 + \sum_{i=1}^N w_{il} \cdot (v_i \cdot (gx_i + hy_i + 1) - dx_i - ey_i - f)^2. \quad (54)$$

Процедура определения параметров искомого преобразования становится итерационным процессом. При этом весовые коэффициенты  $w_{il}$  вычисляются с помощью параметров искомого преобразования, полученных в предыдущей итерации:

$$w_{il} = \frac{1}{(1+r_{il}^2)^2}, \quad r_{il} = \|G_{12}^{l-1}(\mathbf{x}_i^1) - \mathbf{x}_i^2\|, \quad w_{i1} = 1, \quad (55)$$

где  $l$  – номер текущей итерации.

Используя (54), аналогично (41) и (42) получим:

$$\sum_{i=1}^N w_{il} c_i = \sum_{i=1}^N (g_l u_i x_i + h_l u_i y_i + u_i - a_l x_i - b_l y_i), \quad (56)$$

$$c_i = g_l \overline{ux}_w + h_l \overline{uy}_w + \overline{u}_w - a_l \overline{x}_w - b_l \overline{y}_w, \quad (57)$$

где  $\overline{ux}_w, \overline{uy}_w, \overline{u}_w, \overline{x}_w, \overline{y}_w$  – взвешенные средние значения произведений  $ux$ ,  $uy$  и величин  $u$ ,  $x$ ,  $y$  соответственно.

Аналогично (51), введя замены вида

$$S_{ux \ ux \ w} = \sum_{i=1}^N w_{il} (u_i x_i - \overline{ux})^2, \quad S_{ux \ uy \ w} = \sum_{i=1}^N w_{il} (u_i x_i - \overline{ux})(u_i y_i - \overline{uy}), \quad (58)$$

подставив в (53), получим новые уравнения для искомым параметров преобразования.

Условиями выхода из итеративного процесса являются:

$$\| \mathbf{p}_l - \mathbf{p}_{l-1} \| < \zeta, \quad \mathbf{p}_l = \| a_l \quad b_l \quad c_l \quad d_l \quad e_l \quad f_l \quad g_l \quad h_l \|^T, \quad (59)$$

$$l > T_l,$$

где  $\zeta$  и  $T_l$  – заранее заданные пороговые величины.



Таким образом, структуру алгоритма определения параметров искомого преобразования можно представить в виде, приведенном на рисунке 2.15 [100, 101, 102, 103, 104].

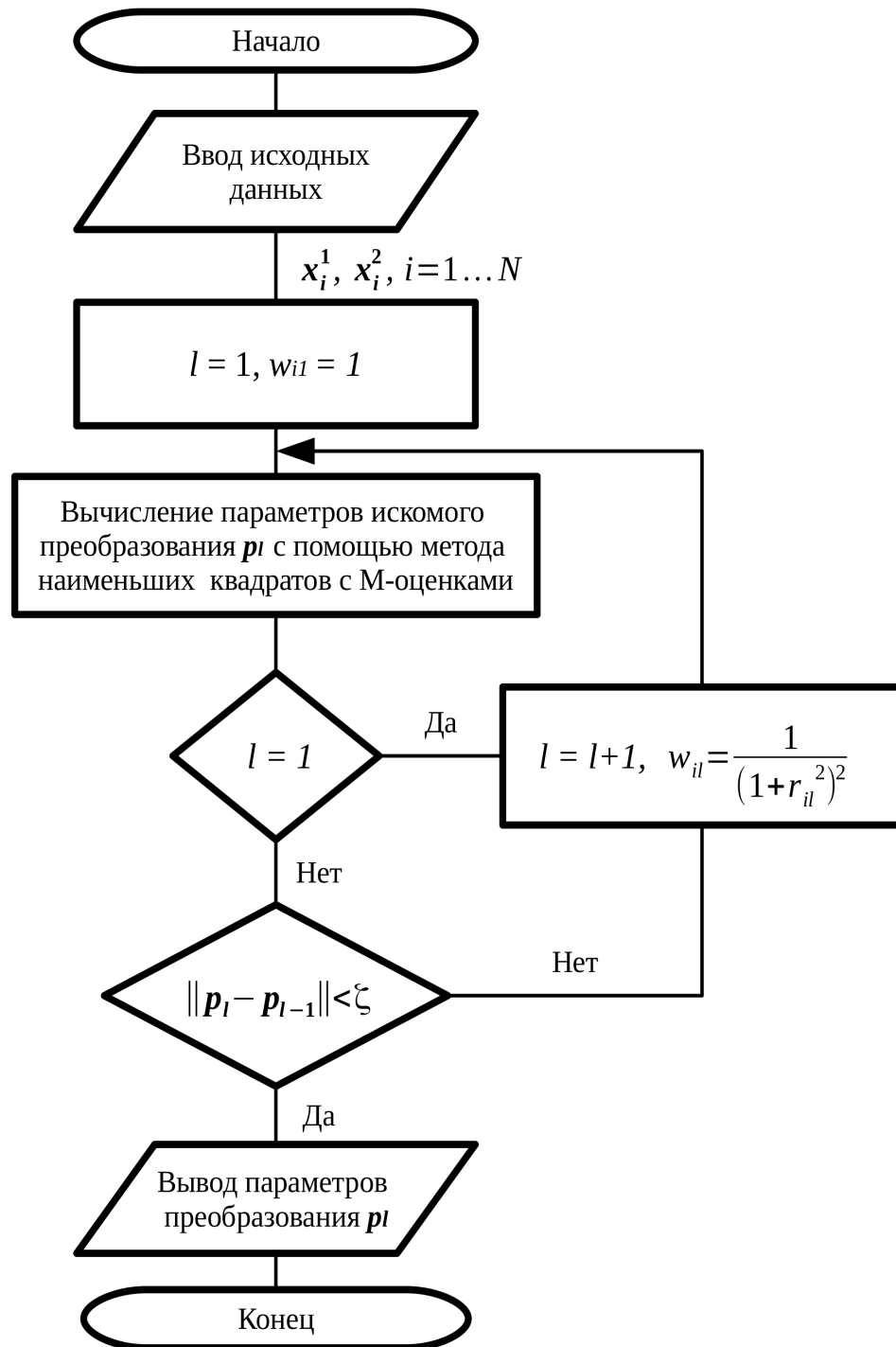


Рисунок 2.15 – Алгоритм вычисления параметров взаимной ориентации двух РЛИ земной поверхности

### 2.3.6 Построение графа связности

Для построения единой радиолокационной карты необходимо найти ориентацию каждого обрабатываемого РЛИ земной поверхности относительно единой СК.

Рассмотренный в подразделе 2.3.5 алгоритм позволяет получить множество пар перекрывающихся РЛИ земной поверхности с известной их взаимной ориентацией. Для определения искомой ориентации каждого РЛИ относительно единой СК необходимо объединить их в один или несколько графов связности.

*Граф связности* – неориентированный связный граф с неотрицательными весами ребер [105], каждая вершина которого соответствует одному обрабатываемому РЛИ, а ребро свидетельствует о найденном перекрытии между двумя изображениями.

Вес ребра графа связности между  $i$ -й и  $j$ -й вершинами определяется следующим образом:

$$W_{ij} = \frac{E_{ij}}{N_{ij}}, \quad (60)$$

где  $E_{ij}$  – крайнее значение функции невязки (на последней итерации) при вычислении взаимной ориентации, а  $N_{ij}$  – количество достоверных опорных точек. Достоверными будем называть те опорные точки, весовые коэффициенты (55) которых близки к единице. Каждому ребру графа между  $i$ -й и  $j$ -й вершинами соответствуют два преобразования СК (взаимная ориентация) –  $G_{ij}$  и  $G_{ji}$ , описывающие преобразование СК  $I_i$  в  $I_j$  и наоборот  $I_j$  в  $I_i$  соответственно. На рисунке 2.16 представлен пример графа связности из восьми РЛИ земной поверхности.

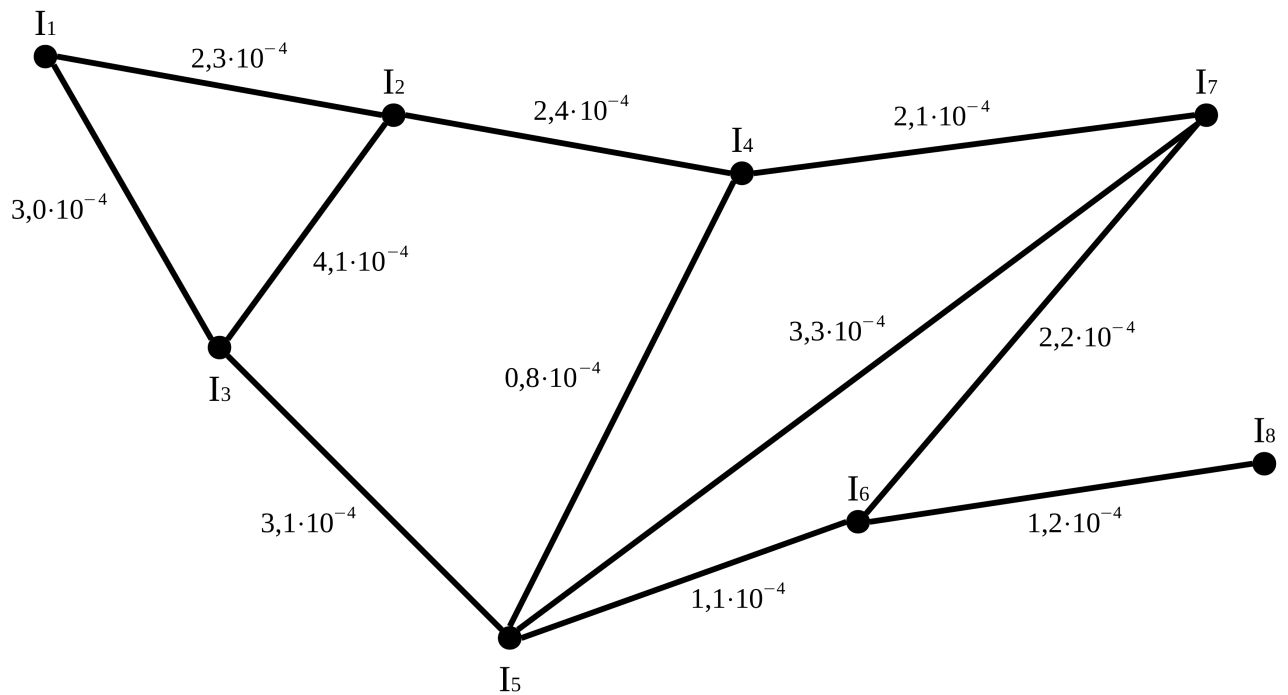


Рисунок 2.16 – Граф связности обрабатываемых РЛИ земной поверхности

С помощью графа связности можно найти преобразование между СК любых РЛИ данного графа. Для примера найдем преобразование из СК  $I_1$  в СК  $I_7$  на рисунке 2.16:

$$\mathbf{x}^7 = G_{17}(\mathbf{x}^1) = G_{47}(G_{24}(G_{12}(\mathbf{x}^1))), \quad (61)$$

где  $\mathbf{x}^7$  и  $\mathbf{x}^1$  – координаты точки в СК  $I_7$  и  $I_1$  соответственно.

При отсутствии информации о географической привязке и элементах внешнего ориентирования обрабатываемых РЛИ земной поверхности невозможно выбрать единую СК, в точности удовлетворяющую второму критерию оптимальности (23). В качестве единой СК выбирается СК одного из РЛИ, которому соответствует вершина графа связности с максимальной степенью (количеством инцидентных ей ребер). Выбранное РЛИ становится базовым. Таким образом, задача поиска ориентации каждого РЛИ сводится к задаче поиска преобразования из СК каждого РЛИ в СК базового РЛИ.

Используя алгоритм Дейкстры [106], в графе связности находятся кратчайшие пути от вершины базового РЛИ до всех остальных. Зная преобразование СК для всех ребер (полученная ранее взаимная ориентация между вершинами ребра), подобно (61) можно вычислить ориентацию каждого РЛИ относительно базового согласно найденному для него кратчайшему пути. Результат работы алгоритма Дейкстры для базового РЛИ  $I_5$  представлен на рисунке 2.17, где пунктиром отмечены ребра, не используемые в кратчайших путях.

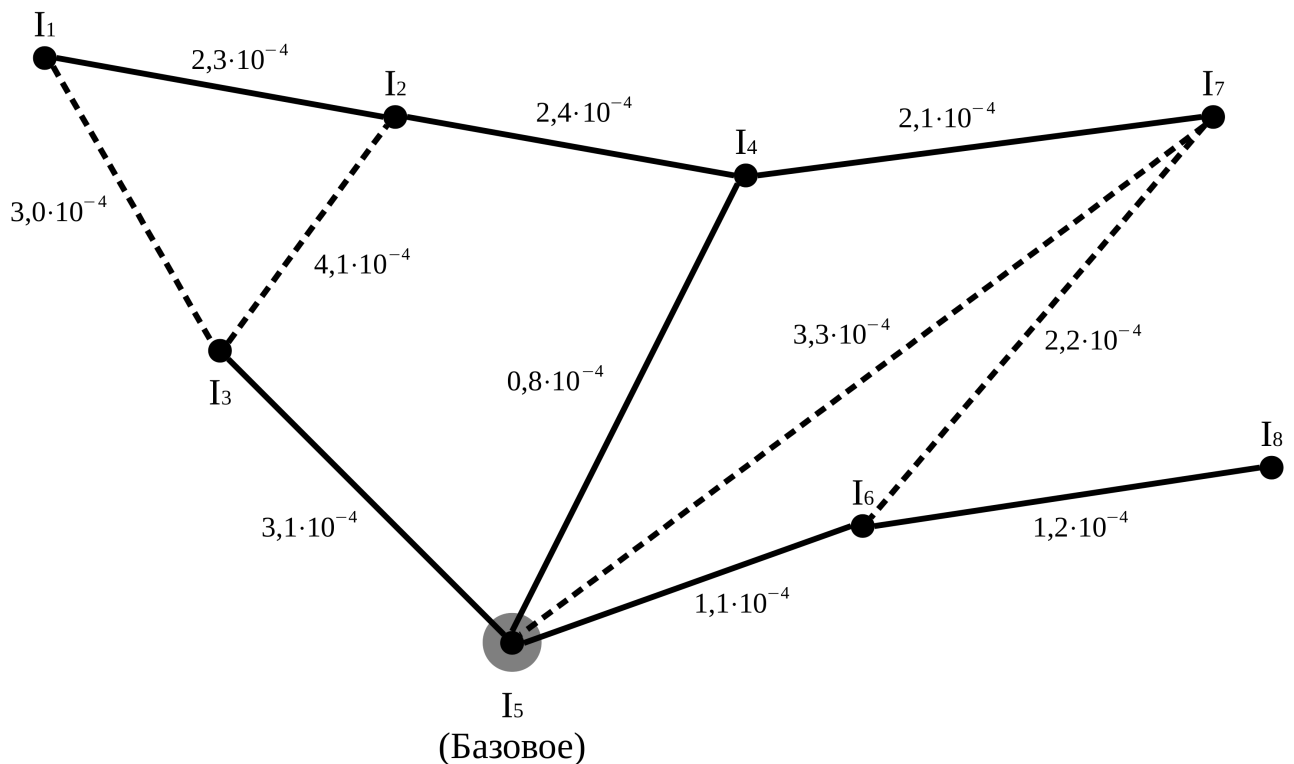


Рисунок 2.17 – Граф связности обрабатываемых РЛИ земной поверхности с найденными кратчайшими путями (показаны сплошными линиями) от базового РЛИ до остальных

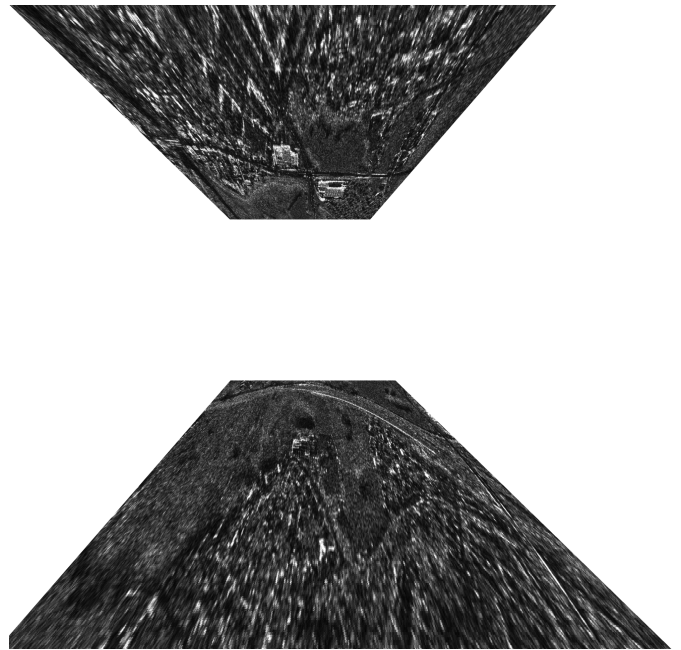
Далее, каждое РЛИ земной поверхности трансформируется согласно найденной ориентации и накладывается на единую СК (СК базового РЛИ), что приводит к созданию единой многослойной радиолокационной карты.

### 2.3.7 Уточнение ориентации набора перекрывающихся РЛИ

Эквивалентность единой СК и СК базового РЛИ земной поверхности подразумевает, что ориентация базового РЛИ характеризуется единичной матрицей в (37). Другими словами, плоскость базового РЛИ считается плоскостью земной поверхности. К сожалению, формирование РЛИ в РЛС землеобзора осуществляется в плоскости отличной от плоскости земной поверхности [20, 107]. В графе связности могут найтись РЛИ, на которые, согласно ошибочной плоскости земной поверхности базового РЛИ, якобы попал участок неба (такие участки на изображении будем называть фиктивными), поэтому вычисление ориентации в этом случае даст некорректный результат. Трансформирование таких РЛИ согласно полученной ориентации приведет к изображению бесконечных размеров. Описанный случай представлен на рисунке 2.18.



а)



б)

Рисунок 2.18 – Исходное РЛИ (а) и фрагмент ошибочно обработанного (б) при большой величине угла между плоскостью базового РЛИ и земной поверхностью (полное обработанное изображение имеет бесконечные размеры)

В этой связи необходим алгоритм уточнения ориентации базового РЛИ, который приблизит плоскость единой радиолокационной карты к плоскости земной поверхности, что позволит избежать описанных некорректных искажений, а также способствует минимизации второго критерия оптимальности (23).

Точка начала СК РЛИ находится в левом верхнем углу изображения, оси  $Ox$  и  $Oy$  направлены вправо и вниз соответственно (рисунок 2.19). Таким образом, координаты любой точки  $(x,y)$  на самом РЛИ в его СК всегда неотрицательны, что, тем не менее, несправедливо для других РЛИ, преобразованных в СК данного.



Рисунок 2.19 – Система координат радиолокационного изображения

Рассмотрим проективное преобразование (37) из СК РЛИ  $I_2$  в СК РЛИ  $I_1$ . При попадании фиктивной линии горизонта на изображение справедливо:

$$\exists x, y \in I_2 : t \rightarrow 0 \Rightarrow u \rightarrow \infty, v \rightarrow \infty, \quad (62)$$

что и порождает бесконечное изображение после трансформации, при этом точки изображения фиктивного неба на РЛИ соответствуют  $t < 0$ , а точки изображения земной поверхности  $-t > 0$ .

Таким образом, целью искомого алгоритма является поиск ориентации базового РЛИ, для которой справедливо:

$$\forall I \in \Omega, \forall x, y \in I : t > 0, \quad (63)$$

где  $\Omega$  – множество всех обрабатываемых РЛИ. Другими словами, целью алгоритма является отклонение плоскости единой СК от плоскости базового РЛИ таким образом, чтобы ни на одном изображении не было участков фиктивного неба.

Пусть  $M_B$  – матрица (37), описывающая ориентацию базового РЛИ (изначально  $M_B$  является единичной матрицей). Изменение параметров  $a_B, b_B, c_B, d_B, e_B, f_B$  матрицы  $M_B$  не даст необходимого результата и приведет к скольжению плоскости единой СК по плоскости базового РЛИ. Для достижения поставленной цели необходимо варьировать параметры  $g_B, h_B$  матрицы  $M_B$ , отвечающие за перспективные искажения.

Введем функцию невязки:

$$Es(g_B, h_B) = \sum_{i=1}^N S_i^-, \quad S_i^- \in [0, 1], \quad (64)$$

где  $S_i^-$  – доля площади области фиктивного неба ( $t \leq 0$ ) на  $i$ -ом РЛИ после преобразования его в единую СК, а  $N$  – общее количество обрабатываемых РЛИ. Цель искомого алгоритма сводится к подбору таких  $g_B$  и  $h_B$ , при которых функция невязки (64) равна нулю.

Отдельное внимание необходимо уделить способу подсчета величин  $S^-$ , так как нахождение  $t$  для каждой точки каждого РЛИ приведет к значительным

вычислительным затратам, что нежелательно. На рисунке 2.20 показаны возможные положения фиктивной линии горизонта ( $t = 0$ ) на изображении, при этом знаком «+» отмечены точки с  $t > 0$  (назовем их положительными), а знаком «-» – с  $t < 0$  (отрицательные точки).

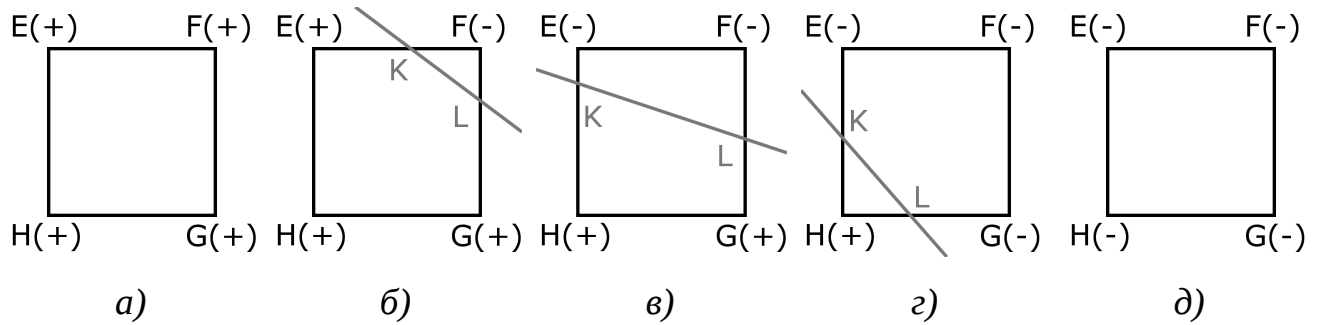


Рисунок 2.20 – Различные положения фиктивной линии горизонта (обозначена серым) относительно изображения EFGH

Для начала найдем значения  $t$  для угловых точек E, F, G и H изображения. Если все угловые точки положительные (рисунок 2.20, а), то  $S^- = 0$ , если все отрицательные (рисунок 2.20, д), то  $S^- = 1$ .

В случае, показанном на рисунке 2.20, б, только одна угловая точка является отрицательной, значит  $S^- = S_{KLF} / S_{EFGH}$ . Если только одна угловая точка является положительной (рисунок 2.20, г), то  $S^- = 1 - S_{KLH} / S_{EFGH}$ . Если две угловые точки отрицательны (рисунок 2.20, в), то  $S^- = (S_{KLF} + S_{EKF}) / S_{EFGH}$ , причем данные точки всегда имеют общую грань.

Рассмотрим рисунок 2.20, в. Согласно (62) для точки К пересечения «линии горизонта» с гранью EH справедливо:

$$t_K(\alpha) = 0, \quad \alpha = \frac{KH}{EH}, \quad \alpha \in [0, 1], \quad t_K(0) > 0, \quad t_K(1) < 0. \quad (65)$$



Уравнение (65) решается численно с помощью итеративного метода бисекции (метода половинного деления) [108], что позволяет определить координаты точки К с требуемой точностью. Аналогичным образом можно найти положение точки L на грани FG, что позволяет без значительных вычислительных затрат искать значения величин  $S^-$  для каждого РЛИ и, как следствие, значение функции невязки (64).

Для минимизации функции невязки (64) применим итеративный метод градиентного спуска:

$$\begin{Bmatrix} g_B^{l+1} \\ h_B^{l+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} g_B^l \\ h_B^l \end{Bmatrix} - \lambda^l \nabla Es(g_B^l, h_B^l), \quad g_B^0 = h_B^0 = 0, \quad \lambda^0 = \lambda_0, \quad (66)$$

где  $l$  – номер итерации, градиент  $\nabla Es(g_B^l, h_B^l)$  вычисляется численно по разностной схеме,  $\lambda_0$  – заранее заданная константа, а  $\lambda$  – параметр, корректирующийся следующим образом:

$$\text{если } \nabla Es(g_B^{l+1}, h_B^{l+1}) < \nabla Es(g_B^l, h_B^l), \text{ то } \{\lambda^{l+1} = \lambda^l \cdot q_\lambda, l = l + 1\}, \text{ иначе } \{\lambda^{l+1} = \frac{\lambda^l}{q_\lambda}\}, \quad (67)$$

где  $q_\lambda$  – заранее заданная константа.

Итеративный метод прекращает свою работу по достижению одного из трех условий:

- 1)  $Es(g_B^l, h_B^l) = 0$ ;
- 2)  $Es(g_B^l, h_B^l) - Es(g_B^{l-1}, h_B^{l-1}) < \eta$ , где  $\eta$  – заранее заданная пороговая величина;
- 3)  $l > l_{max}$ , где  $l_{max}$  – заранее заданное максимальное число итераций.

Если по окончании работы метода условия 2 или 3 выполняются, а условие 1 нет, то остались РЛИ, которые невозможно корректно трансформировать на плоскость единой СК. Такие изображения убираются из рассмотрения и не входят

в единую радиолокационную карту. На практике при корректной работе всех предыдущих этапов алгоритма автоматической сшивки РЛИ земной поверхности данный случай маловероятен.

Если по окончании работы метода условие 1 выполняется, значит ориентация  $M_B$  базового РЛИ относительно единой СК, удовлетворяющая поставленным требованиям, найдена успешно.

При обработке большого количества разноракурсных перекрывающихся РЛИ земной поверхности полученный алгоритм уточнения ориентации базового РЛИ способствует приближению плоскости единой СК к плоскости земной поверхности, что в свою очередь способствует минимизации функционала второго критерия оптимальности (23) [109].

#### **2.4 Общая структура алгоритма автоматической сшивки РЛИ земной поверхности с перекрытием при неизвестных элементах внешнего ориентирования**

Искомый квазиоптимальный автоматический алгоритм сшивки РЛИ земной поверхности можно представить в виде совокупности разработанных выше алгоритмов. Обработка РЛИ земной поверхности в этом случае будет состоять из следующих последовательных этапов.

**Первый этап** заключается в оценке пригодности обрабатываемых РЛИ земной поверхности для сшивки (см. подраздел 2.3.3). Для каждого РЛИ определяются показатели насыщенности семантики  $S$ ,  $S_{ps}$ ,  $S_m$ , затем происходит сравнение их значений с заранее заданными пороговыми. Не прошедшие данный этап РЛИ выкидываются из рассмотрения, как изображения со скудной семантикой (на таких РЛИ невозможно найти опорные точки в области перекрытия, как и определить саму область перекрытия).

**Следующим этапом** с помощью модифицированного алгоритма SURF (см. подраздел 2.3.2) и алгоритма поиска ближайшего соседа с разбиением в  $k$ -мерное

дерево (см. подраздел 1.4.3) происходит автоматическое обнаружение опорных точек в областях перекрытия обрабатываемых РЛИ. Результатом данного этапа будут пары перекрывающихся РЛИ земной поверхности с набором опорных точек.

**Третьим этапом** определяется взаимная ориентация всех пар перекрывающихся РЛИ на основе найденных опорных точек с использованием алгоритм определения ориентации двух перекрывающихся РЛИ с помощью метода наименьших квадратов с М-оценками (см. подраздел 2.3.5). Указанный алгоритм построен с учетом минимизации функционала первого критерия оптимальности (22). Результатом работы данного этапа является множество пар перекрывающихся РЛИ с найденной взаимной ориентацией.

**Далее**, все пары перекрывающихся РЛИ организуются в граф связности (см. подраздел 2.3.6), который позволяет вычислить ориентацию каждого РЛИ относительно СК единой радиолокационной карты. В качестве СК единой радиолокационной карты выбирается СК одного из обрабатываемых РЛИ (которому соответствует вершина графа с наибольшей степенью), который называется базовым.

**Следующим этапом** происходит уточнение ориентации базового РЛИ с помощью алгоритма, разработанного в подразделе 2.3.7. Данный этап способствует минимизации функционала второго критерия оптимальности (23).

**Финальный этап** заключается в трансформации всех обрабатываемых РЛИ согласно найденной ориентации в единую СК с последующим наложением друг на друга, что приводит к созданию единой многослойной радиолокационной карты местности.

Общую структуру автоматического алгоритма сшивки РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования можно представить в виде, приведенном на рисунке 2.21.

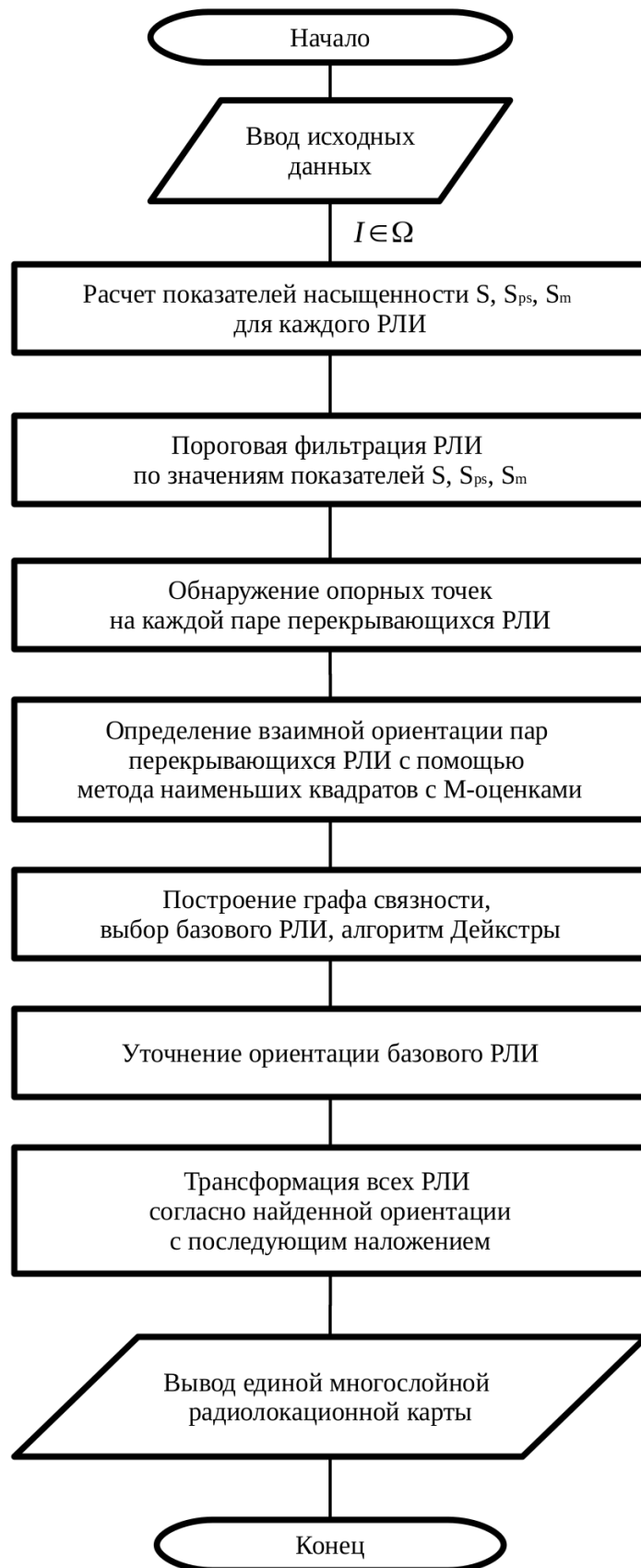


Рисунок 2.21 – Алгоритм автоматической сшивки РЛИ земной поверхности

## Выводы по главе 2

1. Уязвимость к повороту семантики изображения в алгоритме SURF обуславливается примесями неанализируемых областей при вычислении ориентации точек интереса. Применение составных вейвлетов Хаара в модифицированном алгоритме SURF позволяет снизить максимальное значение доли указанных примесей с 17% до 10%.
2. В качестве алгоритма автоматического поиска опорных точек необходимо использовать модернизированный алгоритм SURF и алгоритм поиска ближайшего соседа с помощью k-мерного дерева.
3. Для определения пригодности РЛИ для автоматической сшивки необходимо анализировать насыщенность его семантики, которая количественно может быть оценена с помощью одномерных  $S$ ,  $S_{ps}$  и матричного  $S_m$  показателей изображения.
4. Для определения взаимной ориентации перекрывающихся РЛИ по набору опорных точек использование ИНС нецелесообразно в силу большой погрешности результатов работы ИНС при малом перекрытии РЛИ и «дрожания» изображений объектов на РЛИ после преобразования.
5. В качестве математической модели преобразования между СК перекрывающихся РЛИ земной поверхности целесообразно использовать проективное преобразование. Вычисление его параметров по набору опорных точек необходимо проводить с помощью итеративного алгоритма, основанного на методе наименьших квадратов с М-оценками. Данный подход позволяет уменьшить влияние ошибочно найденных опорных точек на точность получаемых параметров.
6. Пары перекрывающихся РЛИ земной поверхности необходимо объединить в граф связности. Алгоритм Дейкстры позволяет получить преобразование СК между любыми РЛИ графа связности.

7. Плоскость базового РЛИ земной поверхности зачастую не совпадает с плоскостью земной поверхности, что может привести к получению изображений бесконечных размеров после преобразования обрабатываемых РЛИ согласно их вычисленной ориентации. Алгоритм уточнения ориентации базового РЛИ земной поверхности, основанный на алгоритме градиентного спуска, позволяет приблизить плоскость формируемой единой радиолокационной карты к плоскости земной поверхности.
8. Разработанный алгоритм сшивки РЛИ земной поверхности является квазиоптимальным и автоматическим. При работе полученного алгоритма не требуются элементы внешнего ориентирования или географическая привязка обрабатываемых РЛИ.

### ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СШИВКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Этап моделирования на ЭВМ является неотъемлемой частью процесса разработки алгоритмов обработки информации. Данный этап призван проверить корректность полученных решений (непротиворечивость полученных результатов экспериментальным данным), а также оценить их время работы.

В данной работе компьютерное моделирование всех полученных процедур проводилось на ЭВМ, основные характеристики которой представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристики используемой для моделирования ЭВМ

Центральный процессор	Intel Core i5-2500K
тактовая частота одного вычислительного ядра, ГГц	3,3
количество вычислительных ядер/потоков, шт.	4/4
архитектура/разрядность	Sandy Bridge/64 бит
ОЗУ	
тип	DDR3/двухканальный
общий объем, Гб	16
Операционная система (ОС)	Linux (3.19.8-100)

#### 3.1 Поэтапное моделирование алгоритма сшивки радиолокационных изображений земной поверхности

Как видно из рисунка 2.21, разрабатываемый алгоритм сшивки РЛИ земной поверхности состоит из последовательности меньших алгоритмов, решающих частные задачи. Далее, рассмотрим результаты их моделирования.

### 3.1.1 Количественная оценка насыщенности семантики РЛИ земной поверхности

Моделирование алгоритма количественной оценки насыщенности семантики РЛИ земной поверхности происходило с помощью его реализации в виде компьютерной программы, написанной на языке программирования C++ с использованием библиотек STL и OpenCV.

Результаты оценки насыщенности семантики РЛИ путем определения показателей  $S$ ,  $S_{ps}$  и  $S_m$  приведены на рисунках 3.1-3.3.

На рисунке 3.1 представлены 3 фрагмента РЛИ земной поверхности приблизительно одной площади (в экранных координатах), для которых были определены показатели  $S$  и  $S_{ps}$  (таблица 3.2). Из представленных результатов видно, что более насыщенная семантика изображения (рисунок 3.1, б) ведет к росту показателей  $S$  и  $S_{ps}$ , в то время как снижение насыщенности (рисунок 3.1, а и в) ведет к уменьшению отмеченных параметров.

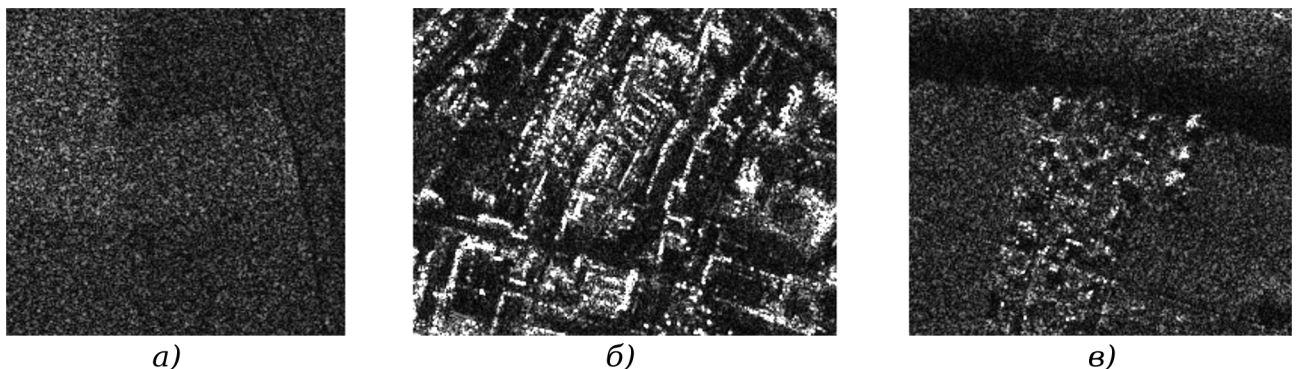


Рисунок 3.1 – Фрагменты радиолокационных изображений с различной степенью насыщенности семантики, на которых изображены поле (а), район города (б) и небольшие сельские постройки (в)

На рисунке 3.2 приведены результаты определения матричного показателя  $S_m$  насыщенности семантики РЛИ. Для удобства восприятия размер матрицы  $S_m$  был увеличен до размеров обрабатываемого изображения с помощью линейной



интерполяции. Как видно из результатов на рисунке 3.2, путем анализа матричного показателя  $S_m$  можно с точностью до шага сетки  $P$  выделить области с повышенной насыщенностью семантики на изображении.

Таблица 3.2 – Показатели насыщенности семантики для фрагментов РЛИ

Фрагмент РЛИ	$S$	$S_{ps}$
Поле (рисунок 3.1, а)	9	$0,18 \cdot 10^{-3}$
Район города (рисунок 3.1, б)	432	$6,89 \cdot 10^{-3}$
Сельские постройки (рисунок 3.1, в)	74	$1,31 \cdot 10^{-3}$

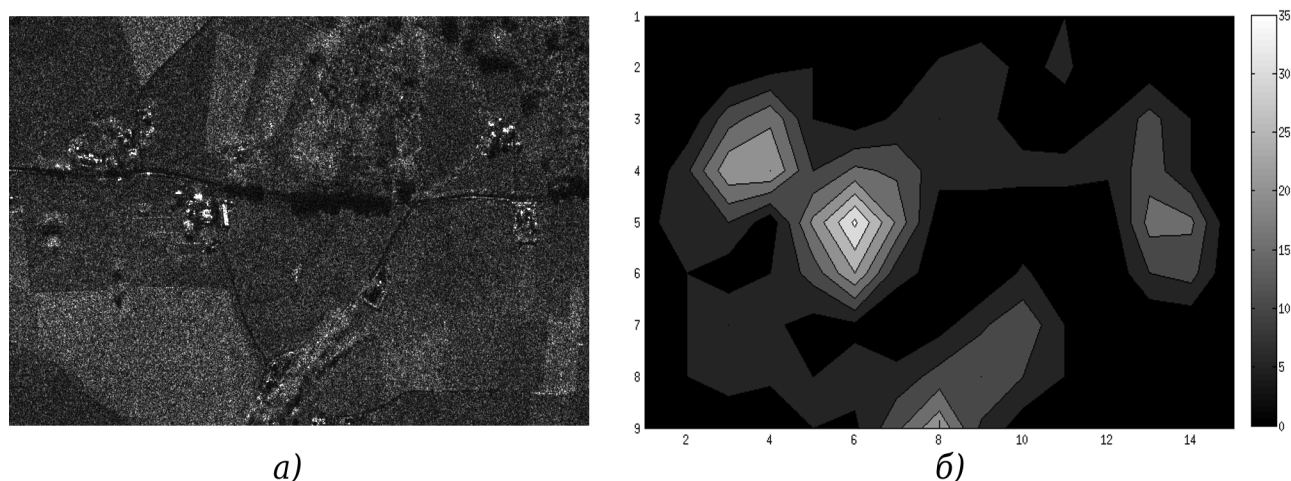


Рисунок 3.2 – РЛИ сельской местности (а) и полученный матричный показатель  $S_m$  (б) при шаге сетки  $P = 80$  пкс. Для наглядности значения элементов матрицы  $S_m$  были интерполированы с увеличением размера матрицы до размеров изображения

На рисунке 3.3 показано влияние шумов на показатель насыщенности семантики РЛИ. Увеличение степени зашумленности изображения ведет к уничтожению мелких его деталей и, соответственно, должно уменьшать значение величины  $S$ , что и наблюдается. Чисто шумовой фон на изображении (рисунок 3.3, в) интереса не представляет, показатель насыщенности семантики  $S$  такого изображения близок к нулю.

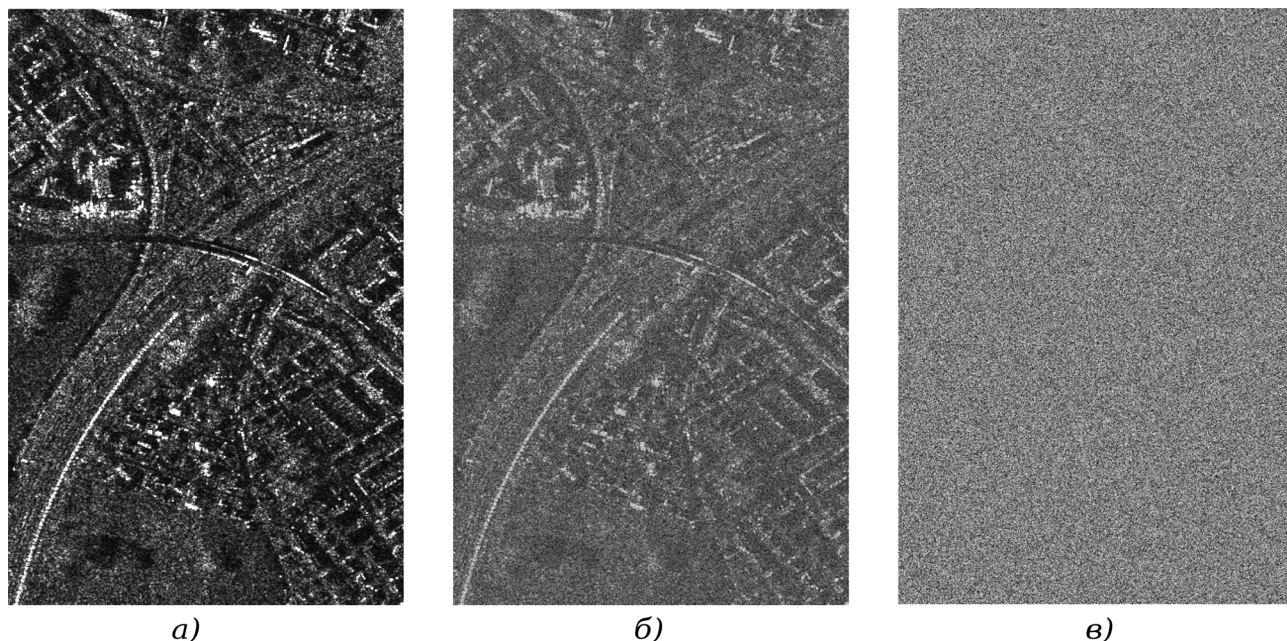


Рисунок 3.3 – Показатель насыщенности семантики для «чистого» РЛИ (а)  $S = 1041$ , зашумленного РЛИ (б)  $S = 156$  и только шума (в)  $S = 2$

Временные затраты на вычисление трех показателей насыщенности семантики  $S$ ,  $S_{ps}$  и  $S_m$  для одного РЛИ на указанной ранее ЭВМ приведены на рисунке 3.4. Обработка изображений в полученном алгоритме оценки насыщенности семантики РЛИ легко поддается распараллеливанию, что дает возможности значительно снизить временные затраты при использовании специализированных вычислителей (например, вычислительные массивы с поддержкой технологии QUDA или OpenCL).

В ходе моделирования были установлены рекомендуемые значения параметров алгоритма. Наилучший результат был получен при значениях порога  $T$  в пределах отрезка  $[0,0001, 0,0004]$ . При  $\sigma = 1,2$  использование более одной пирамиды изображения с другими  $\sigma$  не давало ощутимого изменения результата, однако сказывалось на затрачиваемых ресурсах ЭВМ. Рекомендуемое количество копий изображения, уменьшенных равномерно по вертикали и горизонтали, в пирамиде изображений ( $N_p$ ) равняется трем, так как дальнейшее его увеличение практически не влияет на получаемый результат.

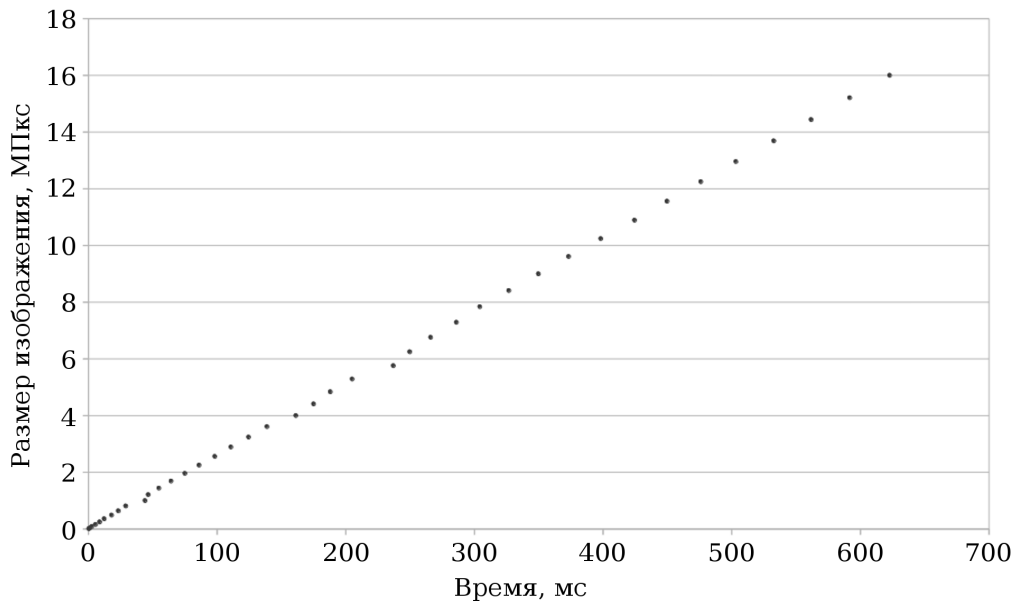


Рисунок 3.4 – Временные затраты на вычисление показателей насыщенности РЛИ земной поверхности с помощью разработанного алгоритма

Конкретное значение параметра шага сетки  $P$  при вычислении матричного параметра насыщенности семантики  $S_m$  не принципиально. Однако стоит следить за тем, чтобы для двух РЛИ, насыщенность семантики которых подвергается сравнению, параметр  $P$  имел одно и то же значение.

### 3.1.2 Автоматический поиск опорных точек на перекрывающихся РЛИ

Моделирование модернизированного алгоритма SURF, как и алгоритма поиска опорных точек в целом (см. подраздел 2.3.2) происходило с помощью его реализации в виде компьютерной программы, написанной на языке программирования C++ с использованием библиотек STL и OpenSURF.

Работоспособность модернизированного алгоритма SURF проверялась при поиске опорных точек нескольких пар зашумленных фрагментов РЛИ окрестностей города Розенхайма с перекрытием, сформированных в прожекторном режиме космической РСА TerraSAR-X. При этом для нахождения и описания точек интереса на фрагментах РЛИ использовались оригинальный или модернизированный

алгоритмы SURF, а для сопоставления дескрипторов найденных точек интереса с целью определения опорных точек использовался алгоритм поиска ближайшего соседа с разбиением в k-мерное дерево (см. подраздел 1.4.3).

Результаты моделирования приведены на рисунке 3.5, где представлен характер изменения количества найденных опорных точек от угла поворота семантики изображения при использовании исходного и модифицированного алгоритмов SURF.

Использование составных вейвлетов Хаара (рисунок 2.6) вместо оригинальных (рисунок 1.4) позволяет увеличить в среднем на 40% минимальное количество найденных опорных точек, что значительно повышает стабильность обнаружения областей общей семантики на изображениях с малым перекрытием. Время работы модифицированного алгоритма SURF по сравнению с оригинальной версией увеличилось в среднем на 5,5%, а затрачиваемый объем ОЗУ остался неизменным.

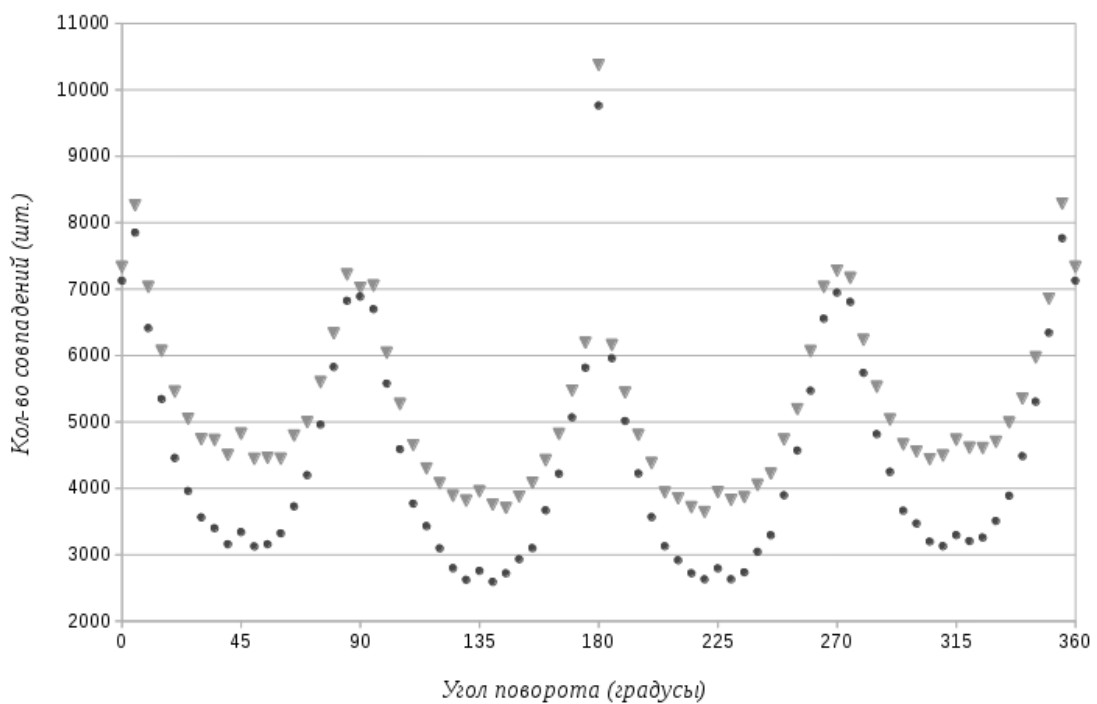


Рисунок 3.5 – Зависимость количества найденных совпадений (опорных точек) двух перекрывающихся РЛИ при использовании оригинального (отмечены точками) и модифицированного (отмечены треугольниками) алгоритмов SURF

В приложении Б показан результат поиска опорных точек на двух фрагментах с небольшим перекрытием и поворотом семантики на  $45^\circ$ . На рисунке Б.1 показано изначальное положение фрагментов на исходном РЛИ. На рисунках Б.2 и Б.3 показаны результаты работы оригинальной и модифицированной версий алгоритма SURF соответственно, где  $N$  – количество найденных опорных точек. Как видно из представленных результатов приложения Б, в наихудшем случае (угол поворота семантики  $45^\circ$ , что удовлетворяет (26)) при использовании модернизированного алгоритма SURF количество опорных точек увеличилось с 21 до 27.

В реализации оригинального алгоритма SURF при расчете второй производной для различных уменьшенных копий изображения используется свертка с матрицами, аналогичным изображенным на рисунке 2.8, но увеличенным с сохранением пропорций (пример такого увеличения матрицы  $9 \times 9$  в матрицу размером  $15 \times 15$  показан на рисунке 3.6).

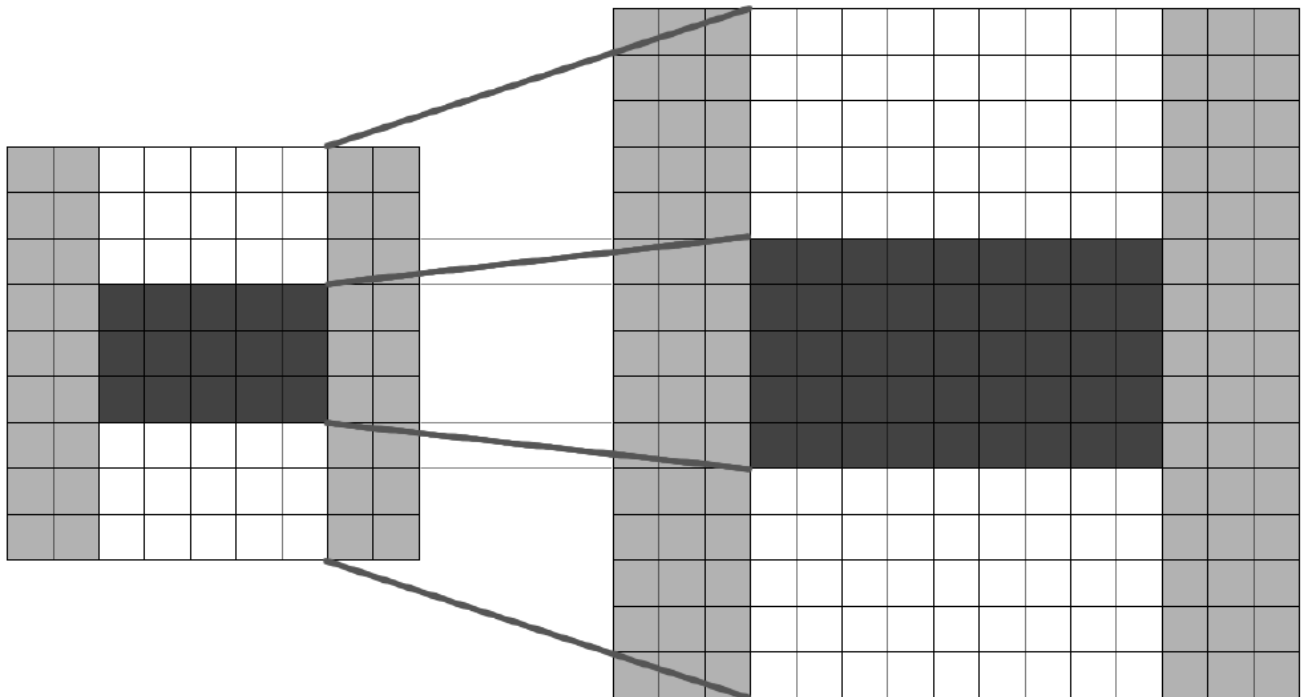


Рисунок 3.6 – Увеличение матрицы расчета второй производной изображения  $du_{xy}$  с сохранением пропорций

Получение матриц большого размера автоматически таким методом затруднительно и требует предварительного расчета. В [68] описывается получение матрицы максимальным размером 99x99, что соответствует уменьшению масштаба изображения примерно в 8 раз, однако разница разрешения различных РЛИ земной поверхности может значительно превышать данную величину.

В модернизированном алгоритме SURF предлагается увеличивать размер указанных матриц последовательно по степеням двойки. Данный подход не требует изменения структуры самих матриц, что упростит их получение для уменьшенных копий исходного изображения с большим коэффициентом уменьшения масштаба, а так же разным его значениям по вертикали и горизонтали).

Количество уменьшенных копий изображения в пирамиде изображений при обработке модернизированным алгоритмом SURF предлагается брать в зависимости от размера обрабатываемого РЛИ. Минимальный размер РЛИ для обнаружения четырех точек интереса (потенциальные опорные точки) с непересекающимися областями расчета дескрипторов составляет 18x18 пикселей (при использовании для вычисления второй производной композитных матриц, изображенных на рисунке 2.8). Пусть перекрытие между РЛИ земной поверхности составляет 50%, что увеличивает минимальный размер РЛИ до 26x26 (увеличение площади в два раза приводит к увеличению сторон в  $\sqrt{2}$  раз). Стоит заметить, что на практике не каждая точка интереса, попавшая в область перекрытия, становится опорной. В этой связи увеличим минимальные допустимый размер уменьшенной копии РЛИ в 2 раза по горизонтали и вертикали до 52x52.

В большинстве современных РЛС землеобзора соотношение размеров элементов разрешения на РЛИ земной поверхности по горизонтальной и путевой дальностям близко к 1. Тем не менее, для успешной сшивки РЛИ с «вытянутыми» элементами разрешения, добавим в пирамиду РЛИ уменьшенные его копии с различным сжатием по вертикали и горизонтали.

Таким образом, пирамиду обрабатываемого РЛИ земной поверхности будут составлять:

- 1) копии исходного РЛИ, последовательно уменьшенные одновременно в 2 раза по вертикали и горизонтали, пока одна из сторон не станет меньше 52 пикселей;
- 2) уменьшенные и увеличенные по вертикали в 2 раза имеющиеся элементы пирамиды изображения, пока размер по вертикали не станет меньше 52 пикселей или не достигнет размера исходного изображения (если заведомо известно, что все РЛИ имеют квадратный или близкий к квадратному элементы разрешения, данные изображения можно не включать в пирамиду обрабатываемого РЛИ).

Пусть имеется РЛИ земной поверхности размером 1024x1024. Пирамиду данного изображения будут составлять его копии следующих размеров: 1024x1024, 512x512, 256x256, 128x128, 64x64, 1024x512, 1024x256, 1024x128, 1024x64, 512x1024, 512x256, 512x128, 512x64, 256x1024, 256x512, 256x128, 256x64, 128x1024, 128x512, 128x256, 128x64, 64x1024, 64x512, 64x256, 64x128.

Применение фильтра Гаусса при обработке РЛИ земной поверхности в (5) позволяет значительно ослабить влияние спекл-шума на нахождение и описание точек интереса. Опираясь на [68] и результаты математического моделирования, стоит отметить, что наилучший результат достигается при использовании двух пирамид обрабатываемого изображения с размытием фильтром Гаусса при значениях  $\sigma = 1,2$  и  $1,6$ .

Использование для сопоставления дескрипторов точек интереса алгоритма ближайшего соседа с разбиением в  $k$ -мерное дерево дает значительный выигрыш по времени в сравнении с полным перебором. Для двух РЛИ земной поверхности размером около 80 МПкс (рисунок В.1) сопоставление 325346 точек интереса одного РЛИ с 248719 точками интереса другого с помощью полного перебора занимает  $\sim 529,0$  секунд. Аналогичная задача с помощью  $k$ -мерного дерева решается за  $\sim 3,3$  секунды. Общее время работы полученного алгоритма поиска

опорных точек (поиск и описание точек интереса двух РЛИ с помощью модернизированного SURF и сопоставление их дескрипторов с помощью алгоритма поиска ближайшего соседа с разбиением в k-мерное дерево) для указанных РЛИ земной поверхности составило  $\sim 208,8$  секунд, при этом было найдено 10490 опорных точек при перекрытии около 10%.

### **3.1.3 Алгоритм поиска ориентации двух перекрывающихся РЛИ с помощью метода наименьших квадратов**

Моделирование алгоритма поиска ориентации двух перекрывающихся РЛИ с помощью метода наименьших квадратов с М-оценками происходило с помощью его реализации в виде компьютерной программы, написанной на языке программирования C++ с использованием библиотеки STL.

Первоначально алгоритм тестировался на «фиктивных» опорных точках, получение которых проходило без РЛИ земной поверхности. Использовались следующие значения пороговых величин:  $\zeta = 10^{-5}$  (получен эмпирически),  $T_l = 1000$ . Параметр  $T_l$  необходим для исключения возможного закливания полученного итеративного алгоритма.

Для каждого теста случайным образом генерировались коэффициенты искомого проективного преобразования и 10000 точек с координатами в пределах отрезка  $[0, 10000]$  в некоторой СК ( $I_1$ ). Далее, используя проективное преобразование, вычислялись координаты описанных точек в другой СК ( $I_2$ ) (получаем 10000 корректных опорных точек). К полученным координатам добавлялся аддитивный гауссовский шум с заданной  $\sigma \in [0...10]$ . К данной выборке добавлялись от 1 до 1000 (не более 10% от количества корректных опорных точек) выбросов, сгенерированных случайным образом. Тестируемый алгоритм путем анализа полученных опорных точек должен был определить коэффициенты искомого проективного преобразования.



Для решения поставленной задачи на протяжении 100 тестов с помощью различных наборов опорных точек, полученных вышеописанным путем, реализации алгоритма потребовалось от  $\sim 2$  мс до 172 мс в зависимости от количества необходимых алгоритму итераций. Параметры проективного преобразования в каждом из тестов определялись с точностью порядка  $\zeta$ . Среднеквадратичная ошибка определения координат корректных опорных точек в СК  $I_2$ , вычисленных по полученным параметрам проективного преобразования, была порядка заданной величины  $\sigma$  аддитивного гауссовского шума. Стоит отметить, что не было зафиксировано ни одного случая выхода из итеративного процесса по достижению предела по количеству итераций  $T_l$ .

Благодаря использованию М-оценок, разработанный алгоритм успешно определял корректное большинство опорных точек на протяжении всех тестов, при этом вклад ошибочных опорных точек в вычисление искомым параметров проективного преобразования сводился к нулю.

При увеличении количества выбросов в выборке исходных данных до величины более 15% от количества корректных опорных точек появлялись случаи сходимости алгоритма к ошибочным параметрам преобразования, что не является критичным, так как доля выбросов в опорных точках, полученных из реальных данных (реальных перекрывающихся РЛИ земной поверхности), не превышает 0,5% – 1%.

Следующим этапом проводилось моделирование алгоритма на опорных точках, полученных с помощью реальных перекрывающихся РЛИ земной поверхности. Примеры используемых пар РЛИ земной поверхности и результаты их ориентации представлены в приложении В.

На рисунке В.1 показаны два обрабатываемых РЛИ земной поверхности площадью по 80МПкс с перекрытием около 10%. С помощью алгоритма поиска опорных точек было получено 10490 опорных точек в области перекрытия. Время работы тестируемого алгоритма поиска ориентации перекрывающихся РЛИ составило 44 мс. Результаты работы представлены на рисунке В.2.

На рисунке В.3 показаны два других РЛИ земной поверхности меньшей площади с перекрытием около 50%. Алгоритм поиска опорных точек предоставил 1121 опорную точку. Время работы тестируемого алгоритма поиска ориентации для указанных РЛИ земной поверхности составило 7 мс. Наложение преобразованных согласно найденной ориентации РЛИ представлено на рисунке В.4.

Стоит отметить, что в обоих случаях визуальных расхождений на РЛИ после наложения замечено не было – одни и те же участки местности на обоих РЛИ наложились друг на друга корректно.

### 3.1.4 Уточнение ориентации базового РЛИ

Моделирование алгоритма уточнения ориентации базового РЛИ происходило с помощью его реализации в виде компьютерной программы, написанной на языке программирования C++ с использованием библиотек Qt.

В ходе моделирования эмпирическим путем были подобраны следующие значения констант:  $q_\lambda = 1,1$ ;  $l_{max} = 1000$ ;  $\lambda_0 = \eta = 10^{-6}$ .

На рисунке 3.7 представлены два примера работы моделируемого алгоритма, где областями с черным и серым контурами обозначены ранее описанные (см. подраздел 2.3.7) РЛИ  $I_1$  (базовое) и  $I_2$  соответственно, трансформированные в единую СК. На рисунках 3.7, а и в видно, что до уточнения РЛИ  $I_2$  некорректно трансформировано вследствие неверной ориентации, что привело к созданию изображения бесконечных размеров.

Как показано на рисунках 3.7, б и г, моделируемый алгоритм произвел коррекцию ориентации базового РЛИ  $I_1$  таким образом, чтобы избежать некорректной трансформации РЛИ  $I_2$ .

В рассматриваемом случае с двумя РЛИ земной поверхности данную коррекцию сложно назвать уточнением, так как вариантов ориентации базового РЛИ  $I_1$ , при которых РЛИ  $I_2$  будет трансформировано не в бесконечное

изображение, довольно много. Однако, при большом количестве разноракурсных РЛИ земной поверхности в графе связности диапазон значений параметров матрицы ориентации базового РЛИ  $h_B$  и  $g_B$ , при которых все сшиваемые РЛИ будут трансформированы корректно, довольно узок и с увеличением количества РЛИ сходится к искомым точным значениям. В этой связи применения моделируемого алгоритма уточнения в данном случае позволит значительно минимизировать функционал второго критерия оптимальности (23).

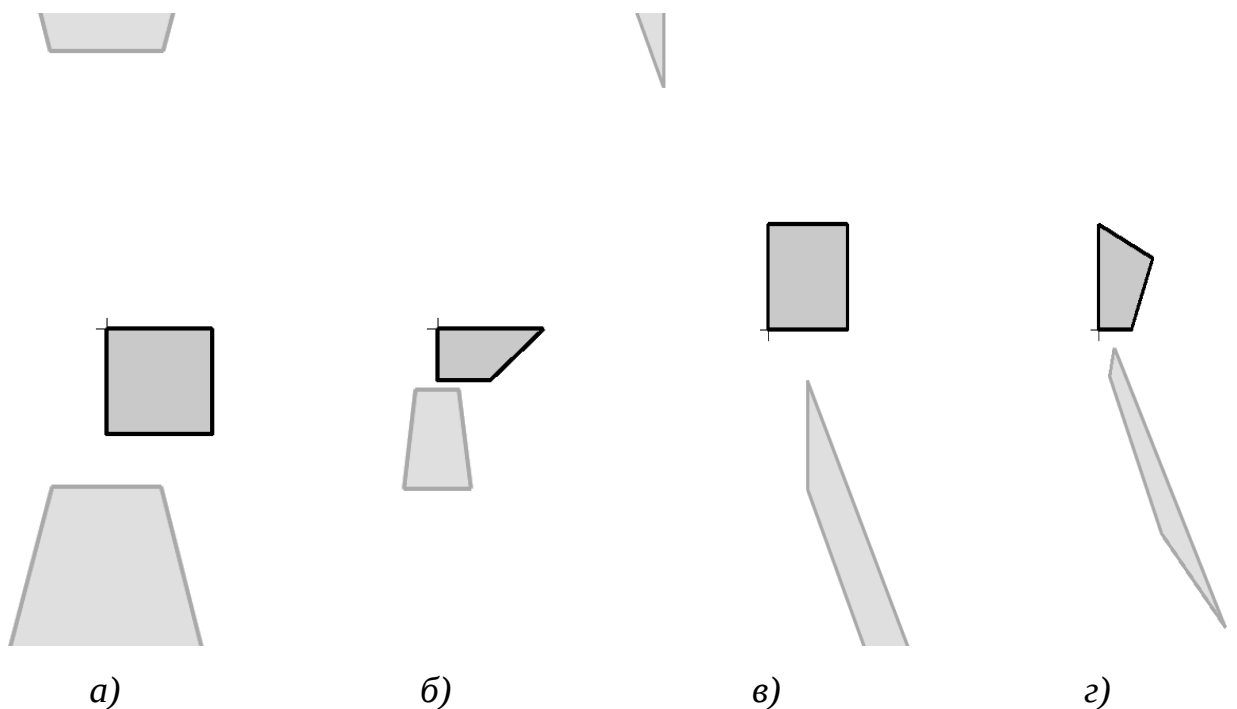


Рисунок 3.7 – Области спроецированных на плоскость единой СК РЛИ  $I_1$  (черный контур) и  $I_2$  (серый контур) до (а и в) и после (б и г) уточнения ориентации базового РЛИ ( $I_1$ ) при больших отрицательных значениях  $h_{21}$  (а и б) и  $g_{21}$  (в и г)

Время работы алгоритма уточнения ориентации базового РЛИ для двух перекрывающихся РЛИ зависит от их взаимной ориентации – значений элементов матрицы  $M_{21}$  – и колеблется в диапазоне 40-80 мкс, при этом количество итераций метода градиентного спуска не превышает 4. При большем количестве РЛИ земной поверхности в графе связности затрачиваемое время увеличивается линейно (рисунок 3.8).

Из-за особенностей хранения (и, как следствие, сравнения) дробных чисел с плавающей точкой в большинстве современных ЭВМ рекомендуется условие выхода 1 (см. подраздел 2.3.7)  $Es(g'_B, h'_B)=0$  заменить на  $Es(g'_B, h'_B)<\xi$ , где  $\xi=10^{-6}$ . В силу аналогичных причин целесообразно для линии фиктивного горизонта вместо (62) принять:

$$\exists x, y \in I_2: t \rightarrow \zeta \Rightarrow u \rightarrow \infty, v \rightarrow \infty, \text{ где } \zeta = 10^{-4}, \quad (68)$$

с соответствующими поправками во всех последующих сравнениях величины  $t$  в (63) и (65).

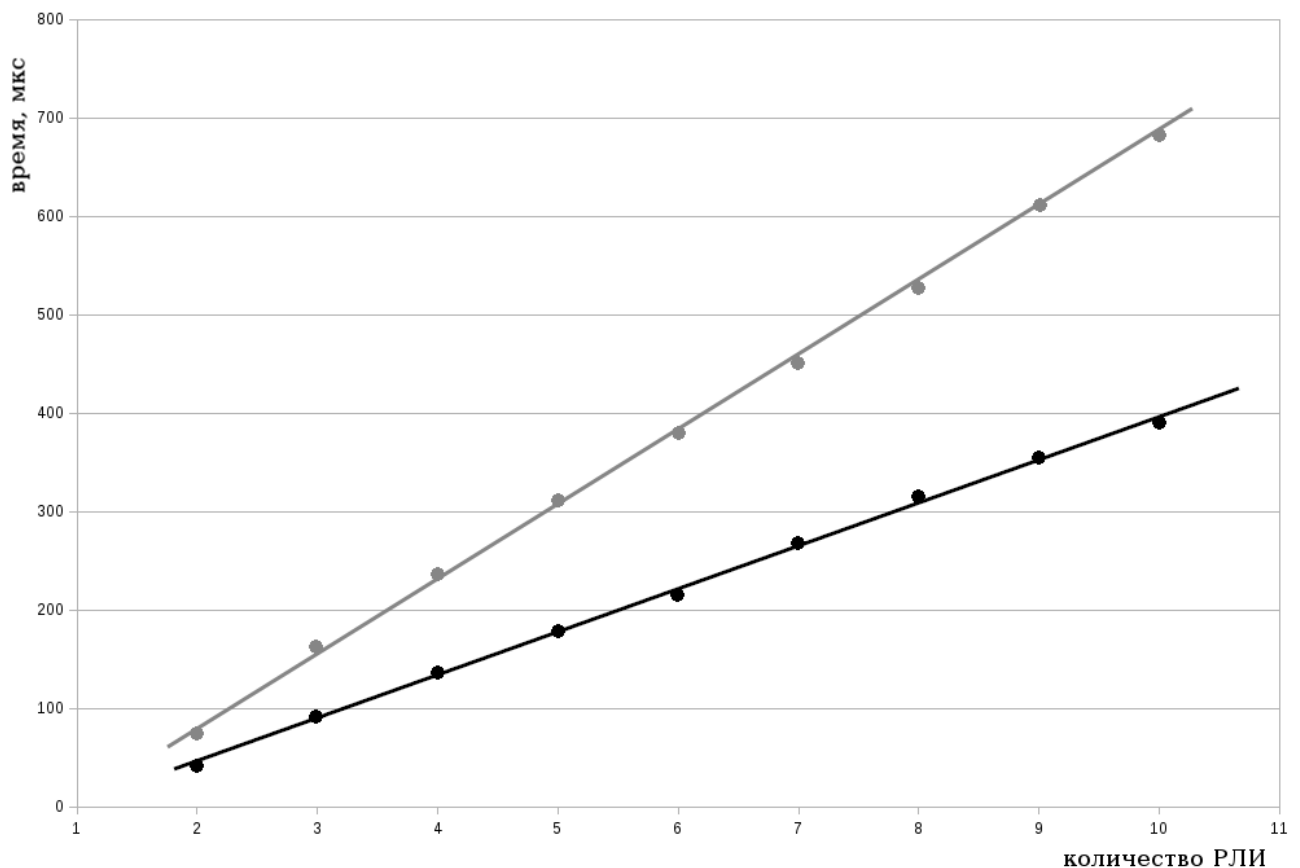


Рисунок 3.8 – Максимальное (обозначено серым) и минимальное (обозначено черным) время работы алгоритма уточнения ориентации базового РЛИ в зависимости от количества обрабатываемых РЛИ

### **3.2 Предложения по формату хранения единой многослойной радиолокационной карты**

Сшивка множества РЛИ земной поверхности большого разрешения в одно изображение единой радиолокационной карты на практике является нецелесообразным. Для просмотра или редактирования такого однослойного изображения колоссальных размеров необходимо затратить огромный объем ОЗУ. Кроме того, в данном случае теряется возможность совместного анализа местности, попавшей на несколько РЛИ (только одно РЛИ данной местности будет видно на едином изображении после наложения).

Другой способ хранения результатов сшивки предполагает отдельное хранение каждого трансформированного РЛИ земной поверхности в совокупности с файлом привязки, который содержит информацию об ориентации данного трансформированного РЛИ. Просмотр многослойной единой радиолокационной карты при этом осуществляется с помощью географической информационной (геоинформационной) системы (ГИС), которая «на лету» формирует видимый фрагмент сшивки путем наложения отдельных трансформированных РЛИ согласно файлам привязки. Большинство ГИС поддерживают возможность исключения того или иного слоя – РЛИ земной поверхности – из видимого фрагмента единой радиолокационной карты, позволяя проводить совместный анализ изображений местности, попавшей на несколько РЛИ.

Трансформированное РЛИ земной поверхности может иметь прямоугольную форму, поэтому для ее успешного описания и исключения проблем при наложении в ГИС формат хранения изображения должен поддерживать  $\alpha$ -канал (канал прозрачности). Примером таких форматов являются PNG и TIFF.

В качестве файла привязки рекомендуется использовать мировой файл (в литературе часто встречается зарубежное наименование world-file) – текстовый файл, состоящий из 6 величин, разделенных переносом строки в следующем

порядке: A, D, B, E, C, F. Данные параметры связывают СК изображения  $(x, y)$  с заранее определенной плоской географической СК  $(x_g, y_g)$  следующим аффинным преобразованием:

$$\begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & C \\ D & E & F \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (69)$$

где C и F – координаты левого верхнего пикселя трансформированного РЛИ земной поверхности в плоской географической СК, а параметры A, B, C и D задают изменение масштаба и поворот вокруг точки (C, F). Используемая плоская географическая СК в файле не задается. В нашем случае в качестве такой СК используется СК единой радиолокационной карты. Привязку изображения с помощью мирового файла поддерживают большинство существующих ГИС.

Для оптимальной визуализации единой радиолокационной карты при изменении масштаба отображения необходимо использовать растровые пирамиды – набор заранее построенных копий трансформированных РЛИ земной поверхности различного масштаба. Данный прием позволяет значительно уменьшить время масштабирования единой радиолокационной карты для просмотра в ГИС. Для построения растровых пирамид можно применять пакет программ GDAL.

Таким образом, каждый трансформированный РЛИ земной поверхности из полученной единой радиолокационной карты описывается тремя файлами: непосредственно само трансформированное РЛИ (.png), файл привязки (.pgw) и архив растровых пирамид данного РЛИ (.ovr).

### **3.3 Моделирование алгоритма автоматической сшивки радиолокационных изображений**

Моделирование алгоритма автоматической сшивки РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования происходило

с помощью его реализации в виде компьютерной программы, написанной на языке программирования C++ с использованием библиотек STL, gdal и OpenCV.

Полученная компьютерная программа имеет консольный интерфейс. Небольшое количество доступных опций позволяет провести оптимальную настройку для конкретной используемой ЭВМ. Перечень опций настройки, а также внешний вид работы различных этапов программы представлены в приложении Г.

В рамках тестирования полученного алгоритма была проведена сшивка десяти РЛИ земной поверхности с разрешением 2,5 метра района местности вблизи города Анкоридж, США. Набор входных РЛИ земной поверхности представлен на рисунках Д.1 - Д.10. Расположение на местности указанных РЛИ представлено на рисунке Д.11. Количество найденных точек интереса на обрабатываемых РЛИ приведено в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Количество найденных точек интереса модернизированного алгоритма SURF на обрабатываемых РЛИ земной поверхности

Изображение	Размер (пкс x пкс)	Количество точек интереса
I <sub>1</sub> (рисунок Д.1)	6172 x 11754	279681
I <sub>2</sub> (рисунок Д.2)	6296 x 11778	166875
I <sub>3</sub> (рисунок Д.3)	6256 x 11760	195854
I <sub>4</sub> (рисунок Д.4)	6214 x 11742	166010
I <sub>5</sub> (рисунок Д.5)	6174 x 11726	189526
I <sub>6</sub> (рисунок Д.6)	6254 x 11774	233458
I <sub>7</sub> (рисунок Д.7)	6212 x 11758	268072
I <sub>8</sub> (рисунок Д.8)	6174 x 11740	264413
I <sub>9</sub> (рисунок Д.9)	6130 x 11724	315073
I <sub>10</sub> (рисунок Д.10)	6212 x 11772	276708

Несмотря на малые области перекрытия (<7%), успешно были найдены опорные точки и вычислена взаимная ориентация между большинством

перекрывающихся РЛИ. Результаты данного этапа обработки представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Количество опорных точек между обрабатываемыми РЛИ земной поверхности

–	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>6</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>9</sub>	I <sub>10</sub>
I <sub>1</sub>	–	2	2	5	2	1	676	387	0	2016
I <sub>2</sub>	2	–	2694	1	0	265	2	1	1	0
I <sub>3</sub>	2	2694	–	997	2	240	132	4	3	7
I <sub>4</sub>	5	1	997	–	3635	2	114	154	2	7
I <sub>5</sub>	2	0	2	3635	–	5	0	446	199	1
I <sub>6</sub>	1	265	240	2	5	–	1963	2	2	111
I <sub>7</sub>	676	2	132	114	0	1963	–	3840	5	116
I <sub>8</sub>	387	1	4	154	446	2	3840	–	1836	1
I <sub>9</sub>	0	1	3	2	199	2	5	1836	–	0
I <sub>10</sub>	2016	0	7	7	1	111	116	1	0	–

Представленные данные позволяют также оценить количество ошибочных опорных точек, найденных на РЛИ подобного размера. РЛИ без областей перекрытия (например, I<sub>1</sub> и I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub> и I<sub>10</sub>) имеют до 7-10 опорных точек, которые, очевидно, являются ошибочными. Для перекрывающихся РЛИ число ошибочных опорных точек имеет тот же порядок.

Обработка указанных РЛИ земной поверхности тестируемым алгоритмом заняла 11 минут и 2 секунды. Получившаяся единая радиолокационная карта представлена на рисунке Д.12. Погрешность полученной сшивки размером ~ 50x80 км составляет порядка 1-2 элементов разрешения (пикселей).

На рисунках Д.13 и Д.14 представлены перекрывающиеся РЛИ земной поверхности площадью около 1 МПкс каждый, полученные с помощью РСА «Компакт» в L- и УКВ-диапазонах соответственно. Несмотря на значительные различия между данными РЛИ одной и той же местности в силу использования



различных диапазонов длин волн, автоматически были найдены 22 опорные точки. Обработка указанных РЛИ земной поверхности заняла около 1,7 секунды. Результаты сшивки представлены на рисунке Д.15. Погрешность полученной единой многослойной радиолокационной карты не превышает 3 элементов разрешения (пикселей).

На рисунках Д.16 - Д.19 представлены перекрывающиеся искаженные фрагменты РЛИ земной поверхности района города Розенхайм площадью около 0,7МПкс каждый. Указанные фрагменты РЛИ подверглись как геометрическим, так и яркостным искажениям. Результаты работы алгоритма автоматической сшивки РЛИ земной поверхности представлены на рисунке Д.20. Погрешность полученной сшивки не превышает 1 элемента разрешения (пикселя).

Отдельно стоит упомянуть о пороговых значениях показателей насыщенности семантики при оценке пригодности обрабатываемых РЛИ земной поверхности для сшивки (см. подраздел 2.3.3). Точные величины пороговых значений подбираются эмпирически. Необходимым, но не достаточным условием является  $S_{ps} > 3 \times 10^{-7}$  (получена из оценки количества ошибочных и необходимых для определения ориентации опорных точек на единицу площади). Хорошую стабильность сшивки показывают РЛИ земной поверхности,  $S_m$  которых в большинстве узлов сетки превышает 10. При этом шаг сетки должен составлять 1/8 линейного размера изображения.

Стоит отметить, что количество найденных уникальных точек модернизированного алгоритма SURF прямо пропорционально площади обрабатываемого РЛИ (при одном и том же характере семантики). В этой связи РЛИ большого разрешения стабильно сшиваются даже при малой области перекрытия, так как количество опорных точек в ней достаточно велико (что следует из большого количества уникальных точек). Чем меньше РЛИ земной поверхности, тем большая область перекрытия необходима для успешной сшивки.

В связи с тем, что многие этапы обработки РЛИ в рамках разработанного алгоритма автоматической сшивки РЛИ земной поверхности содержат огромное

количество независимых вычислений, время работы полученного алгоритма может быть значительно сокращено при использовании параллельных вычислительных систем (например, на базе вычислительных кластеров, технологий CUDA, OpenCL или массивов вычислительных ядер NeuroMatrix Core 3) [110].

### 3.4 Влияние высотных объектов и рельефа местности на точность сшивки

Возвышение отдельных объектов над подстилающей поверхностью или изменение высот местности приводят к смещению отметок по горизонтальной дальности (см. подраздел 2.2). Не имея высокоточной привязки к местности, устранить подобные искажения невозможно. Величину смещения отметки по горизонтальной дальности можно оценить по формуле [2, 107]:

$$\Delta y_p = -y + \sqrt{(y^2 - 2H\Delta h + \Delta h^2)}, \quad (70)$$

где  $y$  – горизонтальная дальность,  $H$  – высота полета РЛС, а  $\Delta h$  – превышение участка местности или высотного объекта над подстилающей поверхностью.

Перепады высот при съемке местности с разных ракурсов и высот полета приводят к различным смещениям относительно подстилающей поверхности для одного и того же участка местности. Попадание опорной точки на подобные высотные объекты или возвышенные участки местности может привести к ошибочному определению взаимной ориентации между перекрывающимися РЛИ земной поверхности при сшивке.

Благодаря использованию М-оценок при вычислении ориентации РЛИ (см. подраздел 2.3.5), высотные объекты локального характера (небольшой холм или углубление, одиночные постройки или небольшие (в масштабах кадра РЛИ) группы построек) не вносят ошибок в определение параметров проективного преобразования искомой взаимной ориентации между обрабатываемыми РЛИ.

Опорные точки, найденные на таких объектах, не вписываются в общую картину преобразования, поэтому к окончанию работы алгоритма поиска ориентации имеют значения весового коэффициента (55) близкие к нулю.

Небольшие случайные изменения высот местности в результате работы алгоритма определения ориентации РЛИ (см. подраздел 2.3.5) аппроксимируются плоскостью с высотой, равной средней высоте видимого на РЛИ участка местности, поэтому не вносят значительных погрешностей в сшивку РЛИ.

Значительные погрешности определения ориентации перекрывающихся РЛИ будут наблюдаться при резких и глобальных изменениях высот местности в районе съемки. Примером могут служить РЛИ горных массивов. Эффекты радиотени и наложения в таких случаях приведут к тому, что при съемке с различных ракурсов видимые участки местности будут отличаться. В этой связи количество найденных опорных точек будет малым, причем большинство из них будут расположены на вершинах высотных объектов (которые видны практически с любого ракурса). Различные смещения таких опорных точек относительно подстилающей поверхности при съемке с разных ракурсов приведут к некорректному определению ориентации и, как следствие, к большим погрешностям сшивки.

Для численной оценки указанных погрешностей рассмотрим два случая глобального перепада высот:

1. возвышенное плато (рисунок 3.9, а);
2. горный массив (рисунок 3.9, б).

Предположим, что два рассматриваемых РЛИ имеют перекрытие 50% (дальняя от носителя РЛС часть кадра), были получены с противоположных ракурсов (наихудших случай), но при равной высоте съемки. В области перекрытия случайным образом расположены 100000 опорных точек. В качестве показателей погрешности будем использовать относительную погрешность масштаба кадра РЛИ по горизонтальной дальности  $E_{My}$  и абсолютную

погрешность коэффициента параллельного переноса по горизонтальной дальности  $\Delta f$  (37).

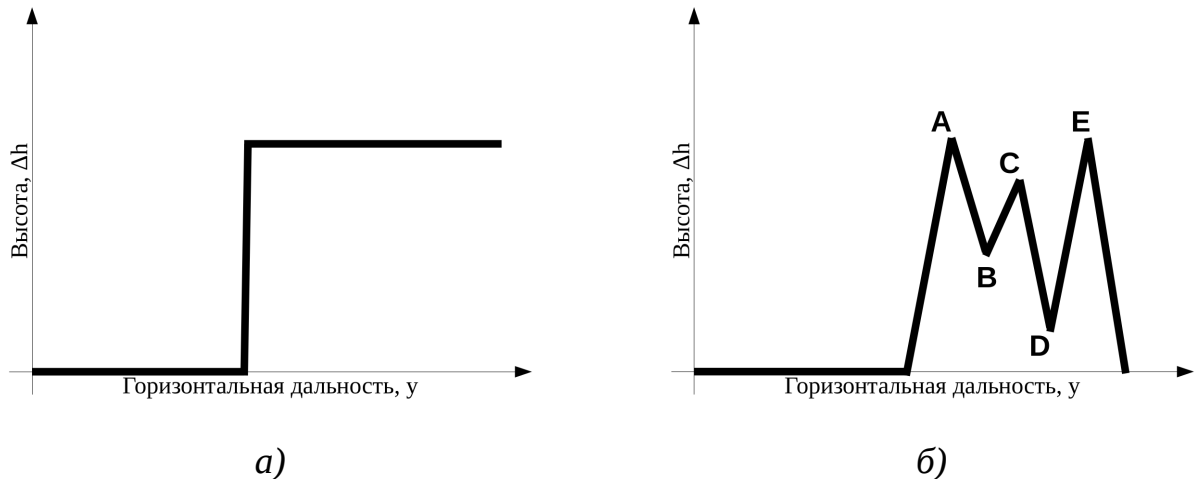


Рисунок 3.9 – Модели перепада высот при съемке возвышенного плато (а) и горного массива (б)

В качестве РЛС будем рассматривать РСА «Штык» самолета Су-24МР и РСА космического базирования «Кондор-Э».

Полоса обзора местности РСА «Штык» составляет 24 км в ширину с выносом в 4 км от линии пути самолета-носителя при разрешении от 5 до 7,5 метров [3]. Пусть разрешение полученного РЛИ составляет 7,5 метров, тогда его размер по горизонтальной дальности составит 3200 элементов разрешения (пикселей). Приняв высоту полета самолета 1000 и 3000 метров, оценим величину погрешности определения ориентации в зависимости от высоты возвышенного плато для первого случая. В таблицах 3.5 и 3.6 представлены результаты моделирования для различных высот полета.

Аналогичное моделирование проведем для РСА космического базирования. Рассмотрим КА с РСА «Кондор-Э», работающий на высоте 500 км, при широкозахватном режиме работы с полосой съемки 120 км, выносом от линии пути 530 км и разрешением 8 м [1, 16]. Размер по горизонтальной дальности

полученного РЛИ в таком случае составит 15000 пикселей. В таблице 3.7 представлены результаты моделирования описанного случая.

Как видно из представленных результатов, для данного случая (возвышенное плато, рисунок 3.9, а) основная погрешность в искомой взаимной ориентации двух рассматриваемых РЛИ проявляется в некорректном смещении, при этом погрешность масштаба стремится к нулю.

Таблица 3.5 – Ошибки определения ориентации при наличии возвышенного плато в области перекрытия РЛИ при высоте полета 1000 м для РСА «Штык»

Превышение плато, м	25	50	100	200	400	600	800
$E_{My}, \times 10^{-4}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta f$ , пкс	-0,3	-0,6	-1,2	-2,3	-4,0	-5,3	-6,0

Таблица 3.6 – Ошибки определения ориентации при наличии возвышенного плато в области перекрытия РЛИ при высоте полета 3000 м для РСА «Штык»

Превышение плато, м	25	50	100	200	400	800	1600
$E_e, \times 10^{-4}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta f$ , пкс	-0,9	-1,9	-3,7	-7,3	-14,1	-26,0	-44,0

Таблица 3.7 – Ошибки определения ориентации при наличии возвышенного плато в области перекрытия РЛИ при высоте полета 500 км для РСА «Кондор-Э»

Превышение плато, м	25	50	100	200	400	800	1600
$E_e, \times 10^{-4}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta f$ , пкс	-5,1	-10,2	-20,3	-40,6	-81,2	-162,4	-324,5

В случае горного массива (второй случай, рисунок 3.9, б) огромную роль играет характер перепада высот. Для примера положим, что высоты точек, отмеченных на рисунке 3.9, б, имеют следующие значения:  $H_A = dH$ ,  $H_B = 0,5dH$ ,  $H_C = 0,8dH$ ,  $H_D = 0,2dH$ ,  $H_E = 1,2dH$ . Условия радиовидимости отдельных участков рельефа не учитываем.

Результаты аналогичного моделирования для случая описанного горного массива показали, что при различных расположениях опорных точек в области перекрытия алгоритм поиска взаимной ориентации сходится к различным наборам коэффициентов проективного преобразования, при этом разброс их возможных значений увеличивается с увеличением величины  $dH$ . При  $dH > 100-200$  метров для рассматриваемых высот полета и типов РЛС разброс значительно возрастает, для  $\Delta f$  составляет десятки пикселей, для  $E_{Mu}$  – единицы  $10^{-3}$ .

В этой связи необходимо наложить ограничение на характер местности обрабатываемых РЛИ земной поверхности. Формирование единой радиолокационной карты с помощью разработанного алгоритма рекомендуется проводить для РЛИ равнинной или холмистой местности [111] с перепадом высот в пределах одного кадра РЛИ менее 50 м.

### **3.5 Влияние кривизны земной поверхности на точность сшивки**

Кривизна земной поверхности на результатах алгоритма сшивки РЛИ земной поверхности проявляется в виде трех типов искажений:

- 1) ошибки взаимной ориентации РЛИ из-за неточного описания проективным преобразованием;
- 2) искажения из-за ошибок на этапе формирования РЛИ земной поверхности;
- 3) искажения из-за проецирования на плоскость единой радиолокационной карты.

Влияние кривизны Земли проявляется через изменение превышения и по сути аналогично влиянию рельефа местности, однако имеет систематический, глобальный характер [107]. Ошибка по горизонтальной дальности на одном РЛИ земной поверхности, вызванная кривизной земной поверхности, оценивается выражением [2, 77]:

$$\Delta y_K \approx \frac{y^2 \sin \beta}{2R_3}, \quad (71)$$

где  $y$  – горизонтальная дальность,  $\beta$  – угол падения радиоволн, а  $R_3$  – радиус Земли (~6371 км).

Искажения первого типа объясняются тем, что смещения подобного плана не описываются проективным преобразованием. В этой связи при удалении от базового РЛИ будет иметь место накопление ошибки ориентации каждого обрабатываемого РЛИ земной поверхности в виде некорректного сдвига в сторону удаления от базового РЛИ и уменьшения масштаба.

Как и в подразделе 3.4, в качестве РЛС будем рассматривать РСА «Штык» самолета Су-24МР [3] и РСА космического базирования «Кондор-Э» [1, 16].

Предположим, что съемка местности проводилась галсами с перекрытием близким к 50%, при этом было получено  $N$  РЛИ земной поверхности, из которых в процессе сшивки базовым было выбрано  $I_1$  (см. рисунок 3.10).

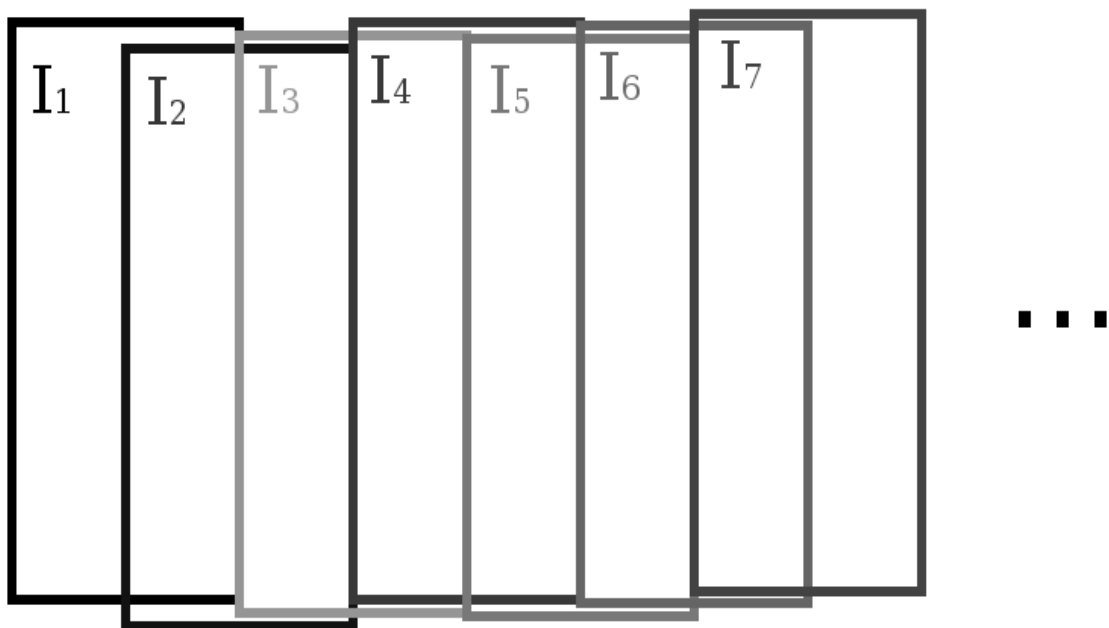


Рисунок 3.10 – Взаимное расположение РЛИ земной поверхности при съемке галсами с перекрытием близким к 50%.

Приняв высоту полета самолета 1000 и 3000 метров, оценим величину искажений первого типа для описываемого случая в зависимости от  $N$ . В качестве показателей погрешности будем использовать относительные погрешности положения точки на РЛИ  $E_y$  и масштаба кадра РЛИ  $E_{My}$  по горизонтальной дальности. В таблицах 3.8 и 3.9 представлены результаты моделирования описанного случая для различных высот полета.

Таблица 3.8 – Ошибки от искажений первого типа при высоте полета 1000 м для РСА «Штык»

$N$		2	5	10	20	40	80
Размер сшивки, км		36	72	132	252	492	972
$E_y, \times 10^{-5}$							
	минимальная	2,63	5,30	6,61	7,59	8,79	11,57
	максимальная	2,64	5,33	6,65	7,65	8,88	11,70
$E_{My}, \times 10^{-5}$		0,1	0,2	0,4	0,9	1,7	3,4

Таблица 3.9 – Ошибки от искажений первого типа при высоте полета 3000 м для РСА «Штык»

$N$		2	5	10	20	40	80
Размер сшивки, км		36	72	132	252	492	972
$E_y, \times 10^{-5}$							
	минимальная	8,1	17,1	22,78	29,94	44,59	84,73
	максимальная	8,4	17,6	23,53	30,91	45,92	86,71
$E_{My}, \times 10^{-5}$		1,6	3,9	7,9	15,7	31,5	62,8

Аналогичное моделирование проведем для РСА космического базирования «Кондор-Э» с параметрами съемки, описанными в подразделе 3.4. В таблице 3.10 представлены результаты моделирования описанного случая.



Таблица 3.10 – Ошибки от искажений первого типа при высоте полета 500 км для РСА «Кондор-Э»

$N$	2	5	8	11	14	17	
Размер сшивки, км	180	360	540	720	900	1080	
$E_y, \times 10^{-2}$	минимальная	1,39	2,74	3,12	3,25	3,26	3,20
	максимальная	1,41	2,78	3,17	3,31	3,33	3,28
$E_{My}, \times 10^{-3}$	0,83	2,10	3,33	4,60	5,87	7,00	

Более существенны ошибки от искажений второго типа, полностью описываемые с помощью (71). Данные искажения проявляются в виде некорректного сдвига в сторону базового РЛИ и значительного уменьшения масштаба. В таблицах 3.11 — 3.13 приведены результаты оценки искажений данного типа для описанных ранее случаев.

Как видно из представленных результатов, ошибки от искажений второго типа при больших размерах сшивки или больших высотах полета носят катастрофических характер, в то время как ошибками от искажений первого типа для самолетных РСА можно пренебречь.

Таблица 3.11 – Ошибки от искажений второго типа при высоте полета 1000 м для РСА «Штык»

$N$	2	5	10	20	40	80	
Размер сшивки, км	36	72	132	252	492	972	
$E_y, \times 10^{-4}$	минимальная	0,26	1,31	3,21	7,10	14,93	30,57
	максимальная	0,52	1,83	3,86	7,81	15,67	31,33
$E_{My}, \times 10^{-3}$	0,16	0,39	0,79	1,57	3,14	6,27	

Таблица 3.12 – Ошибки от искажений второго типа при высоте полета 3000 м для РСА «Штык»

$N$	2	5	10	20	40	80	
Размер сшивки, км	36	72	132	252	492	972	
$E_y, \times 10^{-4}$	минимальная	0,79	3,96	9,71	21,44	44,95	91,65
	максимальная	1,58	5,54	11,65	23,58	47,19	93,93
$E_{My}, \times 10^{-3}$	0,48	1,19	2,37	4,74	9,46	18,84	

Таблица 3.13 – Ошибки от искажений второго типа при высоте полета 500 км для РСА «Кондор-Э»

$N$	2	5	8	11	14	17	
Размер сшивки, км	180	360	540	720	900	1080	
$E_y, \times 10^{-2}$	минимальная	1,36	6,54	11,75	16,65	21,23	25,48
	максимальная	2,72	9,11	14,57	19,51	24,04	28,21
$E_{My}, \times 10^{-2}$	7,98	18,76	28,28	36,66	44,05	50,56	

Благодаря систематическому характеру ошибок кривизны земной поверхности, при формировании РЛИ в современных РСА (особенно космического базирования) проводится соответствующая коррекция, которая приближает к нулю рассматриваемые искажения первого и второго типов.

К сожалению, искажения третьего типа в рамках рассматриваемого алгоритма сшивки РЛИ земной поверхности неустранимы, что накладывает некоторые ограничения на размеры получаемой единой радиолокационной карты. Связано это с тем, что плоскость земной поверхности, к которой стремится плоскость единой радиолокационной карты, качественно не совпадает с самой земной поверхностью из-за сферического характера последней. Более точной формой Земли является геоид, однако для упрощения будем считать ее шаром, а форму ее поверхности – сферой. Каждый рассматриваемый кадр РЛИ земной поверхности фактически

отображает сферический четырехугольник местности на земной сфере в плоский прямоугольник с сохранением расстояний между объектами. Данное утверждение верно для кадра РЛИ, размеры которого составляют не более 100-200 километров. Как правило, этим условиям удовлетворяют большинство получаемых кадров РЛИ земной поверхности высокого разрешения. Для РЛИ большего размера выбранная проекция задается на этапе формирования.

В этой связи получаемая единая радиолокационная карта будет подобием косоугольной равнопромежуточной азимутальной картографической проекции [112] с полюсом (точкой соприкосновения земной сферы с плоскостью, на которую происходит проецирование), расположенным в центре базового РЛИ. Отличие состоит в том, что вместо постепенного увеличения тангенциального масштаба при удалении от полюса будут наблюдаться увеличивающиеся «нестыковки» и пробелы между некоторыми сшиваемыми РЛИ земной поверхности, при этом фактический тангенциальный масштаб на самих РЛИ в составе сшивки останется постоянным.

Для численной оценки искажений третьего типа рассмотрим рисунок 3.11. Пусть точка  $O$  – центр базисного РЛИ (полюс проекции), а точки на местности  $A$  и  $B$  равноудалены от точки  $O$ , при этом угол  $\alpha$  известен. Описанные «нестыковки» между сшиваемыми РЛИ земной поверхностью обуславливаются различными значениями длины кривой  $AB$  – кратчайшего расстояния между  $A$  и  $B$  – на плоскости единой радиолокационной карты и реальной местности – сфере земной поверхности.

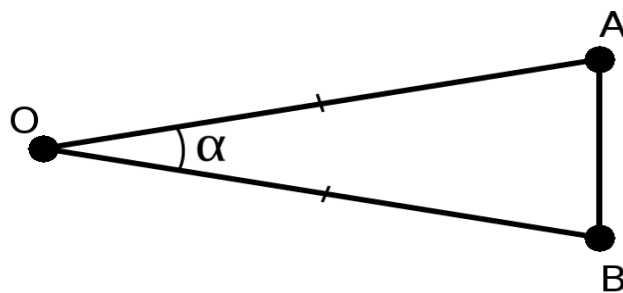


Рисунок 3.11 – Две точки на местности  $A$  и  $B$ , равноудаленные от  $O$  – центра базового РЛИ

Кратчайшая кривая АВ на плоскости единой радиолокационной карты является прямой и определяется теоремой косинусов:

$$AB = \sqrt{AO^2 + BO^2 - 2 \cdot AO \cdot BO \cdot \cos \alpha}, \quad (72)$$

в то время как на сфере является ортодромией и определяется сферической теоремой косинусов [113]:

$$AB = R_3 \cdot \arccos(\cos(\angle AO) \cdot \cos(\angle BO) + \sin(\angle AO) \cdot \sin(\angle BO) \cdot \cos \alpha), \quad (73)$$

$$\angle AO = \frac{AO}{R_3}, \quad \angle BO = \frac{BO}{R_3}, \quad (74)$$

где  $R_3$  – радиус Земли (~6371 км).

В приложении Е представлены зависимости полученных значений абсолютной и относительной ошибок определения длины АВ от расстояния до полюса (АО) при некоторых значениях угла  $\alpha$ , полученные с помощью (72) и (73).

На рисунке 3.12 представлена максимальная возможная абсолютная ошибка определения кратчайшего расстояния АВ по полученной сшивке, обуславливающая искажения третьего типа.

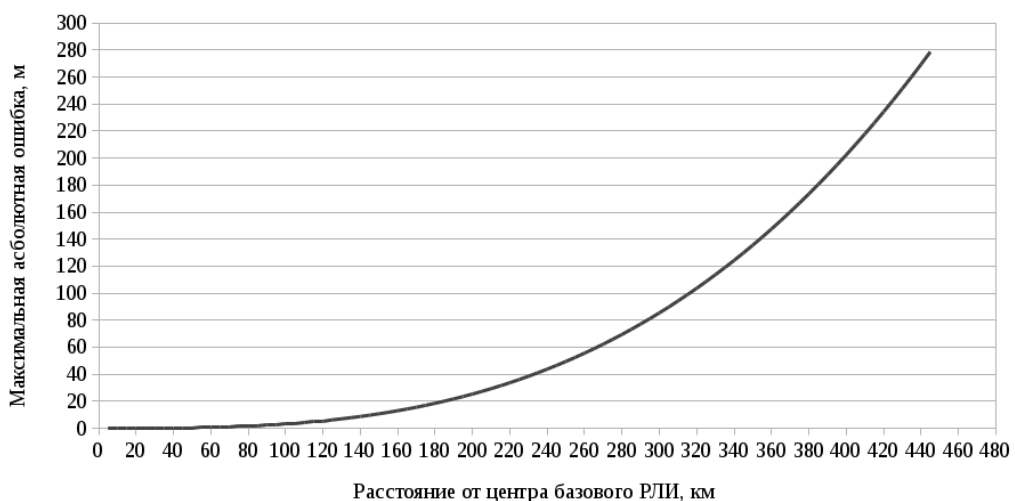


Рисунок 3.12 – Максимальная абсолютная погрешность определения кратчайшего расстояния АВ по единой радиолокационной карте для различных значений длины АО при величине угла  $\alpha \sim 71^\circ$

Как показано на рисунке 3.12, при требуемой точности алгоритма в 50 м расстояние от центра базисного РЛИ земной поверхности до самого удаленного изображения должно составлять не более 250 км. Таким образом, при выборе базисным такого РЛИ, центр которого расположен ближе всего к геометрическому центру полученной единой радиолокационной карты, получаем ограничение на ее размер  $\sim 400 \times 400$  км.

### Выводы по главе 3

1. Разработанные показатели насыщенности семантики изображения  $S$ ,  $S_{ps}$  и матричного  $S_m$ , являясь устойчивыми к шуму, позволяют локализовать области интереса на РЛИ земной поверхности, а также судить о пригодности изображения к сшивке.
2. Модернизированный алгоритм SURF позволяет увеличить в среднем на 40% минимальное количество найденных опорных точек на перекрывающихся РЛИ земной поверхности. При этом время работы алгоритма увеличилось на  $\sim 5,5\%$ , а затрачиваемый объем ОЗУ остался неизменным.
3. Полученный итеративный алгоритм поиска ориентации двух перекрывающихся РЛИ с помощью метода наименьших квадратов с М-оценками позволяет определить параметры искомого преобразования с заданной точностью, устойчив к наличию ошибочных опорных точек (до 10-15% от общего количества опорных точек).
4. Разработанный алгоритм уточнения ориентации базового РЛИ позволяет избежать некорректных проекций обрабатываемых РЛИ на плоскость единой СК, при большом количестве разноракурсных РЛИ способствует минимизации функционала второго критерия оптимальности.
5. Разработанный алгоритм автоматической сшивки РЛИ земной поверхности позволяет за приемлемое время из набора перекрывающихся РЛИ земной

поверхности (в том числе, полученных в различных диапазонах длин волн) получить единую многослойную радиолокационную карту с точностью порядка нескольких элементов разрешения. Выбранный формат хранения результатов сшивки способствует эффективной их обработке с помощью ГИС.

6. Возвышенности рельефа или высотные объекты локального характера не влияют на точностью сшивки, в то время как глобальные перепады высот, например, при обработке РЛИ горного массива, способствуют непредсказуемым погрешностям. В этой связи рекомендуется проводить сшивку РЛИ равнинной или холмистой местности с перепадом высот менее 50 м в пределах кадра РЛИ.
7. Разработанный алгоритм автоматической сшивки РЛИ земной поверхности не учитывает искажения, вызванные кривизной земной поверхности. В этой связи при требуемой точности сшивки в 50 м расстояние от базисного изображения до самого удаленного РЛИ получаемой единой радиолокационной карты должно составлять не более 250 км.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной диссертационной работе проведены разработка и исследование алгоритмов автоматической сшивки РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования и получены следующие основные результаты:

1. Существующие алгоритмы и программные комплексы обработки изображений не позволяют проводить автоматическую сшивку РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования. Кроме того, в настоящее время не существует алгоритма, способного проводить объективную оценку насыщенности семантики РЛИ
2. Разработана модификация алгоритма SURF, позволяющая увеличить в среднем на 40% минимальное количество найденных опорных точек на РЛИ земной поверхности с перекрытием при увеличении времени работы на ~5,5%.
3. На основе модифицированного алгоритма SURF и алгоритма поиска ближайшего соседа с разбиением в kd-дерево разработан алгоритм автоматического поиска опорных точек на перекрывающихся РЛИ земной поверхности. Используемый алгоритм поиска ближайшего соседа позволяет решать задачу сопоставления дескрипторов точек интереса для двух РЛИ земной поверхности размером 80МПкс в 150-170 раз быстрее чем алгоритм полного перебора. Продолжительность поиска опорных точек двух перекрывающихся РЛИ земной поверхности в зависимости от их площади можно оценить, как  $\sim 0,8$ МПкс/с.
4. Разработан алгоритм определения количественной оценки насыщенности семантики РЛИ земной поверхности, устойчивый к шуму на изображении. Полученные с помощью него показатели насыщенности семантики изображения  $S$ ,  $S_{ps}$  и  $S_m$  позволяют формализовать требования к РЛИ на предмет пригодности изображений к сшивке. Продолжительность работы

алгоритма в зависимости от площади обрабатываемого РЛИ можно оценить, как  $\sim 25,8$ МПкс/с.

5. Разработан итеративный алгоритм вычисления взаимной ориентации двух РЛИ земной поверхности на основе набора опорных точек, устойчивый к наличию ошибочных опорных точек (до 10-15% от общего количества), минимизирующий функционал первого критерия оптимальности. В зависимости от количества итераций время работы данного алгоритма составляет от  $\sim 2$  мс до 172 мс для набора из 10000 корректных и 1000 ошибочных опорных точек.
6. Разработан итеративный алгоритм уточнения ориентации базового РЛИ земной поверхности, позволяющий избежать некорректных преобразований обрабатываемых РЛИ, а также приближающий плоскость получаемой единой радиолокационной карты к плоскости земной поверхности, что способствует минимизации функционала второго критерия оптимальности.
7. Получен и реализован квазиоптимальный алгоритм автоматической сшивки РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования. В рамках моделирования разработанного алгоритма успешно была получена сшивка РЛИ земной поверхности с различными геометрическими и яркостными искажениями, а также полученными в различных диапазонах длин волн. Формирование единой радиолокационной карты из 10 РЛИ земной поверхности площадью около 80МПкс каждое заняло 662 секунды, при этом точность полученной сшивки составила 1-2 элементов разрешения.
8. Хранение полученной единой радиолокационной карты целесообразно в виде отдельных трансформированных РЛИ с файлами привязки и заранее сформированным архивом растровых пирамид. Данный подход позволяет повысить эффективность дешифрирования и вторичной обработки полученной сшивки, а также снижает требования к задействованным ЭВМ.



9. Возвышенности рельефа или высотные объекты локального характера не влияют на точностью сшивки, в то время как глобальные перепады высот способствуют непредсказуемым погрешностям. В этой связи рекомендуется проводить сшивку РЛИ равнинной или холмистой местности с перепадом высот менее 50 м в пределах кадра РЛИ.
10. Кривизна земной поверхности снижает точность получаемой единой радиолокационной карты. При требуемой точности в 50 м расстояние от центра базисного РЛИ земной поверхности до самого удаленного изображения должно составлять не более 250 км, при этом максимально допустимый размер сшивки можно оценить в  $\sim 400 \times 400$  км.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении НИР «Перспектива - 500», а также внедрены в учебном процессе кафедры 401 Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

ГИС	–	Географическая информационная (геоинформационная) система
ДНА	–	Диаграмма направленности антенны
ИНС	–	Искусственная нейронная сеть
КА	–	Космический аппарат
КЭНС	–	Корреляционно-экстремальная навигационная система
ЛА	–	Летательный аппарат
ОЗУ	–	Оперативное запоминающее устройство
ОС	–	Операционная система
ПЗУ	–	Постоянное запоминающее устройство
РЛИ	–	Радиолокационное изображение
РЛС	–	Радиолокационная станция
РСА	–	Радиолокационная станция с синтезированием апертуры
СК	–	Система координат
СКО	–	Среднеквадратичное отклонение
ФА	–	Функция активации
ЭВМ	–	Электронно-вычислительная машина

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Верба, В.С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук. — М.: Радиотехника, 2010. — 680 с.
2. Школьный, Л.А. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учебник для курсантов ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского / Л.А. Школьный, Е.Ф. Толстов, А.Н. Детков, О.А. Карпов, А.М. Яковлев, М.П. Титов, А.А. Филатов, А.Н. Тонких, О.Е. Цветков, А.С. Архангельский. Под ред. Л.А. Школьного. — М.: изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. — 531 с.
3. Шунков, В.Н. Самолеты спецназначения / В.Н. Шунков. — Мн: Харвест, 1999. — 448 с.
4. Радиолокационные станции бокового обзора для пилотируемых и беспилотных ЛА [Электронный ресурс] // АО "НИИ "Кулон". 2015. URL: <http://www.niikulon.ru/product/003.php> (дата обращения: 29.11.2015).
5. Кирдяшкин, В.В. Автоматическое совмещение радиолокационных и эталонных изображений земной поверхности: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.12.14 / Кирдяшкин Владимир Владимирович. — Москва, 2011. — 202 с.
6. Внотченко, С.Л. Авиационные мобильные малогабаритные радиолокаторы с синтезированной апертурой семейства "Компакт" (принципы реализации и опыт применения) [Электронный ресурс] / С.Л. Внотченко, М.Ю. Достовалов, А.В. Дьяков, И.В. Дьяков, Р.В. Ермаков, Е.П. Жаровская, А.И. Коваленко, Т.Г. Мусинянц, Л.С. Нейман, В.В. Римап, В.Е. Суслов // Журнал радиоэлектроники, №10. 2009. URL: <http://jre.cplire.ru/mac/oct09/5/text.html> (дата обращения: 24.11.2015).
7. Внотченко, С.Л. Основные результаты зондирования земной и водной поверхности многочастотным радиолокационным комплексом радиолокаторов с

синтезированной апертурой "Компакт" / С.Л. Внотченко, М.Ю. Достовалов, Р. В. Ермаков, Т.Г. Мусинянц, Е.П. Севалкина // Вестник СибГАУ, №5(51). — 2013. — С. 35 - 38.

8. Внотченко, С.Л. Возможности создания широкозахватных радиолокаторов с синтезированной апертурой для малых космических аппаратов / С.Л. Внотченко, А.И. Коваленко, В.В. Римап, С.Н. Смирнов, А.В. Шишанов // Вопросы электромеханики, т. 134. — 2013. — С. 21 - 26.

9. Верба, В.С. Технологии Концерна "Вега" в интересах ТЭК / В.С. Верба, А.Т. Силкин, В.Ф. Кабанов // Сборник докладов первого московского международного форума "Беспилотные многоцелевые комплексы в интересах ТЭК". — 2007. — С. 115 - 134.

10. Авиационные системы контроля земной поверхности [Электронный ресурс] // Концерп радиостроения Вега. 2013. URL: <http://vega.su/production/detail.php?ID=16> (дата обращения: 30.11.2015).

11. Нейман, П.И. Особенности характеристик и применения авиационных РСА / П.И. Нейман // Геоматика, №3. — 2011. — С. 30 - 33.

12. Reigber, A. Multispectral, Polarimetric and Interferometric SAR Imaging with the F-SAR Airborne SAR Instrument / A. Reigber, M. Jager, R. Scheiber, P. Prats, R. Horn, A. Nottensteiner // Proceedings of the International Radar Symposium (IRS). — 2013. — pp. 1 - 4.

13. F-111 Upgrade Options Parts I - IV [Электронный ресурс] // Air Power Australia. 2014. URL: <http://www.ausairpower.net/TE-F-111-Upgrades-1998.html> (дата обращения: 03.12.2015).

14. Майстренко, Е.В. Синтезирование апертуры антенны при совместном прямолинейном и вращательном перемещении фазового центра реальной антенны: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.12.14 / Майстренко Евгений Владимирович. — Москва, 2013. — 184 с.

15. Нониашвили, М.И. Обзор современных радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования и анализ тенденций их

развития / М.И. Нониашвили, И.В. Крючков, Г.А. Лесников, С.И. Нефедов, А.Н. Семенов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". — 2012. — С. 94 - 114.

16. Неронский, Л.Б. Перспективы развития методов и систем радиолокационного наблюдения космического базирования [Электронный ресурс] / Л.Б. Неронский // Журнал радиоэлектроники, №11. 2011. URL: <http://jre.cplire.ru/iso/nov11/14/text.html> (дата обращения: 03.12.2015).

17. Proceedings of EUSAR 2014 / 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar. — Berlin, Germany, 03 - 05 June 2014. — 1436 p.

18. Шпенст, В. Радиолокационные станции дистанционного зондирования Земли / В. Шпенст // Компоненты и технологии, №3. — 2013. — С. 154 - 158.

19. Кондратенков, Г.С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Г.С. Кондратенков, А.Ю. Фролов. Под ред. Г.С. Кондратенкова. — М.: Радиотехника, 2005. — 368 с.

20. Кондратенков, Г.С. Авиационные системы радиовидения. Монография / В.Н. Антипов, А.Ю. Викентьев, Е.Е. Колтышев, Г.С. Кондратенков, А.А. Лавров, А.Ю. Фролов, В.Т. Янковский. Под ред. Г.С. Кондратенкова. — М.: Радиотехника, 2015. — 648 с.

21. Аксёнов, О.Ю. Совмещение изображений / О.Ю. Аксёнов // Цифровая обработка сигналов, №3. — 2005. — С. 51 - 55.

22. Ветров, А.Н. Совмещение инфракрасных и телевизионных изображений при медицинской диагностике / А.Н. Ветров, А.А. Осипова, М.А. Гахзар, А.В. Макарова, В.И. Романовский, Н.И. Беляев // Вестник тамбовского государственного технического университета, №3, том 20. — 2014. — С. 474 - 480.

23. Романов, А.А. Методика расчета взаимной ориентации радиолокационных изображений / А.А. Романов // 63 Научно-техническая конференция. Сборник трудов. Ч.5. Радиотехнические системы специального назначения и их программное обеспечение / Федеральное государственное

бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики». — 2014. — С. 49-52.

24. Hugin - Panorama photo stitcher [Электронный ресурс] // Hugin - Panorama photo stitcher. 2015. URL: <http://hugin.sourceforge.net/> (дата обращения: 24.08.2015).

25. Szeliski, R. Construction of panoramic image mosaics with global and local alignment / R. Szeliski, H. Y. Shum // International Journal of Computer Vision, No. 36. — 2000. — pp. 101-130.

26. Brown, M. Automatic panoramic image stitching using invariant features / M. Brown, D. Lowe // International Journal of Computer Vision, No. 74. — 2007. — pp. 59 - 73.

27. Wen-Yan Lin Smoothly Varying Affine Stitching / Wen-Yan Lin, Siying Liu, Y. Matsushita, Tian-Tsong Ng, Loong-Fah Cheong // IEEE on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). — June 2011. — pp. 345-352.

28. Dornaika, F. Mosaicking images with parallax / F. Dornaika, R. Chung // Signal Processing: Image Communication, No. 8. — September 2004. — pp. 771 - 786.

29. Ракурс :: Программное обеспечение :: ЦФС PHOTOMOD [Электронный ресурс] // Сайт компании "Ракурс". 2015. URL: <http://www.racurs.ru/?page=515> (дата обращения: 24.08.2015).

30. Программа фотограмметрической обработки Photoscan [Электронный ресурс] // GeoScan. 2015. URL: <http://geoscan.aero/ru/photoscan> (дата обращения: 24.08.2015).

31. Kulpa, K. Radar and optical images fusion using stripmap SAR data with multilook processing / K. Kulpa, M. Malanowski, J. Misiurewicz, P. Samczynski // International Journal of Electronics and Telecommunications, volume 57, issue 1. — March 2011. — pp. 37 - 42.

32. Виноградов, М. Возможности современных РЛС с синтезированием апертуры антенны / М. Виноградов // Зарубежное военное обозрение, №2. — 2009. — С. 52 - 56.

33. Кирдяшкин, В.В. Автоматическое совмещение радиолокационного изображения с оптическим изображением и цифровой картой местности / В.В. Кирдяшкин, Ю.Г. Сосулин // Успехи современной радиоэлектроники, №10. — 2010. — С. 59 - 71.

34. Елесина, С.И. Совмещение изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах. Монография / Под ред. Л.Н. Костяшкина, М.Б. Никифорова / С.И. Елесина, Л.Н. Костяшкин, А.А. Логинов, М.Б. Никифоров. — М.: Радиотехника, 2015. — 208 с.

35. Никольский, Д.Б. Уровни обработки радиолокационных данных / Д.Б. Никольский // Геоматика, №1. — 2008. — С. 25 - 36.

36. Никольский, Д.Б. Области применения радиолокационных данных / Д.Б. Никольский // Геоматика, №1. — 2008. — С. 47 - 50.

37. Никольский, Д.Б. Передовые направления в обработке и применении радиолокационных данных / Д.Б. Никольский // Геоматика, №1. — 2008. — С. 21 - 24.

38. Трофимов, Б.С. Методика вторичной обработки радиолокационных изображений в целях обнаружения разливов нефти / Б.С. Трофимов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, №4 (12). — 2011. — С. 130 - 134.

39. Ракурс :: Программное обеспечение :: PHOTOMOD Radar :: О программе [Электронный ресурс] // Сайт компании "Ракурс". 2015. URL: <http://www.racurs.ru/?page=17> (дата обращения: 25.08.2015).

40. Программное обеспечение для приема, хранения, обработки и интерпретации спутниковых снимков, экспорта в ГИС [Электронный ресурс] // СканЭкс, инженерно-технический центр. 2015. URL: <http://scanex.ru/ru/software/index.html> (дата обращения: 25.08.2015).

41. PCI Geomatics - Radar Suite [Электронный ресурс] // PCI Geomatics. 2015. URL: <http://www.pcigeomatics.com/software/geomatica/radar-suite> (дата обращения: 25.08.2015).
42. Home | NEST | Next ESA SAR Toolbox [Электронный ресурс] // NEST. 2015. URL: <https://earth.esa.int/web/nest/home> (дата обращения: 25.08.2015).
43. STEP | Science Toolbox Exploitation Platform [Электронный ресурс] // STEP. 2015. URL: <http://step.esa.int/main/> (дата обращения: 25.08.2015).
44. Вершинина, В.В. Метод и алгоритмы анализа контурных изображений в визуальных информационных системах на основе неоднородной нечеткой семантической сети: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.13.01 / Вершинина Валентина Владимировна. — Рыбинск, 2004. — 18 с.
45. Созонова, Т.Н. Применение вариационных алгоритмов интерполяции и оценки первой производной для некоторых аспектов обработки изображений / Т.Н. Созонова, Н.С. Титова, Н.В. Щербенина // Научные ведомости БелГУ. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. №8-1-1, том 10. — 2008. — С. 5 - 12.
46. Comaniciu, D. Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift / D. Comaniciu, V. Ramesh, P. Meer // Proceedings of 2000 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Hilton Head, SC, volume II. — June, 2000. — pp. 142 - 149.
47. Горелик, А.Л. Селекция и распознавание на основе локационной информации. Под редакцией профессора А.Л. Горелика / А.Л. Горелик, Ю.Л. Барабаш, О.В. Кривошеев, С.С. Эпштейн. — М: Радио и связь, 1990. — 240 с.
48. Premaratne, P. Image similarity index based on moment invariants of approximation level of discrete wavelet transform / P. Premaratne, M. Premaratne // Electronic letters, vol. 48, no. 23. — November 2012. — pp. 1465 - 1467.



49. Cvetkovic, S. Video summarization using color features and efficient adaptive threshold technique / S. Cvetkovic, M. Jelenkovic, S.V. Nikolic // PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY, R. 89 NR 2a. — 2013. — pp. 247 - 250.

50. Сидоров, Д.В. Оценка качества изображений с использованием вейвлетов / Д.В. Сидоров, А.Н. Осокин, Н.Г. Марков // Известия Томского политехнического университета, т. 315, №5. — 2009. — С. 104 - 107.

51. Qi, Huan Content-based image quality assessment using semantic information and luminance differences / Huan Qi, Shuhong Jiao, Weisi Lin, Lin Tang, Weihe Shen // Electronics Letters, Volume 50, Issue 20. — September, 2014. — pp. 1435 - 1436.

52. Wang, Zhou Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity / Zhou Wang, Alan Conrad Bovik, Hamid Rahim Sheikh, Eero P. Simoncelli // IEEE transactions on image processing, Vol. 13, No. 4. — April, 2004. — pp. 600 - 612.

53. Marini, Fabrizio Content Based No-Reference Image Quality Metrics: Ph.D. Dissertation / Fabrizio Marini. — Anno Accademico, 2011. — 104 p.

54. Визильтер, Ю.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко, М.В. Ососков, А.В. Моржин. — М.: Физматкнига, 2010. — 672 с.

55. Петросян, Я.В. Оценка информационной насыщенности цифровых изображений аэрофотосъемки и ее потеря при проведении процедур улучшения визуального восприятия / Я.В. Петросян // Гелиогеофизические исследования, Выпуск 9. — 2014. — С. 130 - 136.

56. Слынько, Ю.В. Разработка и исследование алгоритмов определения геометрических преобразований кадров видеопоследовательности и их применение к задачам стабилизации, сопровождения и селекции движущихся объектов: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 05.13.17 / Слынько Юрий Вячеславович. — Москва, 2008. — 133 с.

57. Лагуткин, В.Н. Применение вейвлет-преобразования в задаче оценки смещения объекта / В.Н. Лагуткин, Ю.В. Радченко // Вопросы радиоэлектроники, том 4, №1. — 2004. — С. 78 - 93.

58. Герман, Е.В. Алгоритмы совмещения разнородных изображений в бортовых системах визуализации: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.13.01 / Герман Елена Владимировна. — Рязань, 2014. — 166 с.

59. Negahdaripour, S. Motion recovery from image sequences using first-order optical flow information / S. Negahdaripour, S. Lee // IEEE Workshop Visual Motion. — Oct. 1991. — pp. 132 - 139.

60. Keeling, Stephen L. Medical image registration and interpolation by optical flow with maximal rigidity / Stephen L. Keeling, Wolfgang Ring // Journal of Mathematical Imaging and Vision. Volume 23. Issue 1. — July 2005. — pp. 47 - 65.

61. Краснобаев, А.А. Обзор алгоритмов детектирования простых элементов изображения и анализ возможности их аппаратной реализации / А.А. Краснобаев // Препринты ИПИМ им. М.В. Келдыша, 114. — 2005. — С. 1 - 20.

62. Lindeberg, T. Feature detection with automatic scale selection / T. Lindeberg // International Journal of Computer Vision, 30(2). — 1998. — pp. 79 - 116.

63. Lowe, D.G. Object recognition from local scale-invariant features / D.G. Lowe // Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision. — 1999. — pp. 1150 - 1157.

64. Mikolajczyk, K. A performance evaluation of local descriptors / Krystian Mikolajczyk, Cordelia Schmid // IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence. — 2005. — pp. 1615 - 1630.

65. Sarfraz, S. Head Pose Estimation in Face Recognition across Pose Scenarios / S. Sarfraz, O. Hellwich // Proceedings of VISAPP 2008, Int. conference on Computer Vision Theory and Applications. — January 2008. — pp. 235 - 242.

66. Ramasubramanian, V. K-dimensional tree algorithms for nearest neighbor search with application to vector quantization encoding / V.Ramasubramanian, Kuldeep

K. Paliwal // IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 40, no. 3. — 1992. — pp. 518 - 531.

67. Fischler, M.A. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography / Martin A. Fischler, Robert C. Bolles // Communication of the ACM, vol. 24, no. 6. — June 1981. — pp. 381 - 395.

68. Bay, H. SURF: Speeded Up Robust Features / Herbert Bay, Andreas Ess, Tinne Tuytelaars, Luc Van Gool // Computer Vision and Image Understanding (CVIU), Vol. 110, No. 3. — 2008. — pp. 346 - 359.

69. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. — М.: Техносфера, 2005. — 1072 с.

70. Lowe, D. Distinctive Image features from scale invariant keypoints / D. Lowe // International journal of Computer Vision, Vol. 60. — 2004. — pp. 91 - 110.

71. Khan, N. SIFT and SURF Performance Evaluation Against Various Image Deformations on Benchmark Dataset / N. Khan, B. McCane, G. Wyvill // International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA). — December 6-8, 2011. — pp. 501 - 506.

72. Пономаренко, А.А. Структура со свойствами тесного мира для решения задачи поиска ближайшего соседа в метрическом пространстве / А.А. Пономаренко, Ю.А. Мальков, А.А. Логвинов, В.В. Крылов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, №5 (2). — 2012. — С. 409 - 415.

73. Гулаков, В.К. Многомерные структуры данных / В.К. Гулаков, А.О. Трубаков. — Брянск, БГТУ, 2010. — 387 с.

74. Panigrahy, R. An Improved Algorithm Finding Nearest Neighbor Using Kd-trees / R. Panigrahy // Proceedings of Latin American Symposium on Theoretical Informatics (LATIN). — April 2008. — pp. 387 - 398.

75. Yianilos, P.N. Data structures and algorithms for nearest neighbor search in general metric spaces / P.N. Yianilos // Proceedings of the fourth annual ACM-SIAM Symposium on Discrete algorithms. — 1993. — pp. 311 - 321.

76. Могилко, А.А. Параллельный алгоритм поиска ближайшей точки в радиусе / А.А. Могилко // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, №11. — 2013. — С. 363 - 382.

77. Аковецкий, В.И. Радиолокационная фотограмметрия / В.И. Аковецкий, Г.Н. Донсков, Ю.Н. Корнеев, Л.Б. Неронский. — М.: Недра, 1979. — 239 с.

78. Коберниченко, В.Г. Анализ информативных свойств космических радиолокационных снимков при обновлении топографических карт / В.Г. Коберниченко // 6-я открытая всероссийская конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Программа. — Москва, 10-14 ноября 2008. — С. 16.

79. Романов, А.А. Особенности алгоритма SURF при сшивке РЛИ земной поверхности / А.А. Романов // Труды 56-й научной конференции МФТИ: Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе», Всероссийской молодежной научно-инновационной конференции «Физико-математические науки: актуальные проблемы и их решения». Радиотехника и кибернетика. — 2013. — С. 143-144.

80. Романов, А.А. Методика поиска областей с общей семантикой на радиолокационных изображениях земной поверхности / А.А. Романов // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», 24-26 ноября 2014 г., Москва. Доклады. — 2014. — С. 124-128.

81. Романов, А.А. Методика оценки насыщенности изображений для автоматизированных систем обработки РЛИ / А.А. Романов // Юбилейная научно-техническая конференция ОАО «Концерн «Вега». Программа. 16-17 октября 2014г. — 2014. — 40 с.

82. Романов, А.А. Количественная характеристика детальности семантики радиолокационного изображения / А.А. Романов // 13-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2014». 17-21 ноября 2014 года. Москва. Тезисы. — 2014. — С. 422-423.

83. Романов, А.А. Объективная оценка насыщенности семантики радиолокационного изображения / А.А. Романов // Успехи современной радиоэлектроники, №5. — 2015. — С. 108-115.

84. Романов, А.А. Количественная оценка насыщенности семантики радиолокационного изображения / А.А. Романов // Программа Всероссийской конференции «Чтения по прикладным наукам», РАН. — 2015. — 5 с.

85. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации. Перевод с польского И.Д. Рудинского / С. Осовский. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 344 с.

86. Солдатова, О.П. Применение нейронных сетей для решения задач прогнозирования / О.П. Солдатова, В.В. Семенов // Электронный многопредметный научный журнал "Исследовано в России". Том 9, МФТИ. — 2006. — С. 1270-1276.

87. Галушкин, А.И. Нейронные сети: основы теории / А.И. Галушкин. — Горячая линия - Телеком, 2010. — 496 с.

88. Горбань, А.Н. Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей / А.Н. Горбань // Сибирский журнал вычислительной математики, №1, Т. 1. — 1998. — С. 12-24.

89. Ферцев, А.А. Ускорение обучения нейронной сети для распознавания изображений с помощью технологии NVIDIA CUDA / А.А. Ферцев // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, выпуск 1(26). — 2012. — С. 183-191.

90. Кондратюк, А.В. Метод повышения чувствительности нейронных сетей, обучаемых с учителем, в задачах прогнозирования временных рядов / А.В. Кондратюк, В.А. Крисилов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. №16, том 17. — 2006. — С. 65-69.

91. Круглов, В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. 2-е изд. / В.В. Круглов, В.В. Борисов. — М.: Горячая линия - Телеком, 2002. — 382 с.
92. Бескорвайный, В.В. Идентификация частной полезности многофакторных альтернатив с помощью S-образных функций / В.В. Бескорвайный, Е.В. Соболева // Бионика интеллекта, №1(72). — 2010. — С. 50-54.
93. Романов, А.А. Применение нейронных сетей в сшивке перекрывающихся радиолокационных изображений / А.А. Романов // Международная неделя авиакосмических технологий «Aerospace Science Week». 18-21 ноября 2014 года. Москва. Программа. — 2014. — 52 с.
94. Романов, А.А. Вычисление взаимной ориентации перекрывающихся радиолокационных изображений с помощью нейронных сетей / А.А. Романов // Труды 57-й научной конференции МФТИ: Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики», Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе». Радиотехника и кибернетика. — 2014. — С. 90-91.
95. Романов, А.А. Вычисление взаимной ориентации радиолокационных изображений с перекрытием с помощью нейронных сетей / А.А. Романов, Б.Г. Татарский // Информационно-измерительные и управляющие системы, №12. — 2015. — С. 26-33.
96. Капралов, Е.Г. Основы геоинформатики. Кн. 1: Учеб. пособие для студ. вузов. Под ред. В.С. Тикунова / Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарев, В.С. Тикунов, А.В. Заварзин, И.К. Лурье, И.А. Рыльский, А.М. Трофимов, М.Э. Флейс, В.Б. Яровых. — М.: Издательский центр "Академия", 2004. — 352 с.
97. Постников, М.М. Аналитическая геометрия / М.М. Постников. — М.: Наука, 1973. — 754 с.

98. Линник, Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. Изд. 2-е, доп. и испр. / Ю.В. Линник. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. — 354 с.

99. Хьюбер, Дж. П. Робастность в статистике: Пер. с англ. / Дж. П. Хьюбер. — М.: Мир, 1984. — 304 с.

100. Романов, А.А. Расчет взаимной ориентации двух перекрывающихся радиолокационных изображений земной поверхности / А.А. Романов // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2015». 21-23 апреля 2015 года. Москва. Сборник тезисов докладов. — 2015. — С. 155.

101. Романов, А.А. Особенности сшивки радиолокационных изображений земной поверхности / А.А. Романов // 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2015». 16-20 ноября 2015 года. Москва. Тезисы. — 2015. — С. 269-270.

102. Романов, А.А. Особенности корегистрации радиолокационных изображений земной поверхности при решении задачи сшивки / Романов А.А. // Программа 58-й научной конференции МФТИ. — 2015. — 94 с.

103. Романов, А.А. Ориентация радиолокационных изображений земной поверхности при решении задачи сшивки / А.А. Романов // XIII молодёжная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь – перспективные технологии». Тезисы докладов. — 2015. — С. 43-44.

104. Романов, А.А. Определение взаимной ориентации двух перекрывающихся радиолокационных изображений земной поверхности / А.А. Романов, Б.Г. Татарский // Информационно-измерительные и управляющие системы, №1. — 2016. — С. 79-86.

105. Кормен, Т.Х. Алгоритмы: построение и анализ, 3-е изд.: Пер. с англ. / Т.Х. Кормен, Ч.И. Лейзерсон, Р.Л. Ривест, К. Штайн. — М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2013. — 1328 с.

106. Липский, В. Комбинаторика для программистов. Перевод с польского В.А. Евстигнеева и О.А. Логиновой, под редакцией А.П. Ершова / В. Липский. — М.: Мир, 1988. — 200 с.

107. Елюшкин, В.Г. Фотограмметрическая обработка радиолокационных снимков / В.Г. Елюшкин, Б.В. Пронин. — М.: Недра, 1993. — 193 с.

108. Волков, Е.А. Численные методы. Учеб. пособие для вузов, 2-е издание / Е.А. Волков. — М.: Наука, 1987. — 248 с.

109. Романов, А.А. Уточнение системы координат единой радиолокационной карты при решении задачи сшивки / А.А. Романов // Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: В 4 т. Том 1. — 2016. — С. 581.

110. Романов, А.А. Обработка радиолокационных данных с использованием вычислительной системы на базе NeuroMatrix Core 3 / А.А. Романов, А.В. Шаповалов // International Conference “Engineering & Telecommunication En&T 2014”. November 26-28, 2014. Book of Abstracts. — 2014. — С. 127-129.

111. Евдокимов, А.А. Военная топография. Пособие для групповых занятий / А.А. Евдокимов. — Санкт-Петербург: ГУАП, 2008. — 104 с.

112. Салищев, К.А. Картоведение: Учебник. - 3-е изд. / К.А. Салищев. — М.: Изд-во МГУ, 1990. — 400 с.

113. Кранц, П. Сферическая тригонометрия: Пер. с нем. / Под ред. Я. Н. Шпильрейна. Изд. 2-е. / П. Кранц. — М.: Издательство ЛКИ, 2007. — 96 с.



## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А. Свойства проективного преобразования

Проективное преобразование полностью описывается матрицей параметров  $M$  (37).

**1. Проективное преобразование  $G_1$ , описываемое матрицей  $CM$ , где  $C \in \mathbb{R}, C \neq 0$ , тождественно проективному преобразованию  $G_2$ , описываемому матрицей  $M$ .**

Действительно, для  $G_2$  имеем:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} u_2' \\ v_2' \\ t_2 \end{pmatrix} &= M \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ax+by+c \\ dx+ey+f \\ gx+hy+1 \end{pmatrix}, \\ u_2 &= \frac{u_2'}{t_2} = \frac{ax+by+c}{gx+hy+1}, \quad v_2 = \frac{v_2'}{t_2} = \frac{dx+ey+f}{gx+hy+1}. \end{aligned} \tag{A.1}$$

Аналогично для  $G_1$  получим:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} u_1' \\ v_1' \\ t_1 \end{pmatrix} &= CM \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Ca & Cb & Cc \\ Cd & Ce & Cf \\ Cg & Ch & C \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(ax+by+c) \\ C(dx+ey+f) \\ C(gx+hy+1) \end{pmatrix}, \\ u_1 &= \frac{C(ax+by+c)}{C(gx+hy+1)} = \frac{ax+by+c}{gx+hy+1} \equiv u_2, \quad v_1 = \frac{C(dx+ey+f)}{C(gx+hy+1)} = \frac{dx+ey+f}{gx+hy+1} \equiv v_2. \end{aligned} \tag{A.2}$$

**2. Преобразование обратное проективному описывается обратной матрицей.**

Для случая  $\det M \neq 0$ , имеем:

$$\begin{vmatrix} tu \\ tv \\ t \end{vmatrix} = M \cdot \begin{vmatrix} x \\ y \\ 1 \end{vmatrix} \Rightarrow M^{-1} \cdot t \cdot \begin{vmatrix} u \\ v \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x \\ y \\ 1 \end{vmatrix}, \quad (\text{A.3})$$

тогда, приняв  $t' = t^{-1}$ , получим:

$$\begin{vmatrix} t'x \\ t'y \\ t' \end{vmatrix} = M^{-1} \cdot \begin{vmatrix} u \\ v \\ 1 \end{vmatrix}. \quad (\text{A.4})$$

**3. Композиция проективных преобразований описывается произведением их матриц.**

Пусть проективные преобразования  $G_1$  и  $G_2$  описываются матрицами  $M_1$  и  $M_2$  соответственно, тогда для композиции  $G_2G_1$  имеем:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} t_2 u_2 \\ t_2 v_2 \\ t_2 \end{vmatrix} &= M_2 \cdot \begin{vmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} t_1 u_1 \\ t_1 v_1 \\ t_1 \end{vmatrix} = t_1 \begin{vmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{vmatrix} = M_1 \cdot \begin{vmatrix} x \\ y \\ 1 \end{vmatrix} \Rightarrow \\ \Rightarrow \begin{vmatrix} t_2 u_2 \\ t_2 v_2 \\ t_2 \end{vmatrix} &= M_2 \cdot M_1 \cdot t_1^{-1} \begin{vmatrix} x \\ y \\ 1 \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{vmatrix} t_2 t_1 u_2 \\ t_2 t_1 v_2 \\ t_2 t_1 \end{vmatrix} = M_2 \cdot M_1 \begin{vmatrix} x \\ y \\ 1 \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

следовательно, сделав замены  $M_{21} = M_2 M_1$  и  $t_{21} = t_2 t_1$ , получим:

$$\begin{vmatrix} t_{21} u_2 \\ t_{21} v_2 \\ t_{21} \end{vmatrix} = M_{21} \cdot \begin{vmatrix} x \\ y \\ 1 \end{vmatrix}. \quad (\text{A.6})$$

**Приложение Б. Сравнительные результаты поиска опорных точек с помощью оригинального и модифицированного алгоритмов SURF**

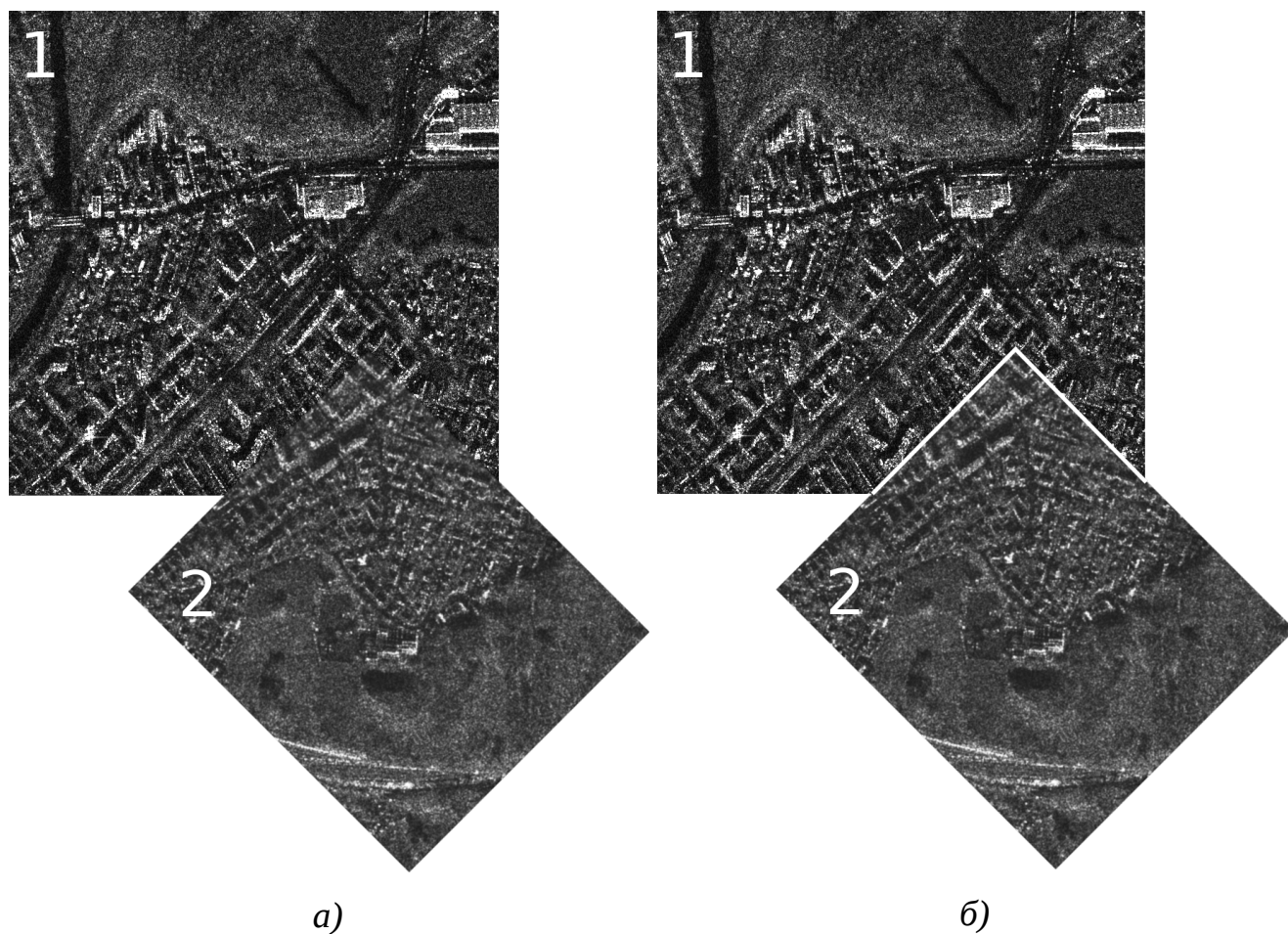


Рисунок Б.1 – Исходное взаимное расположение двух обрабатываемых искаженных фрагментов РЛИ с небольшим перекрытием и поворотом семантики на  $45^{\circ}$  (а) и с выделением границы между ними (б)

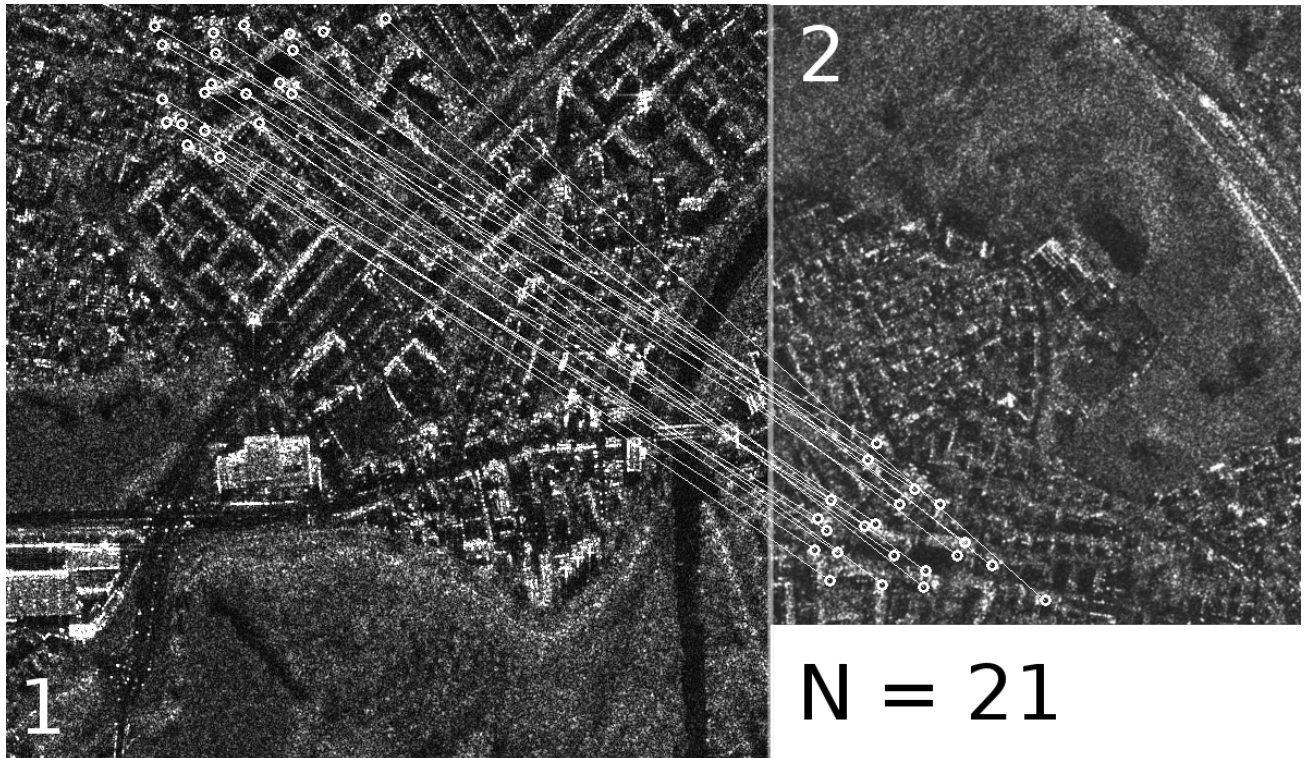


Рисунок Б.2 – Фрагменты РЛИ с опорными точками (21 шт.), найденными с помощью оригинального алгоритма SURF

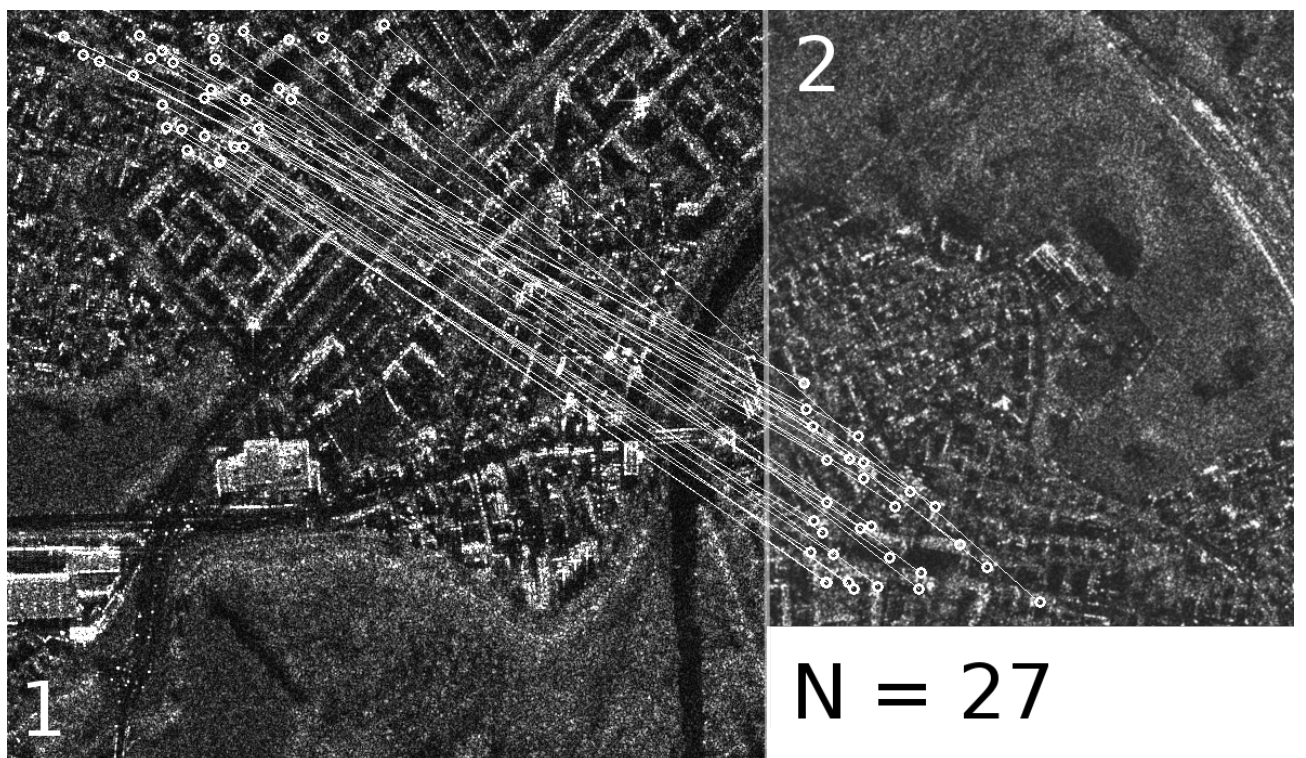
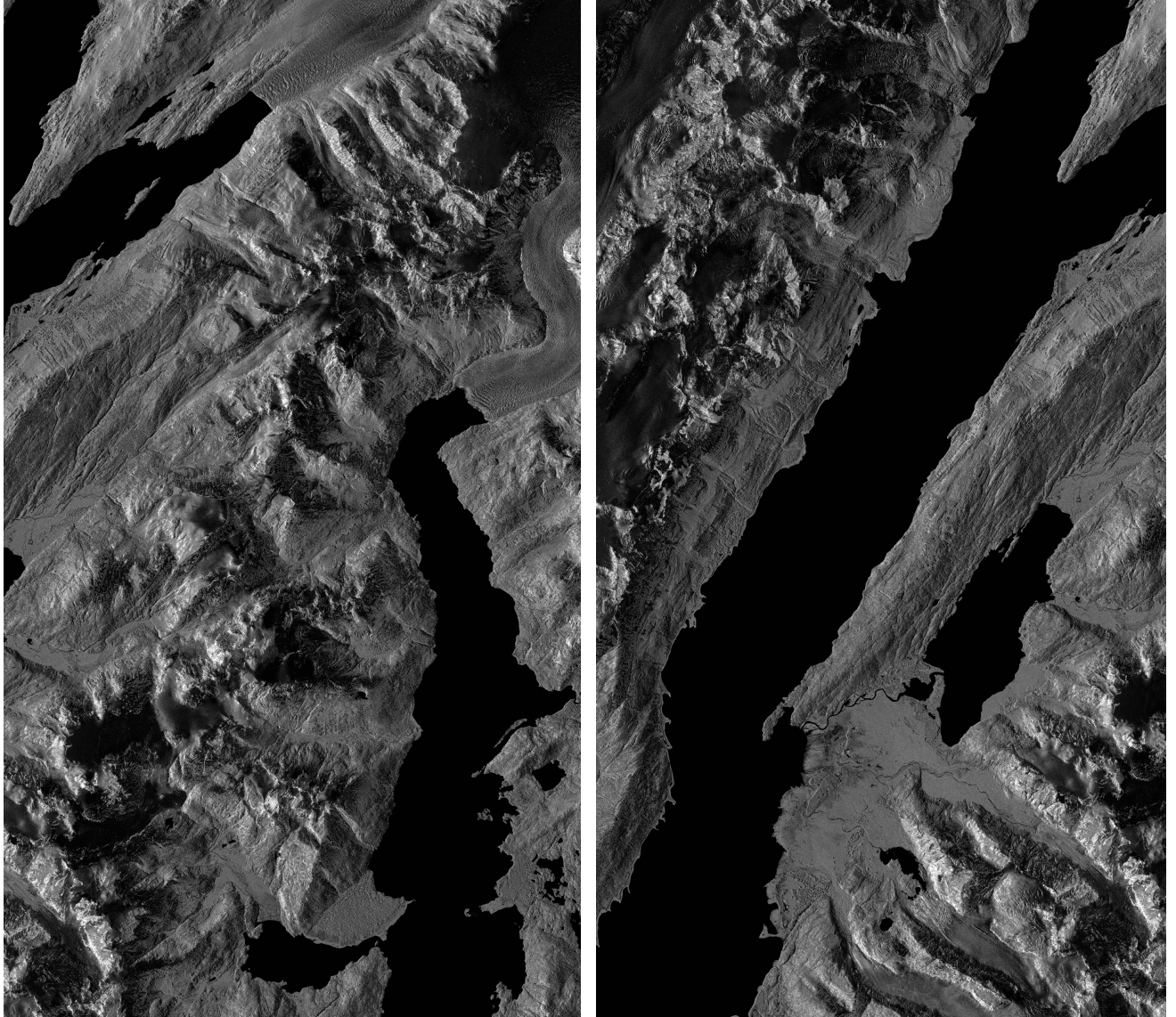


Рисунок Б.3 – Фрагменты РЛИ с опорными точками (27 шт.), найденными с помощью модернизированного алгоритма SURF

**Приложение В. Входные данные и результаты моделирования алгоритма поиска ориентации двух перекрывающихся РЛИ земной поверхности**



а)

б)

Рисунок В.1 – Перекрывающиеся РЛИ земной поверхности. Площадь каждого РЛИ составляет около 80 МПкс, перекрытие – около 10%

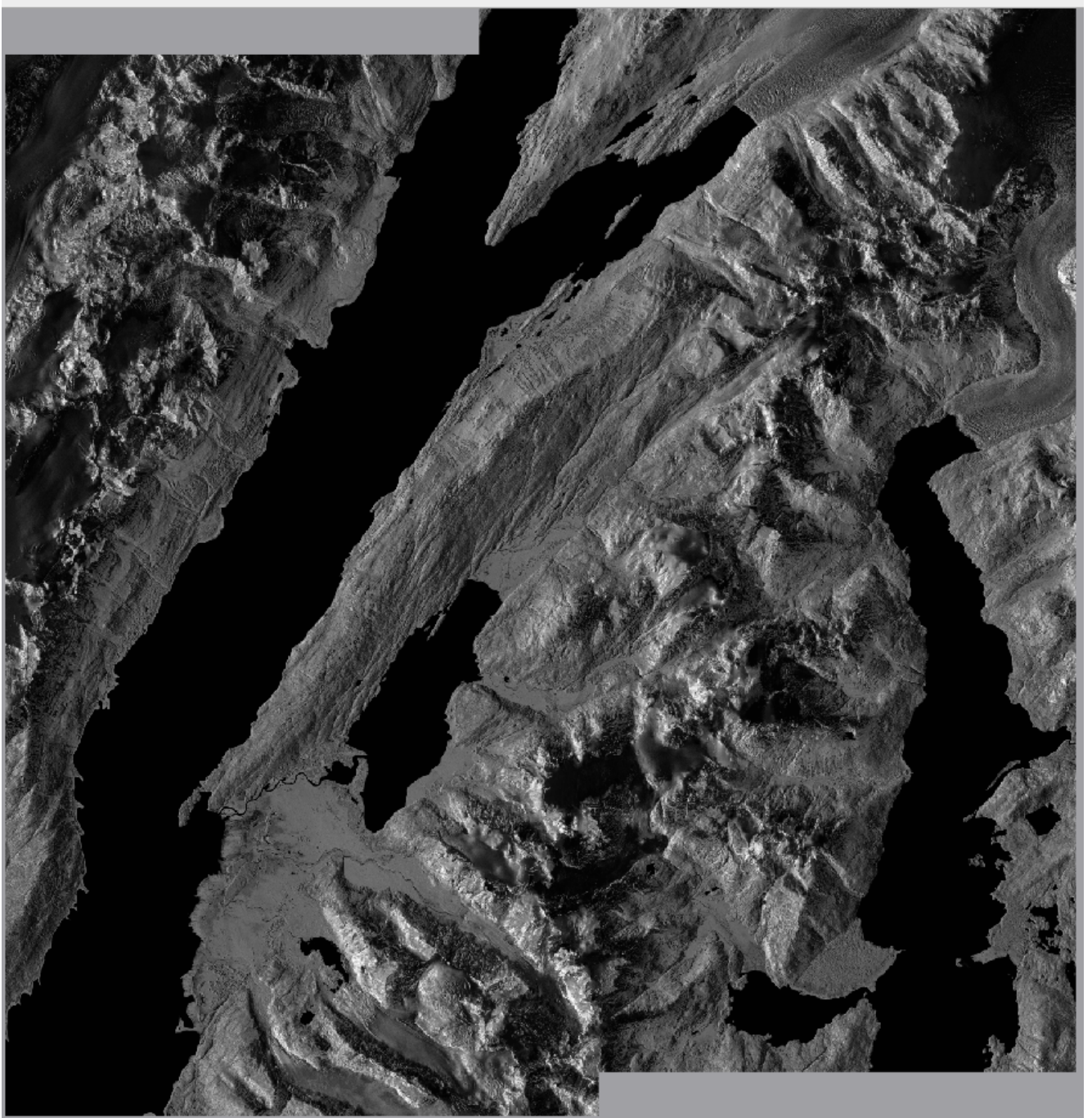
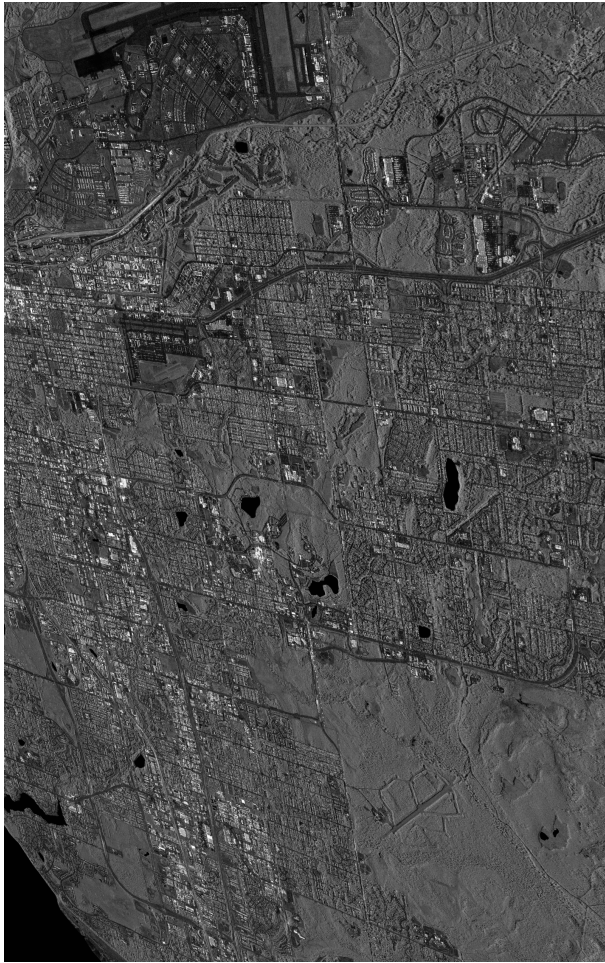
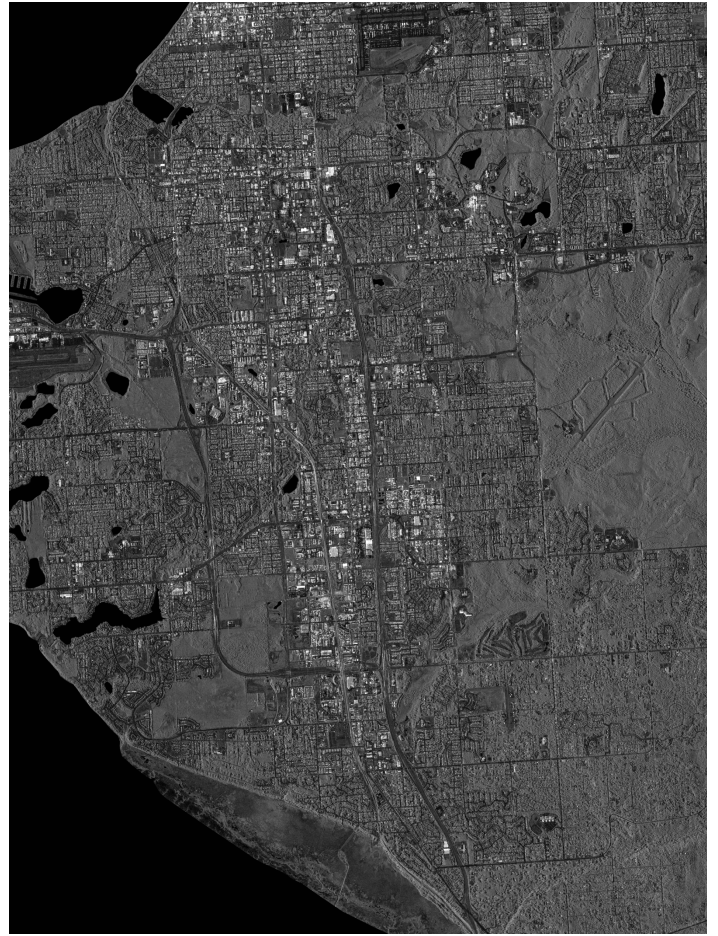


Рисунок В.2 – Наложение РЛИ земной поверхности, представленных на рисунке 1, по результатам работы алгоритма поиска ориентации перекрывающихся РЛИ



а)



б)

Рисунок В.3 – Перекрывающиеся РЛИ земной поверхности. Площади РЛИ составляют около 25 Мпкс (а) и 28 Мпкс (б), перекрытие – около 50%

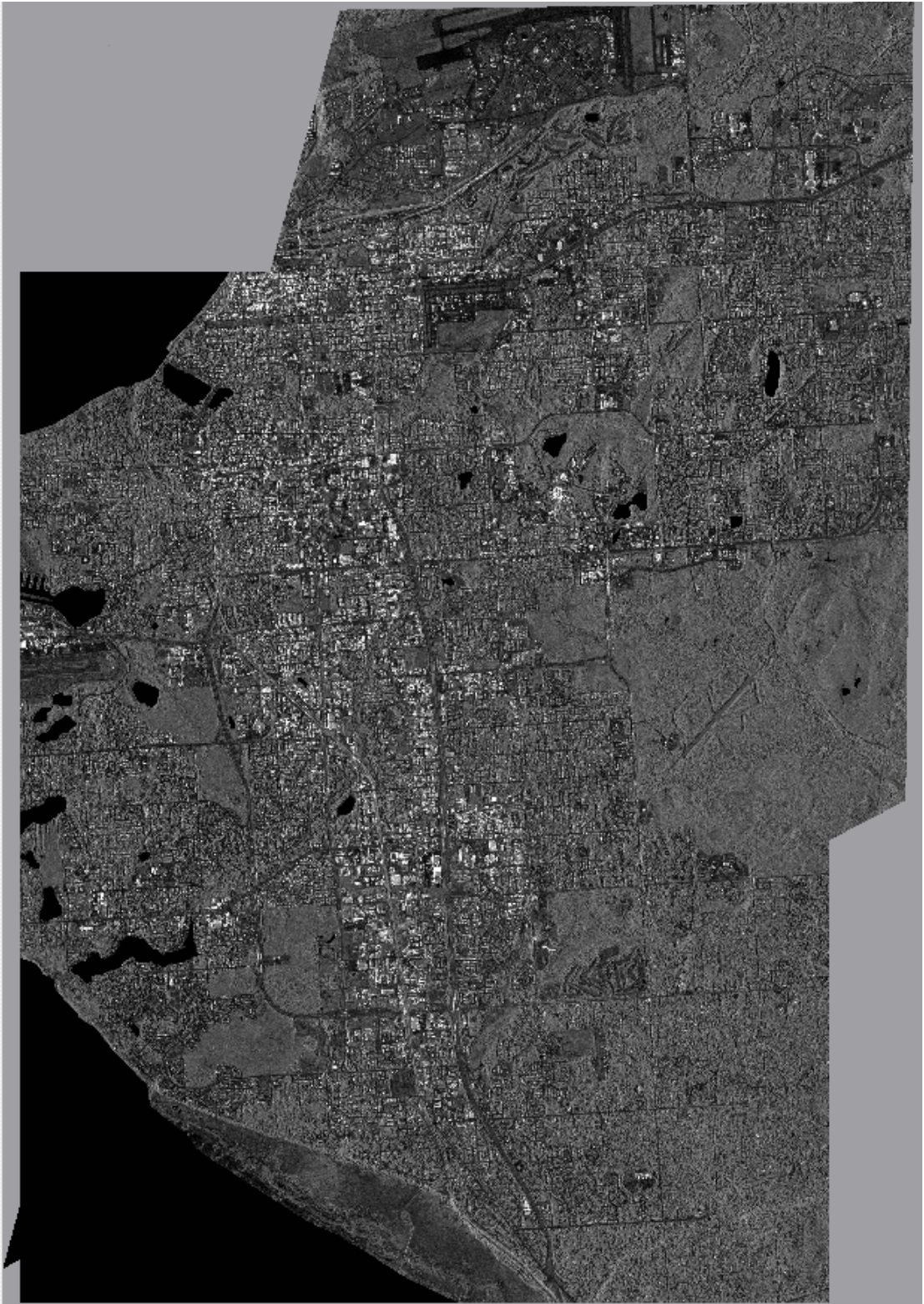


Рисунок В.4 – Наложение РЛИ земной поверхности, представленных на рисунке В.3, по результатам работы алгоритма поиска ориентации перекрывающихся РЛИ



## Приложение Г. Интерфейс программы автоматической сшивки РЛИ земной поверхности

```
[aaromanov@localhost GNU-Linux-x86]$ ./zinger -h
Программа автоматической сшивки РЛИ земной поверхности.
Запуск: ./zinger [ОПЦИИ]
Опции:
-h          Показать данное сообщение
-i ПУТЬ     Директория набора входных РЛИ земной поверхности (обязательно)
-o ПУТЬ     Директория результата сшивки РЛИ земной поверхности (обязательно)
-d          Вывод отладочной информации
-s КОЛИЧЕСТВО  Количество тредов распараллеливания на этапе поиска опорных точек
-j КОЛИЧЕСТВО  Количество тредов распараллеливания (кроме этапа поиска опорных точек)
Пример:
./zinger -i ./DATAIN/ -o ./DATAOUT
./zinger -i ./DATAIN/ -o ./DATAOUT -s 2 -j 4 -d
[aaromanov@localhost GNU-Linux-x86]$
```

Рисунок Г.1 – Доступные опции запуска программы автоматической сшивки РЛИ земной поверхности

```
[aaromanov@localhost GNU-Linux-x86]$ ./zinger -i ~/DATAIN/SAR_SQUARE/ -o ~/DATAOUT/SAR_SQUARE -s 4 -j 4
Input options
Input directory: '/home/aaromanov/DATAIN/SAR_SQUARE/'
Output directory: '/home/aaromanov/DATAOUT/SAR_SQUARE/'
Debug mode: No
SURF thread count: '4'
Other stages thread count: '4'

Scanning input directory...
10 input images were found.
--- Stage #1 ---
I_03.tif has 166010 modSURF points
I_02.tif has 195854 modSURF points
I_06.tif has 268072 modSURF points
I_07.tif has 264413 modSURF points
[1/5] modSURF calculating [#####.....] 40.0%
```

Рисунок Г.2 – Этап поиска точек интереса модернизированного алгоритма SURF

```
I_07.tif and I_08.tif have 3620 matches
I_03.tif and I_08.tif have 3 matches
I_02.tif and I_06.tif have 140 matches
I_07.tif and I_03.tif have 148 matches
I_06.tif and I_09.tif have 122 matches
I_03.tif and I_01.tif have 3 matches
I_02.tif and I_03.tif have 997 matches
I_03.tif and I_04.tif have 3643 matches
I_07.tif and I_09.tif have 5 matches
I_02.tif and I_09.tif have 7 matches
I_06.tif and I_08.tif have 4 matches
[2/5] Match and calculate [#####.....] 31.1%
```

Рисунок Г.3 – Этап поиска опорных точек и взаимной ориентации пар перекрывающихся РЛИ земной поверхности

```

10 images passed stage #4
--- Stage #4 ---
I_07.tif was transformed
I_02.tif was transformed
I_09.tif was transformed
I_03.tif was transformed
I_06.tif was transformed
I_00.tif was transformed
[4/5] Image transforming [#####.....] 60.0%

```

Рисунок Г.4 – Этап трансформирования РЛИ земной поверхности, согласно найденной ориентации

```

I_08.tif was transformed
I_04.tif was transformed
I_05.tif was transformed
--- End of stage #4 ---
10 images passed stage #4
--- Stage #5 ---
I_02.tif overviews were done successfully
I_07.tif overviews were done successfully
I_06.tif overviews were done successfully
I_03.tif overviews were done successfully
I_09.tif overviews were done successfully
I_08.tif overviews were done successfully
I_01.tif overviews were done successfully
I_04.tif overviews were done successfully
I_00.tif overviews were done successfully
I_05.tif overviews were done successfully
--- End of stage #5 ---
10 images passed stage #5
Finished!
Estimated time: 0h 11m 1s
Have a nice day :)
[aaromanov@localhost GNU-Linux-x86]$ █

```

Рисунок Г.5 – Программа успешно закончила обработку РЛИ земной поверхности

**Приложение Д. Входные данные и результаты моделирования алгоритма автоматической сшивки радиолокационных изображений земной поверхности**

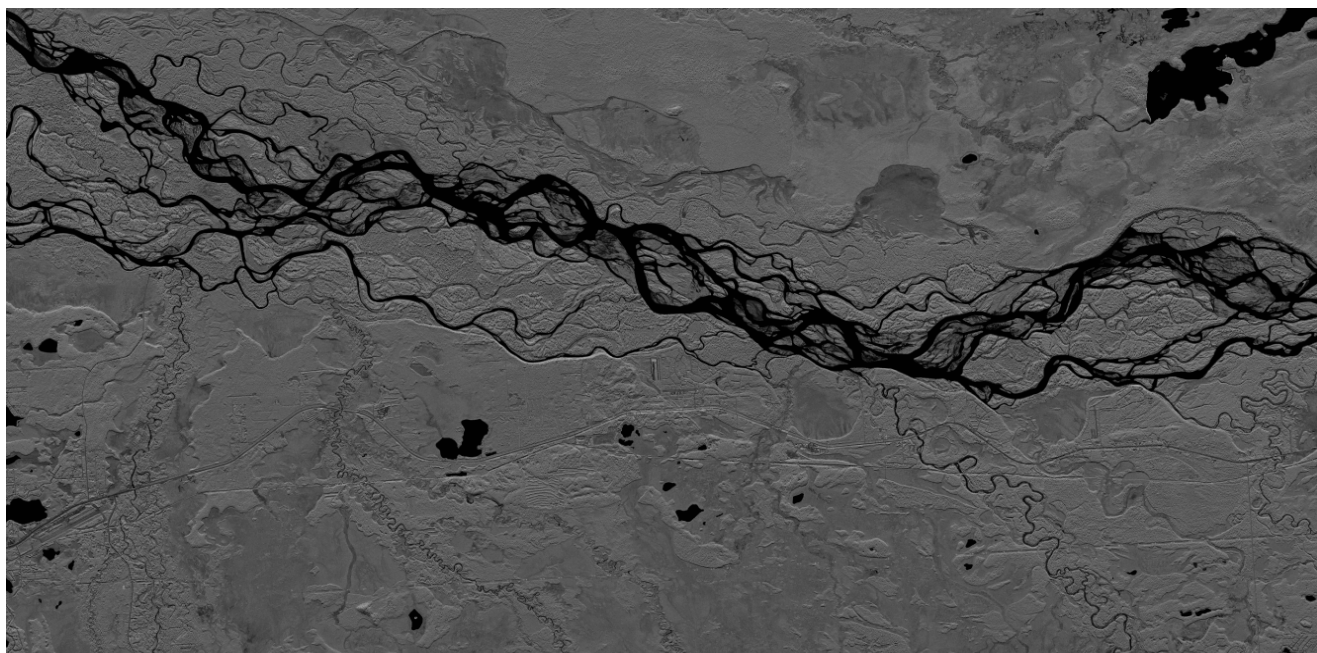


Рисунок Д.1 – Первый РЛИ земной поверхности района города Анкоридж, Аляска

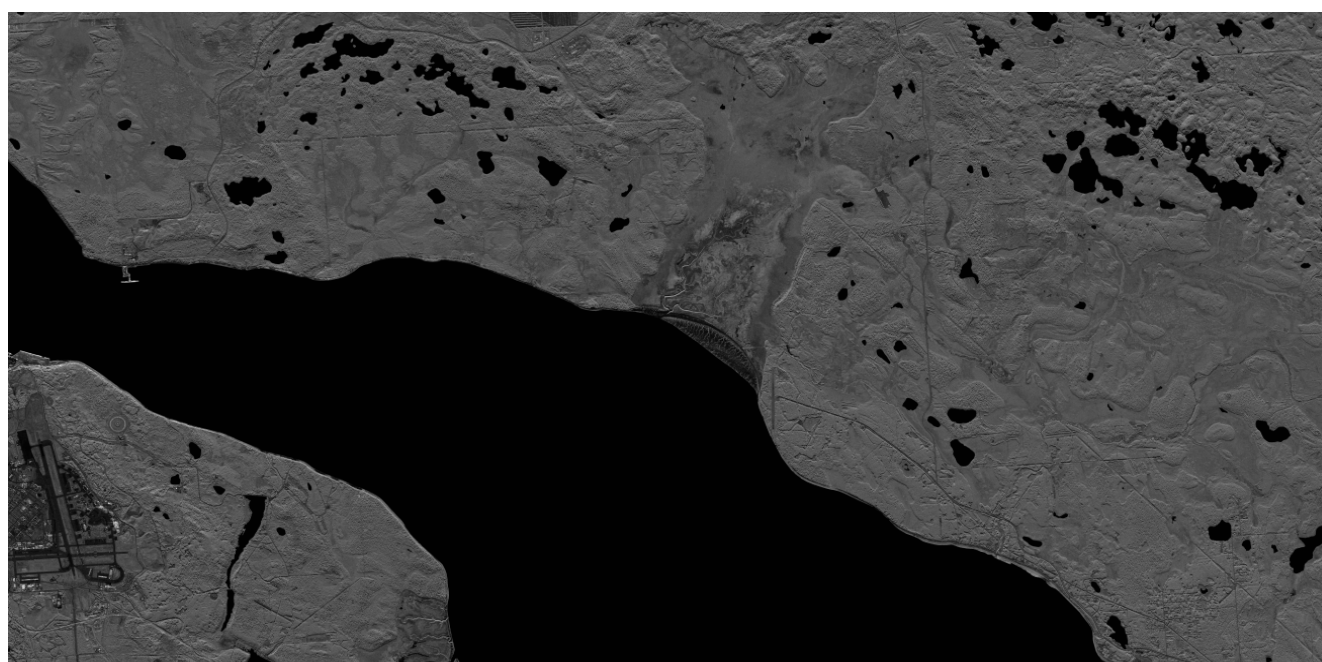


Рисунок Д.2 – Второй РЛИ земной поверхности района города Анкоридж, Аляска

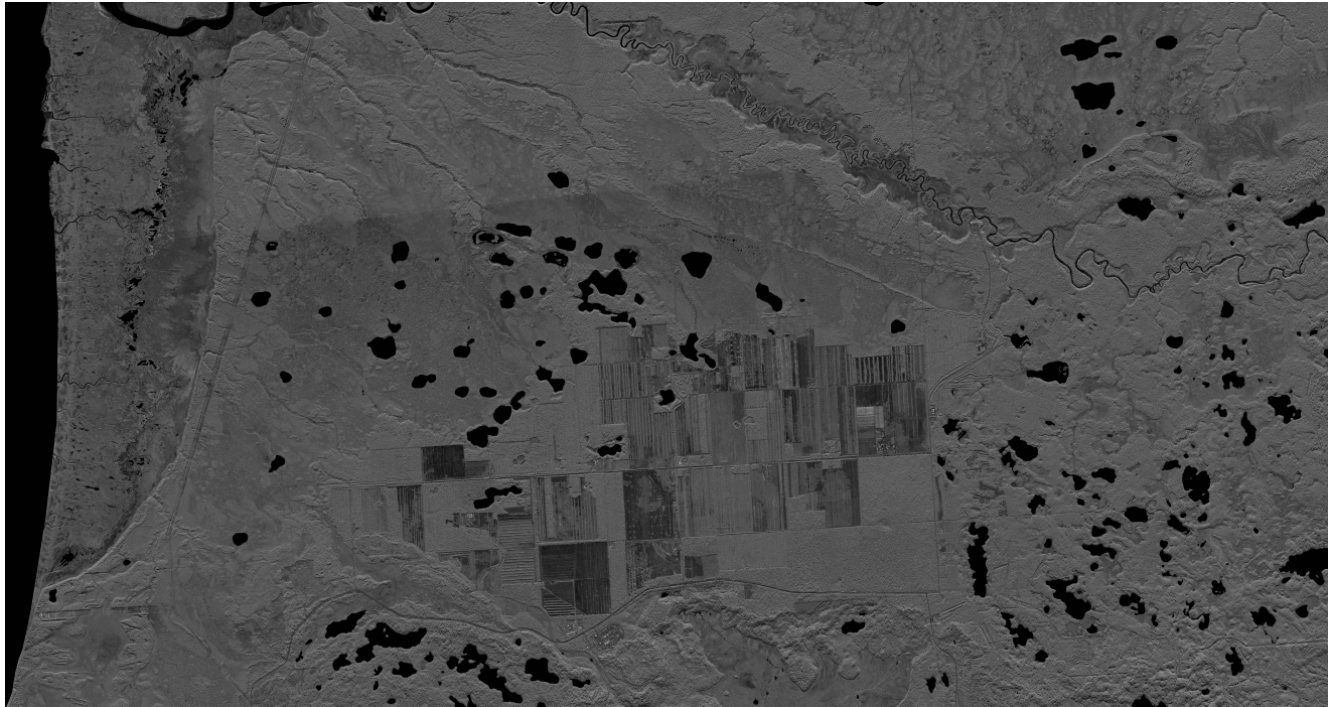


Рисунок Д.3 – Третий РЛИ земной поверхности района города Анкоридж, Аляска

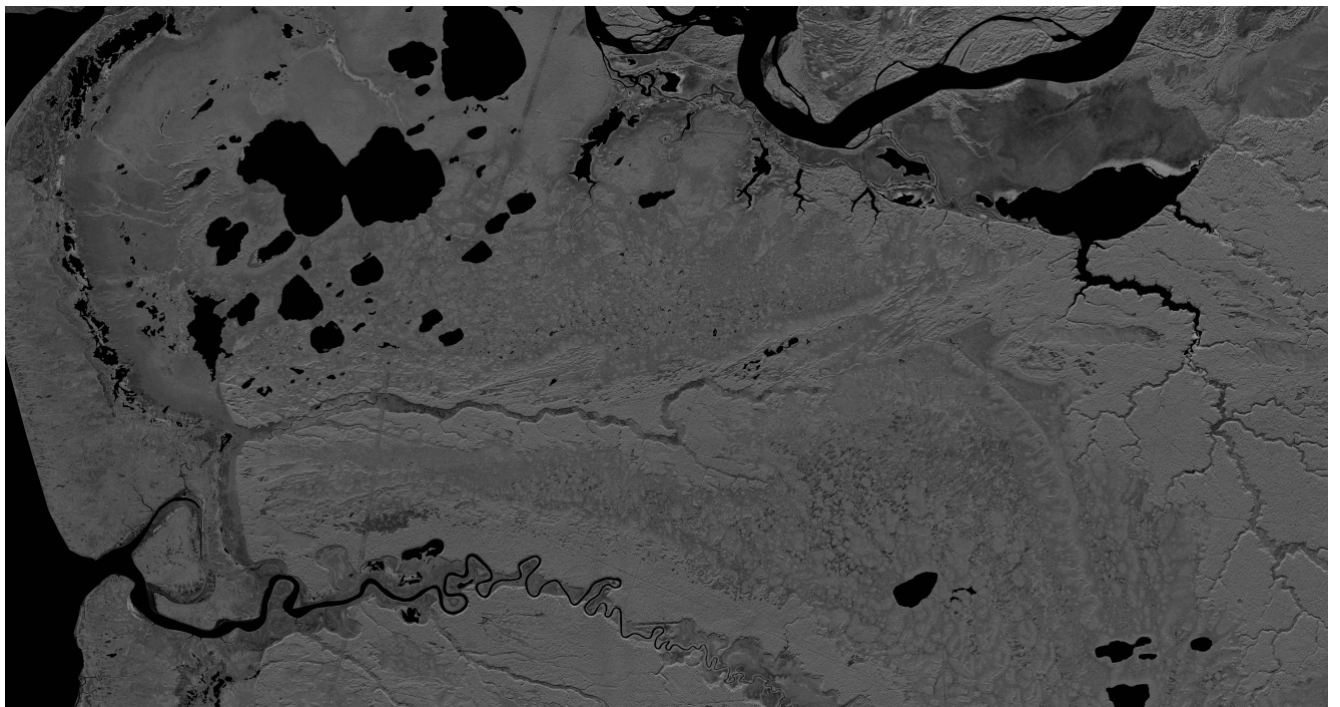


Рисунок Д.4 – Четвертый РЛИ земной поверхности района города Анкоридж, Аляска

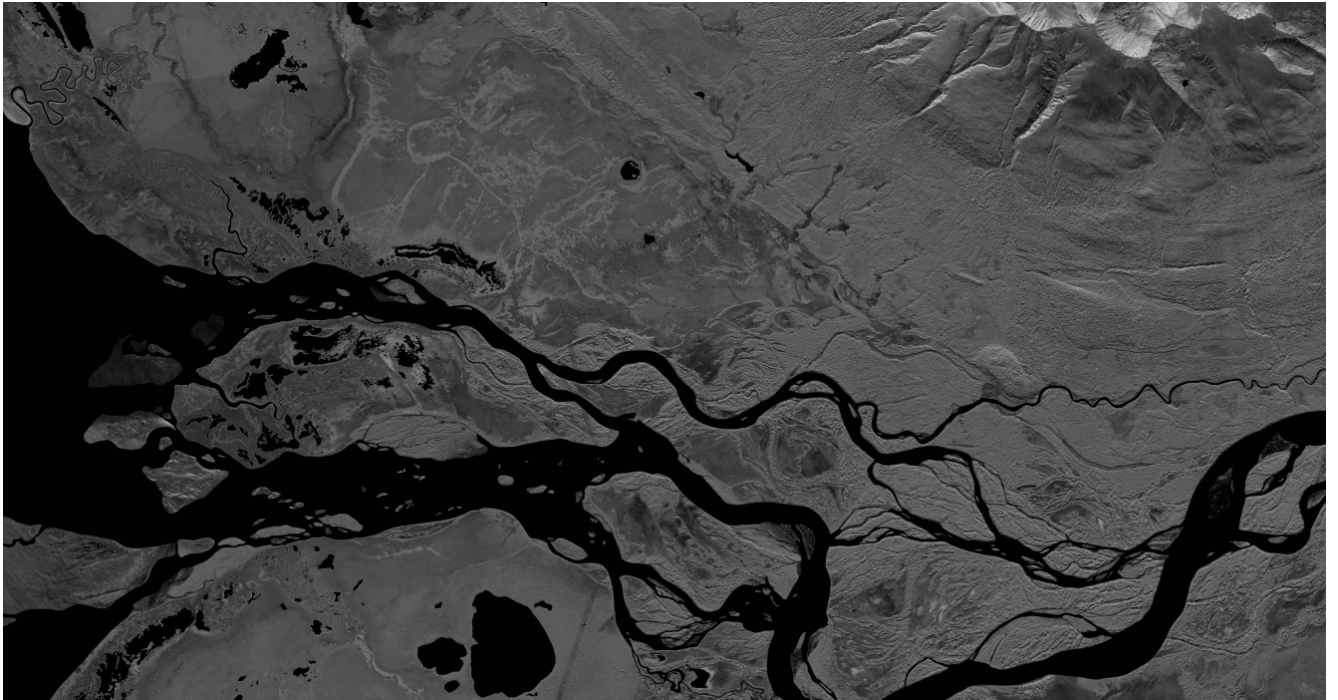


Рисунок Д.5 – Пятый РЛИ земной поверхности района города Анкоридж, Аляска

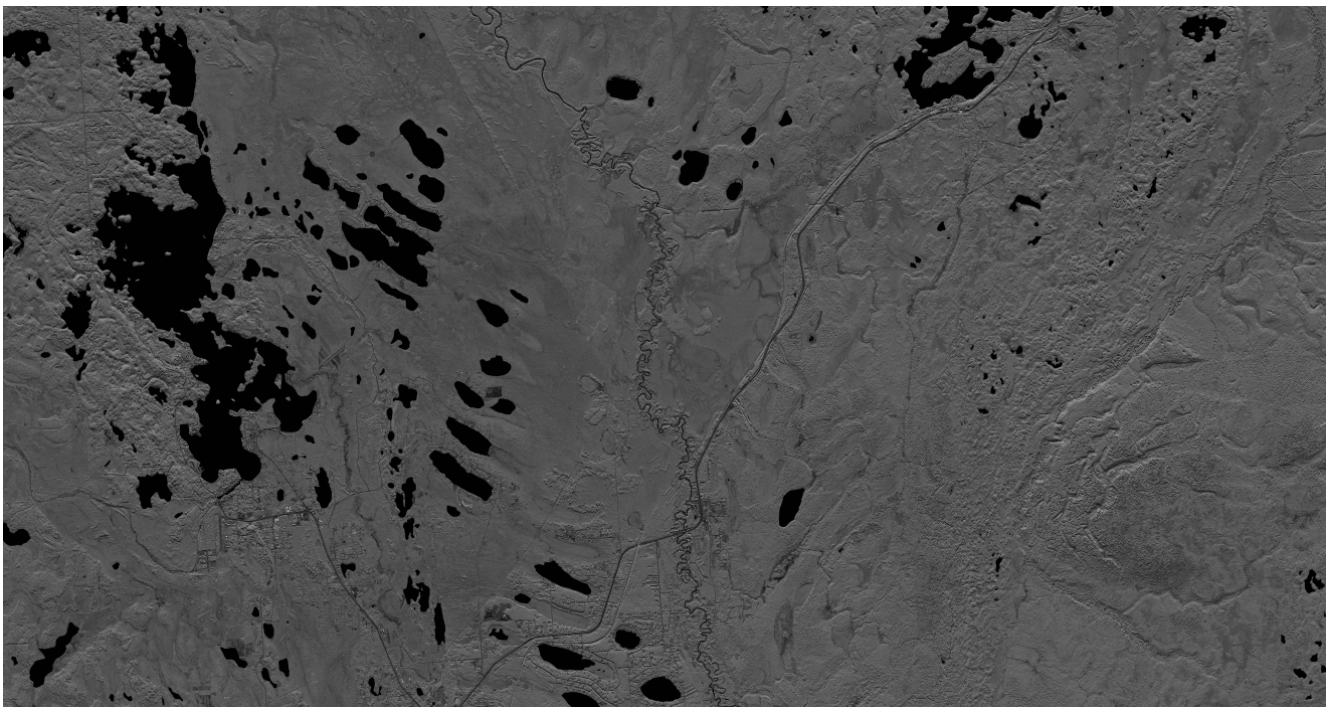


Рисунок Д.6 – Шестой РЛИ земной поверхности района города Анкоридж, Аляска

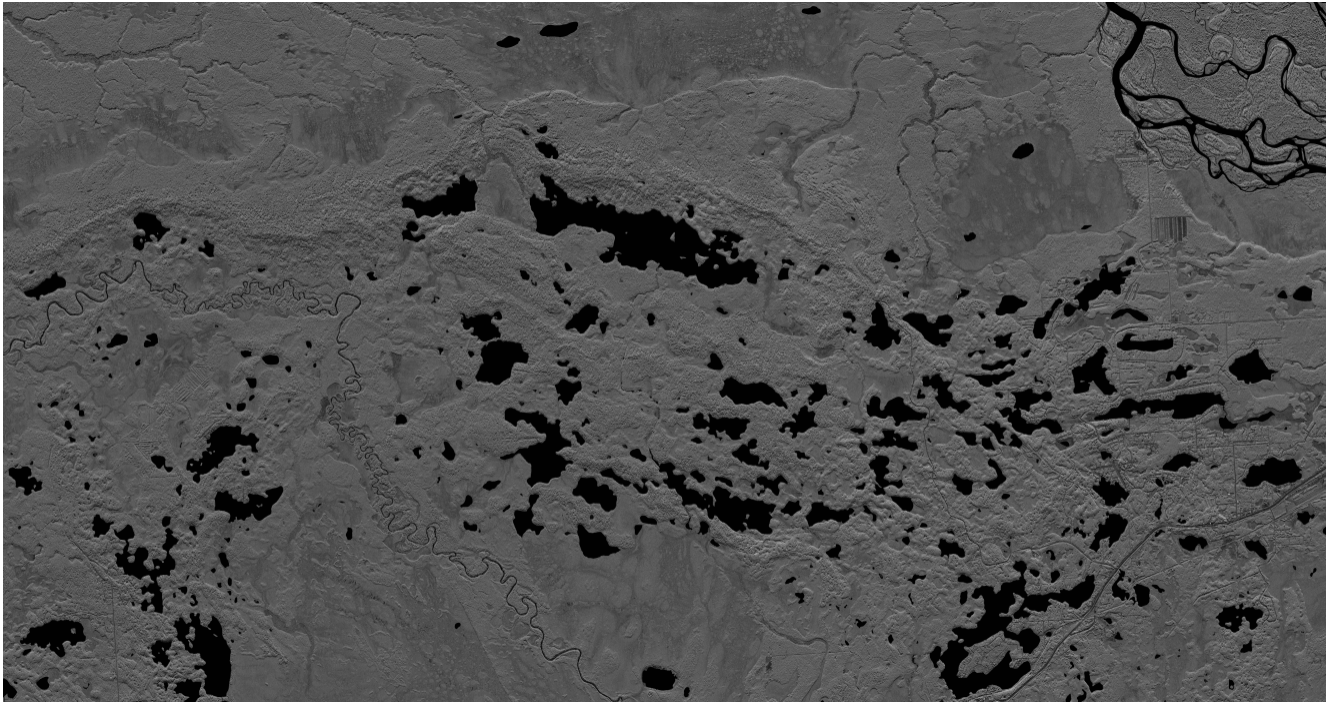


Рисунок Д.7 – Седьмой РЛИ земной поверхности района города Анкоридж,  
Аляска

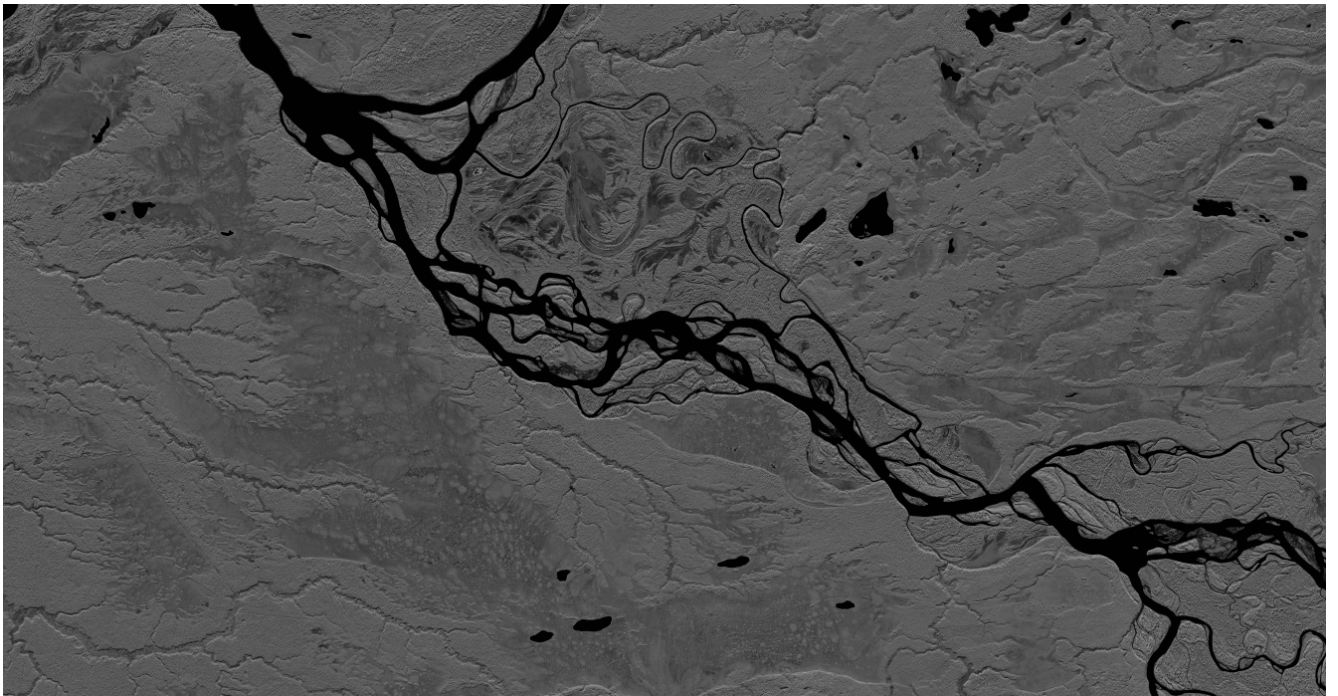


Рисунок Д.8 – Восьмой РЛИ земной поверхности района города Анкоридж,  
Аляска

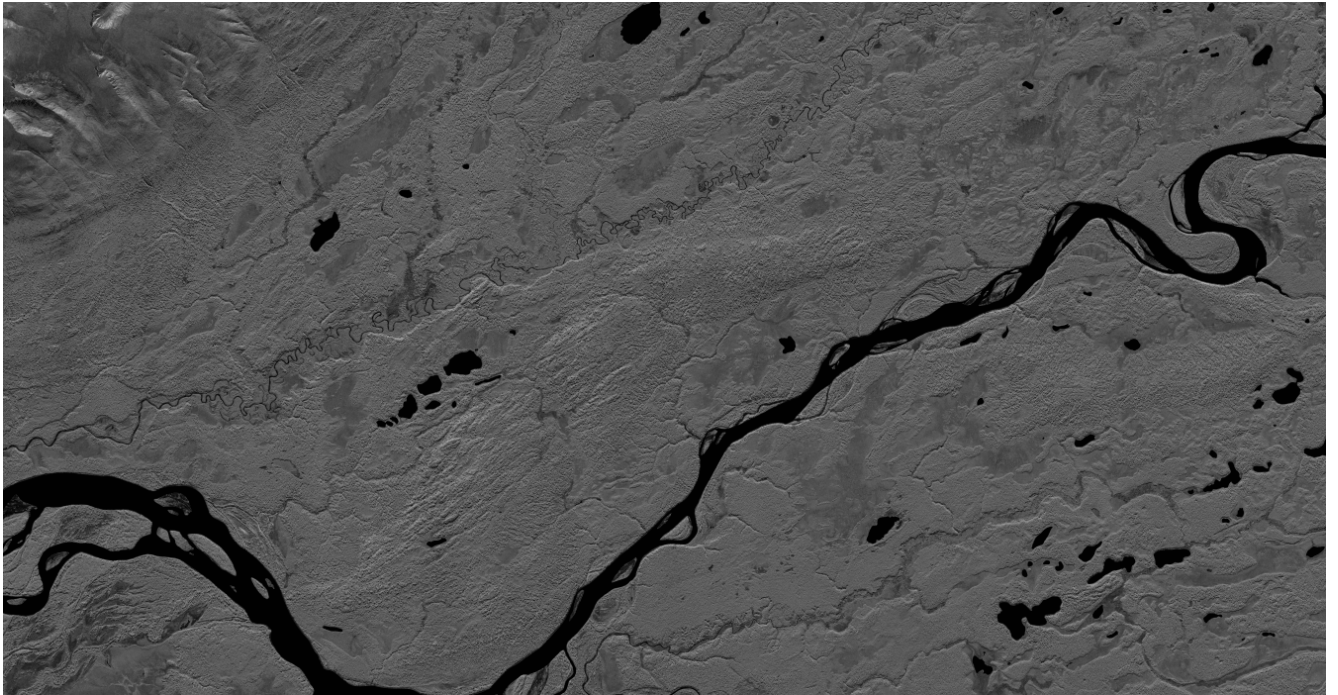


Рисунок Д.9 – Девятый РЛИ земной поверхности района города Анкоридж,  
Аляска

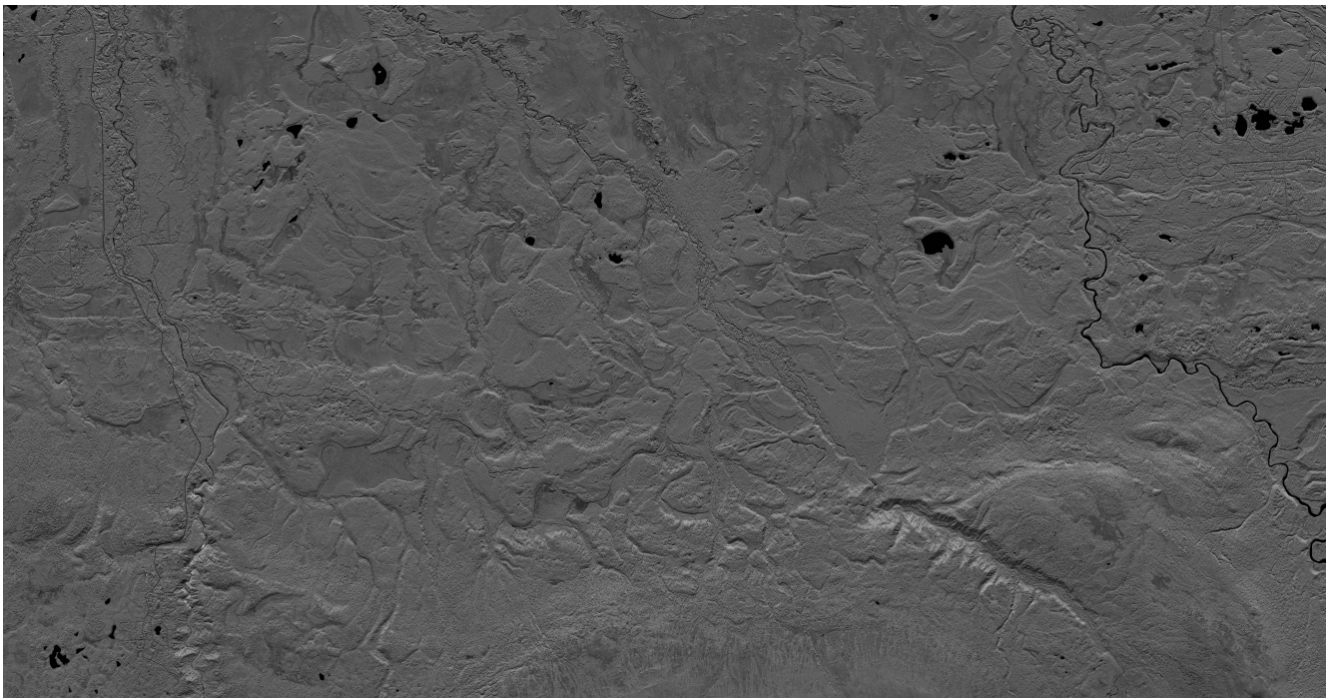


Рисунок Д.10 – Десятый РЛИ земной поверхности района города Анкоридж,  
Аляска

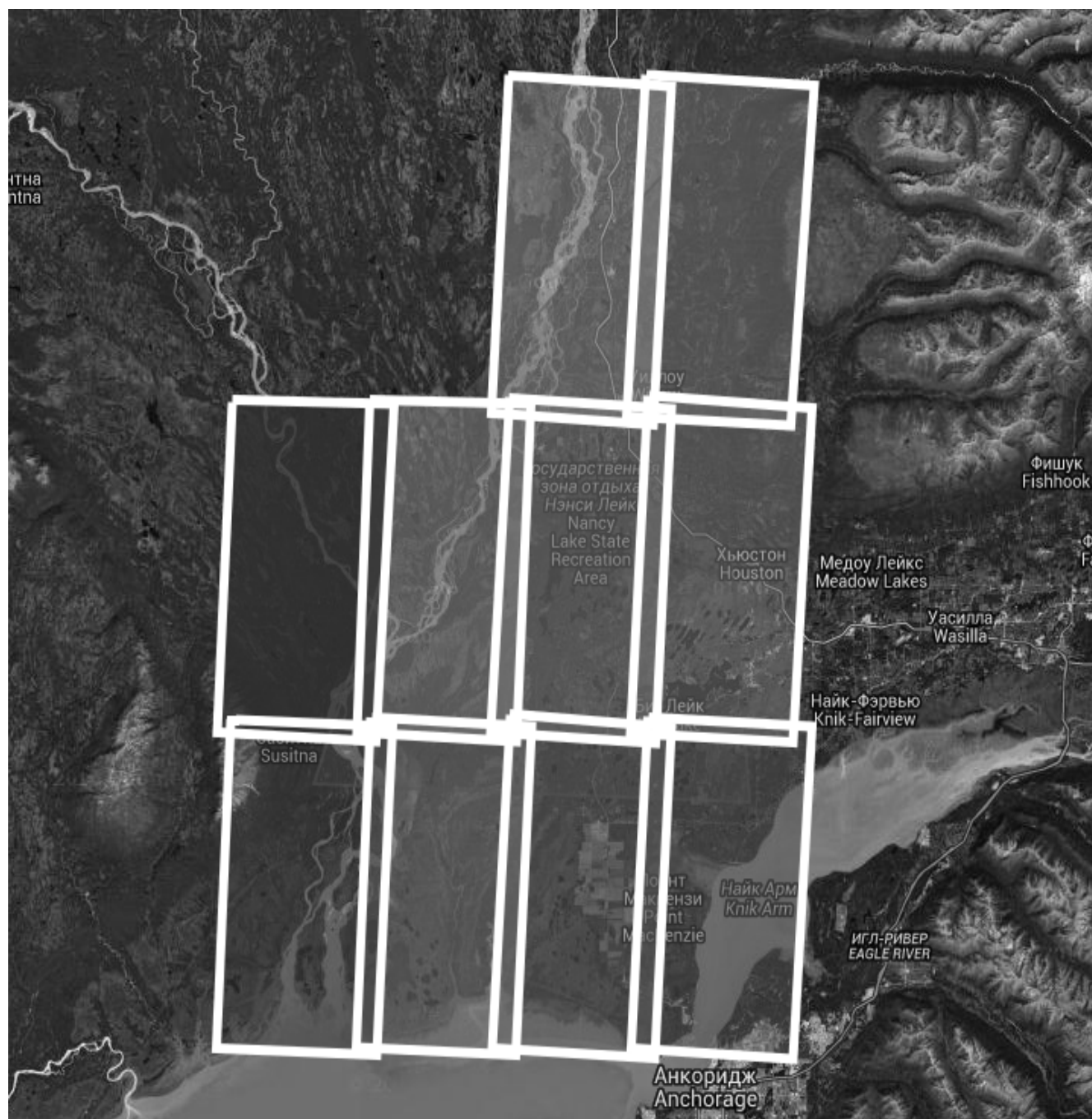


Рисунок Д.11 – Взаимное расположение на местности 10 сшиваемых РЛИ земной поверхности (обозначены прямоугольниками) района города Анкоридж, Аляска



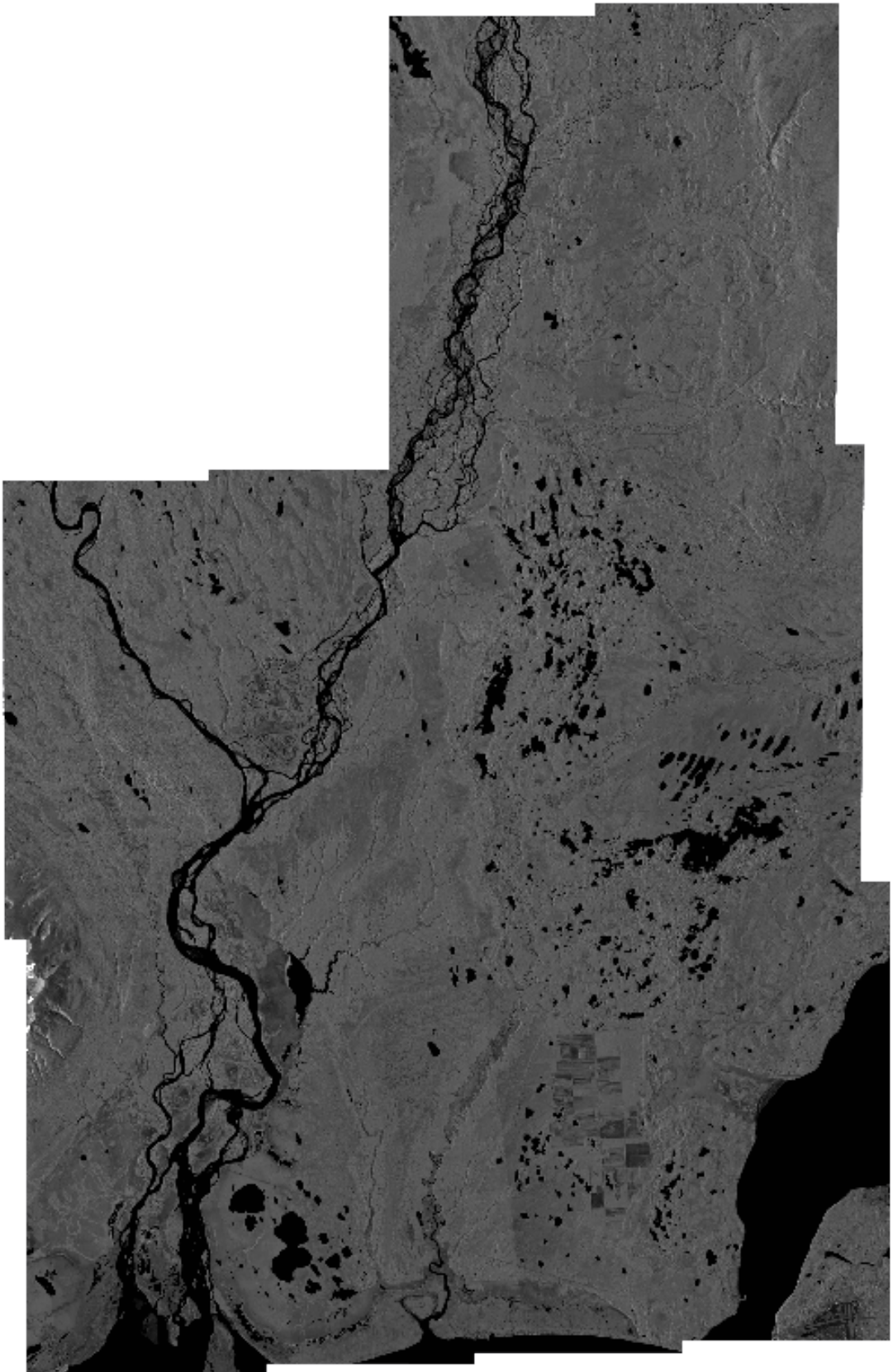


Рисунок Д.12 – Результаты сшивки 10 РЛИ земной поверхности района города  
Анкоридж, Аляска



Рисунок Д.13 – РЛИ земной поверхности L-диапазона, полученное с помощью  
РСА «Компакт»

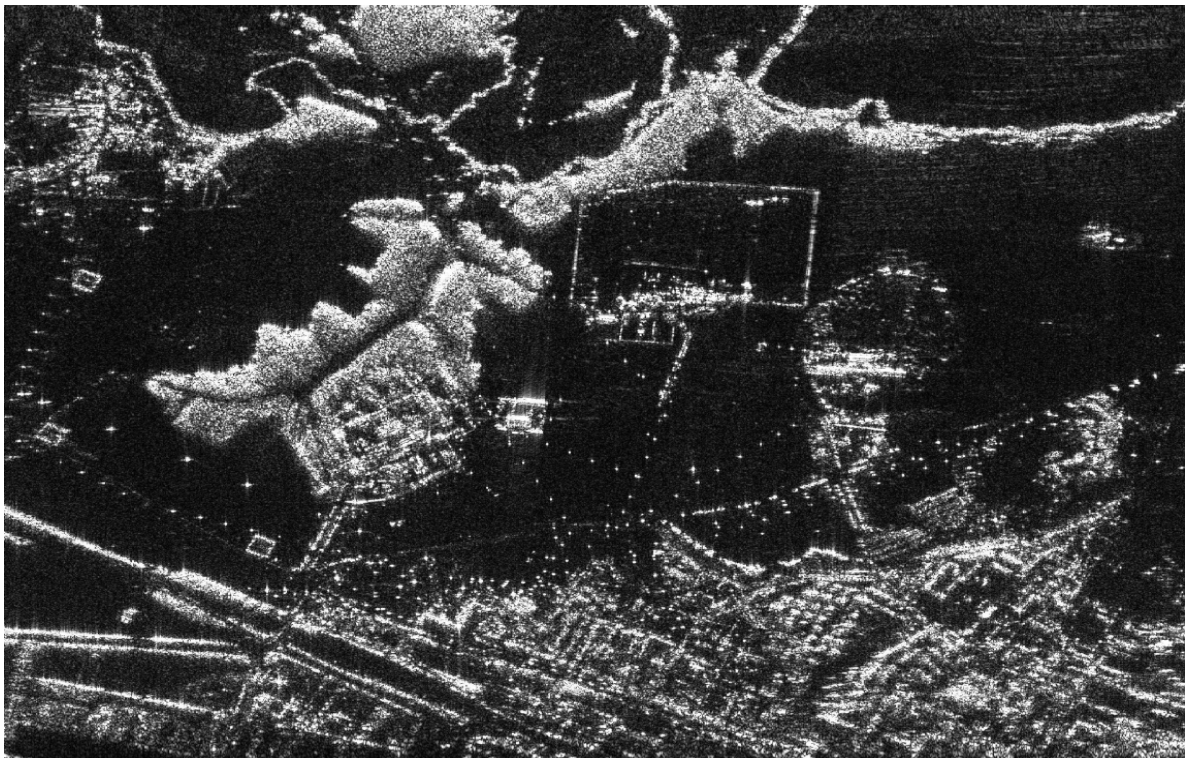


Рисунок Д.14 – РЛИ земной поверхности УКВ-диапазона (VHF), полученное с  
помощью РСА «Компакт»

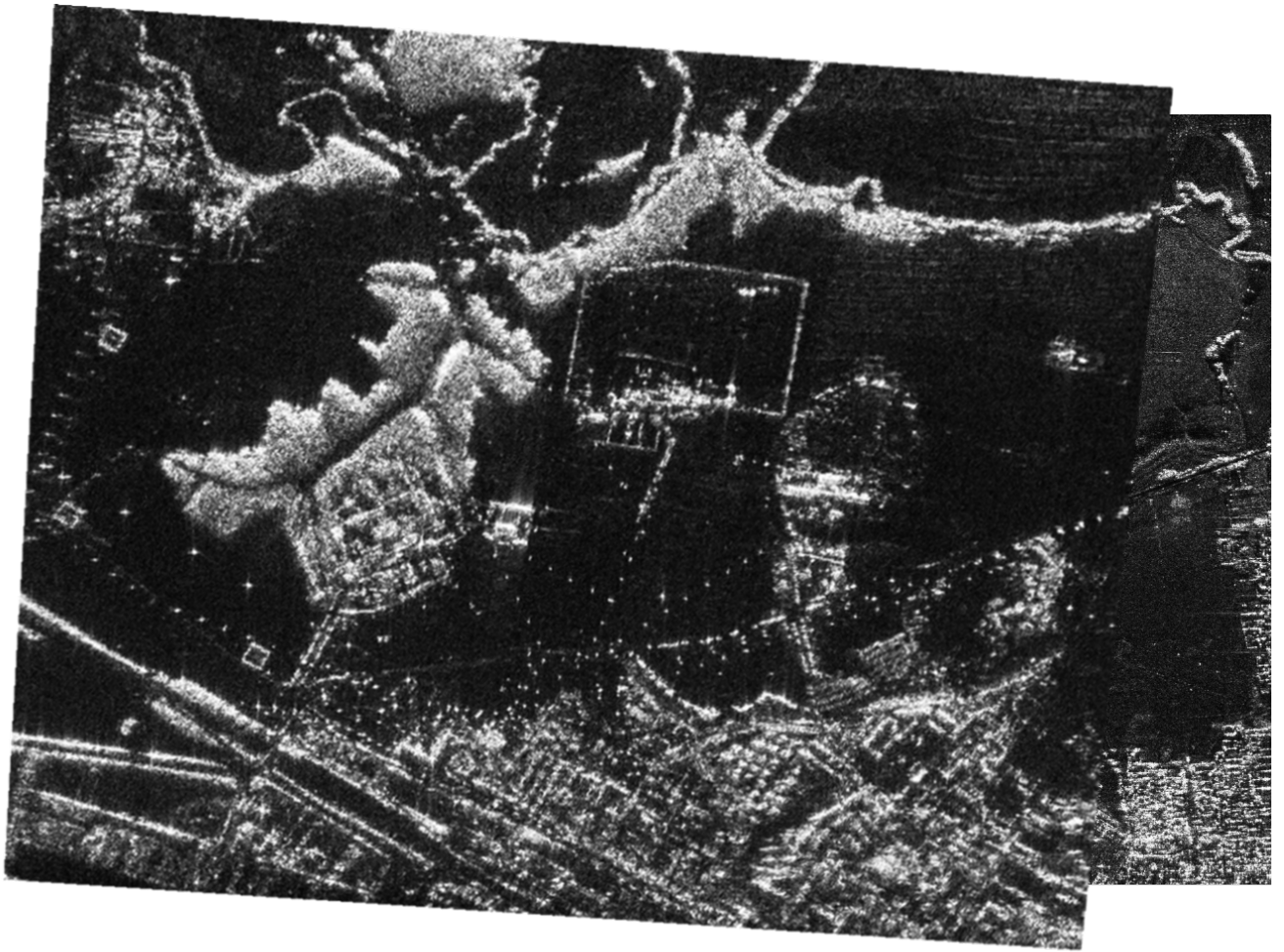


Рисунок Д.15 – Сшивка РЛИ L- и УКВ-диапазонов одной и той же местности



Рисунок Д.16 – Первый искаженный фрагмент РЛИ земной поверхности



Рисунок Д.17 – Второй искаженный фрагмент РЛИ земной поверхности



Рисунок Д.18 – Третий искаженный фрагмент РЛИ земной поверхности



Рисунок Д.19 – Четвертый искаженный фрагмент РЛИ земной поверхности

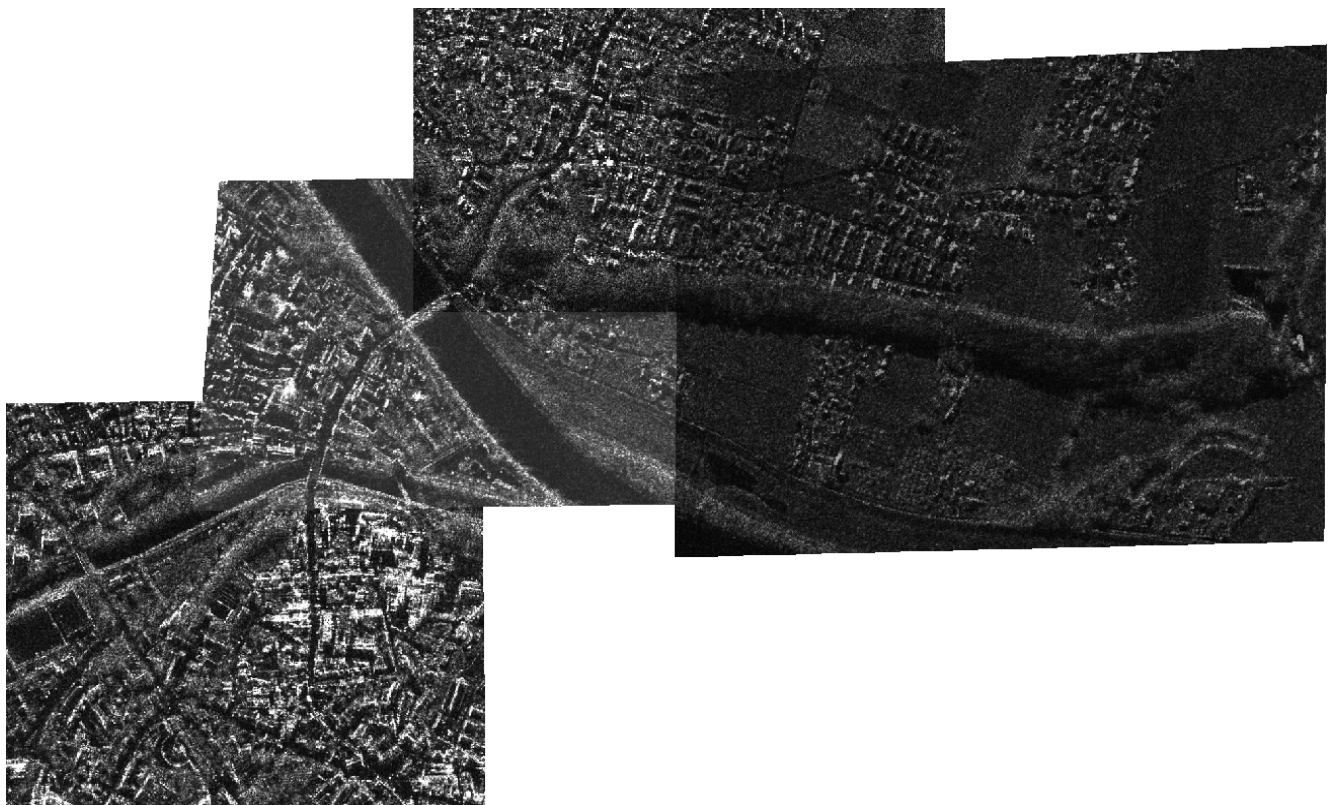
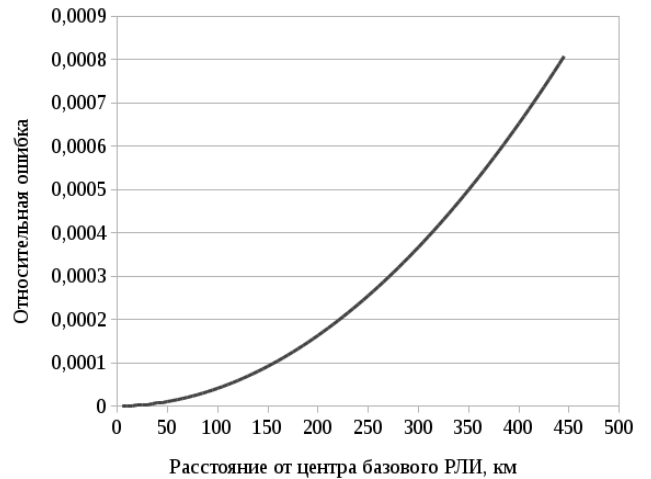
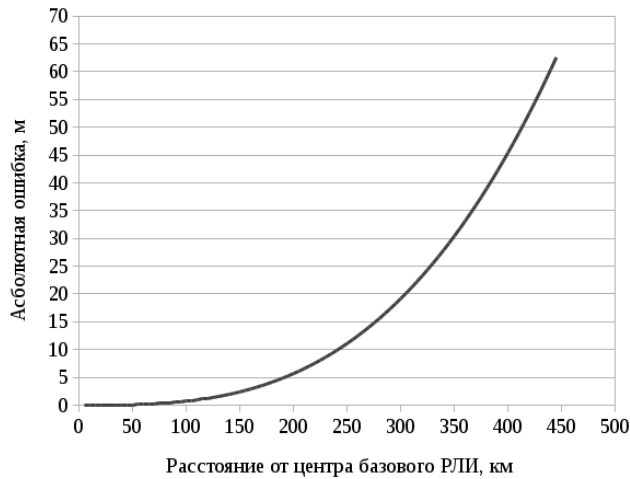


Рисунок Д.20 – Результат сшивки искаженных фрагментов РЛИ земной поверхности

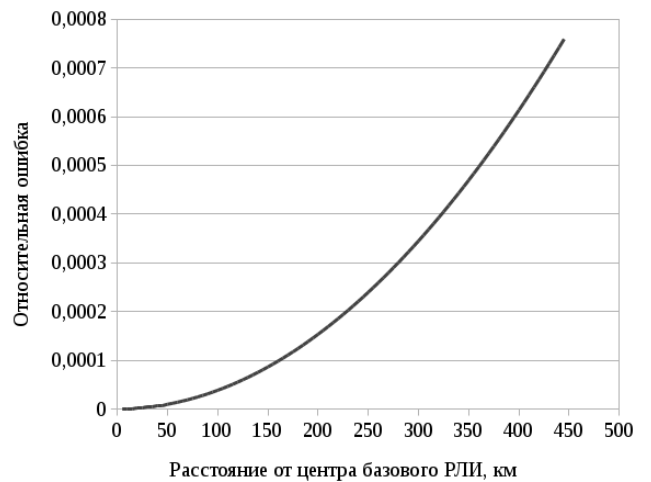
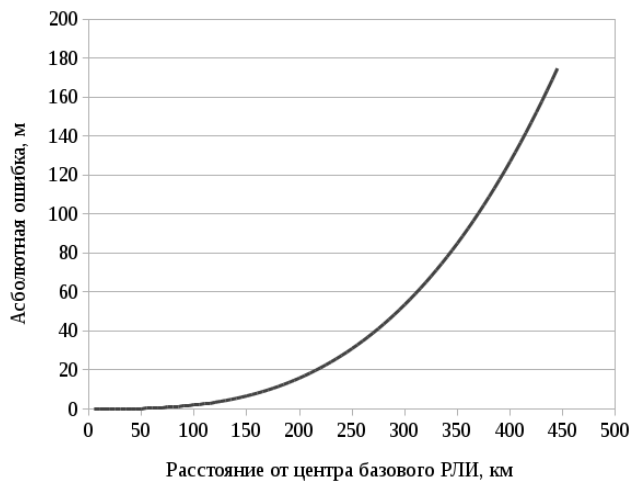
**Приложение Е. Абсолютная и относительная ошибки определения  
расстояния на плоскости единой радиолокационной карты**



a)

б)

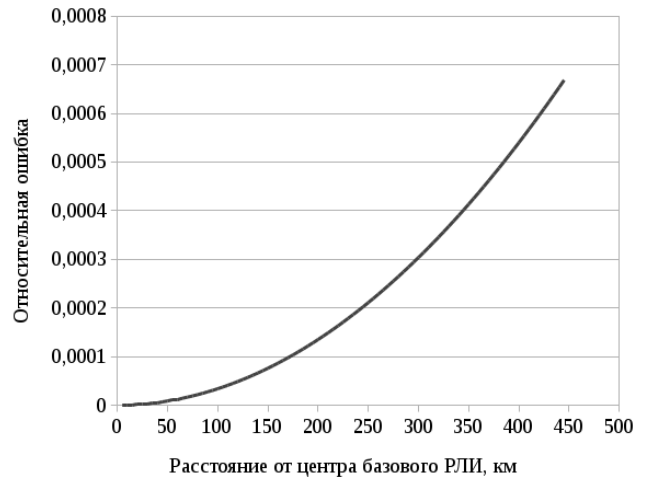
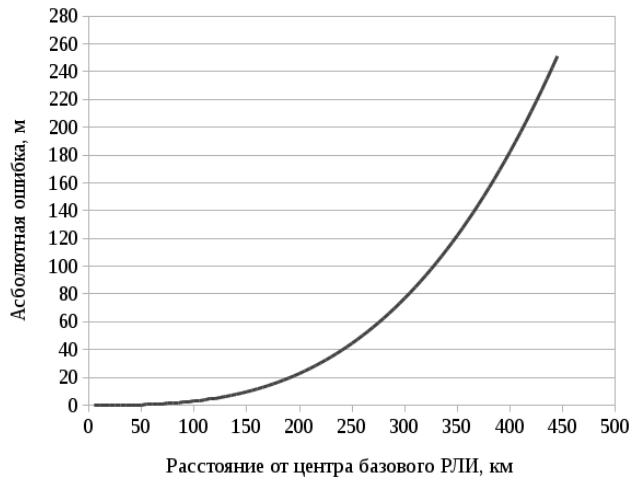
Рисунок Е.1 – Абсолютная (а) и относительная (б) ошибки определения  
расстояния на плоскости единой радиолокационной карты при  $\alpha = 10^\circ$



a)

б)

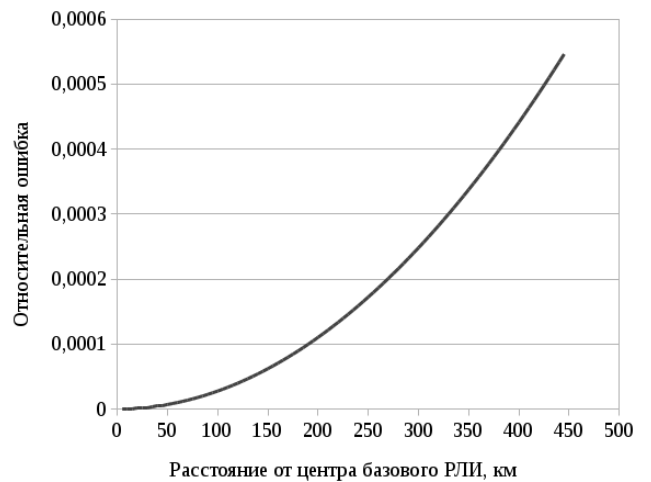
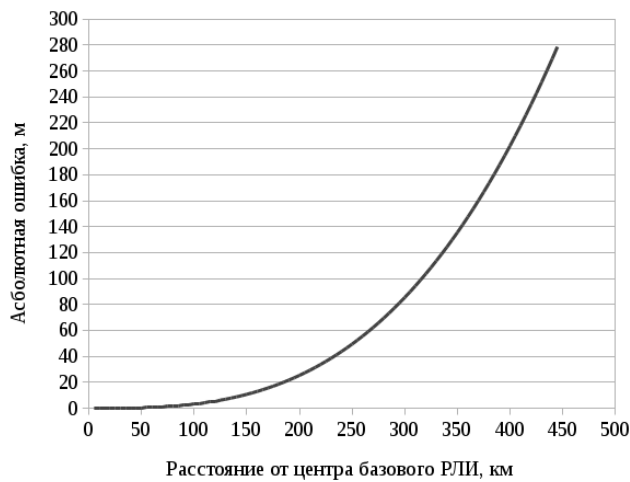
Рисунок Е.2 – Абсолютная (а) и относительная (б) ошибки определения  
расстояния на плоскости единой радиолокационной карты при  $\alpha = 30^\circ$



а)

б)

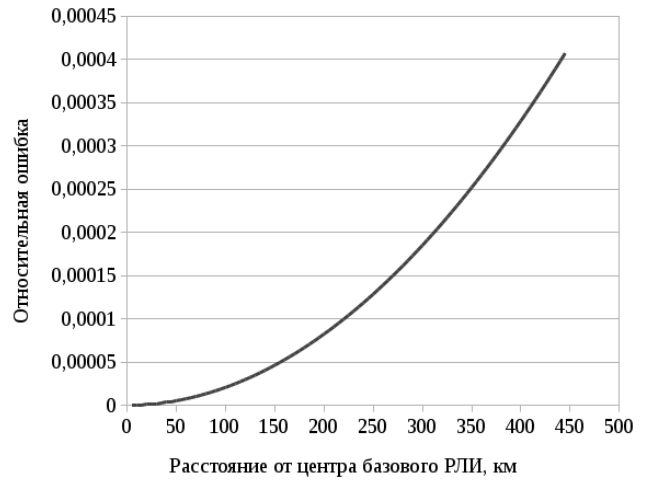
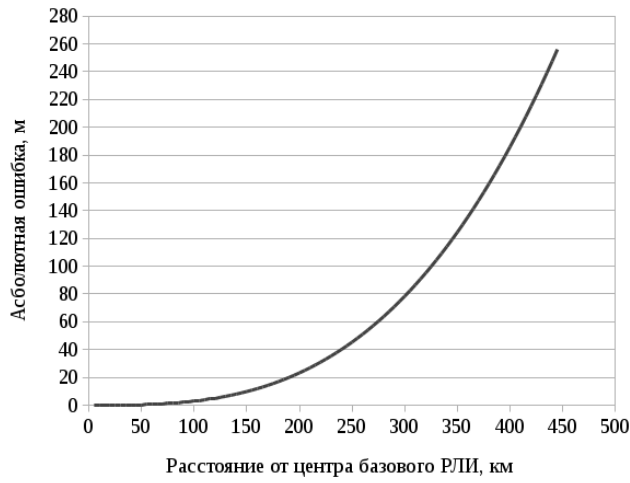
Рисунок Е.3 – Абсолютная (а) и относительная (б) ошибки определения расстояния на плоскости единой радиолокационной карты при  $\alpha = 50^{\circ}$



а)

б)

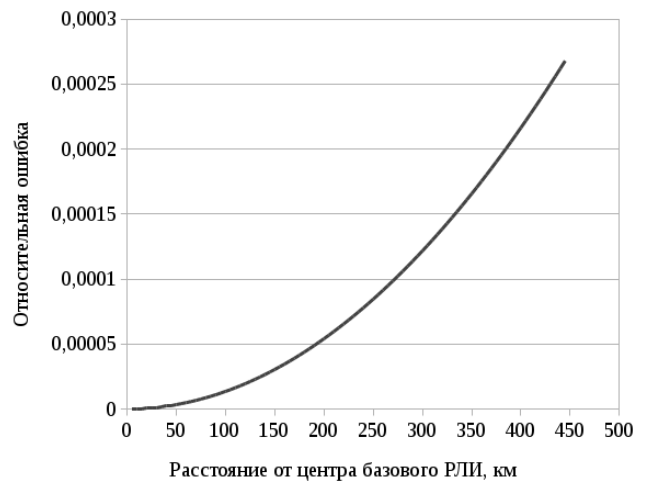
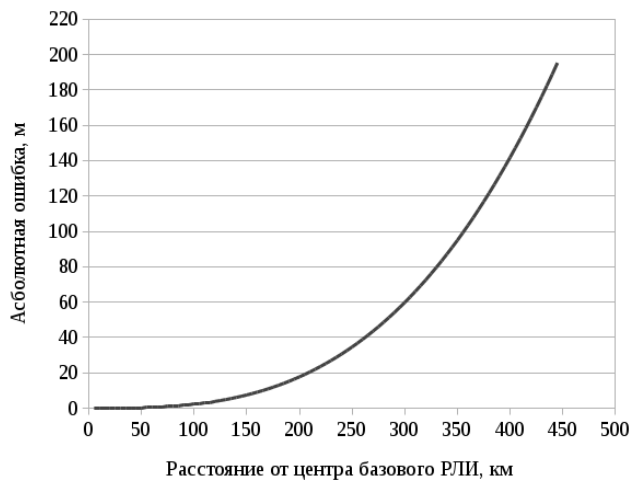
Рисунок Е.4 – Абсолютная (а) и относительная (б) ошибки определения расстояния на плоскости единой радиолокационной карты при  $\alpha = 70^{\circ}$



а)

б)

Рисунок Е.5 – Абсолютная (а) и относительная (б) ошибки определения расстояния на плоскости единой радиолокационной карты при  $\alpha = 90^0$

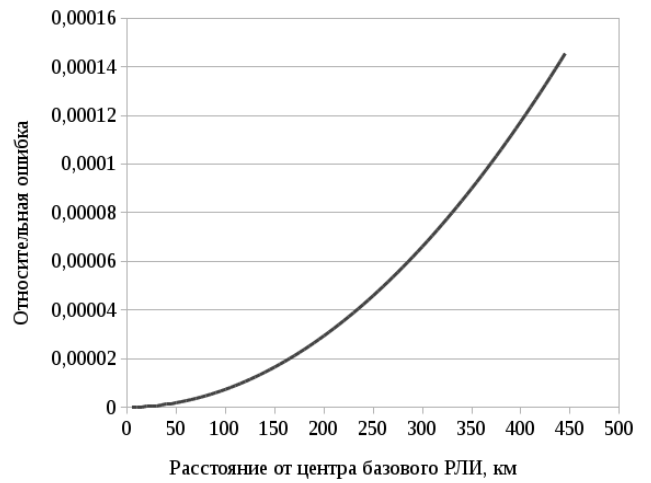
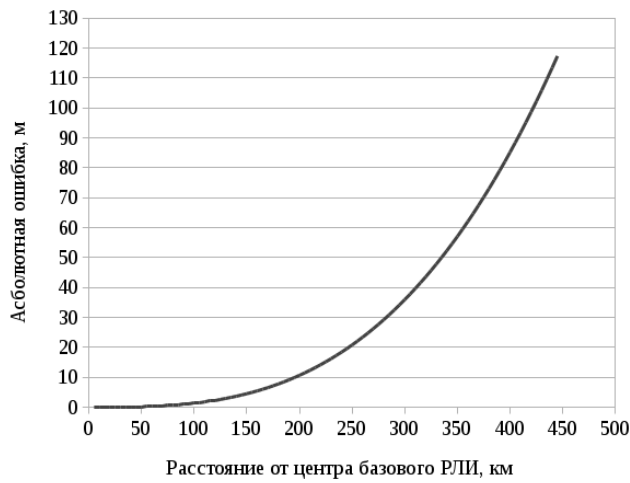


а)

б)

Рисунок Е.6 – Абсолютная (а) и относительная (б) ошибки определения расстояния на плоскости единой радиолокационной карты при  $\alpha = 110^0$

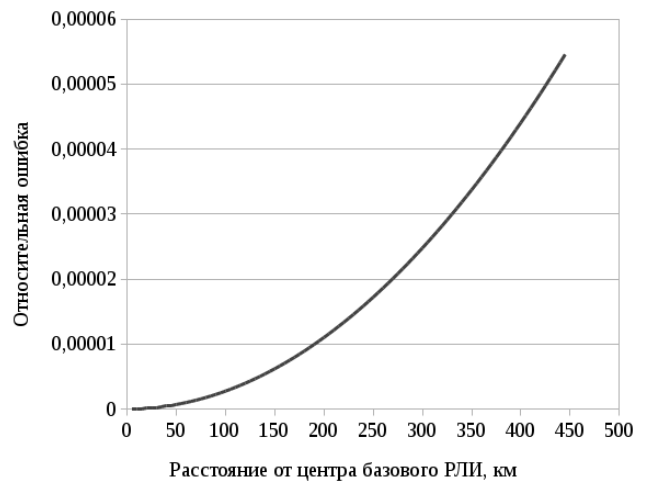
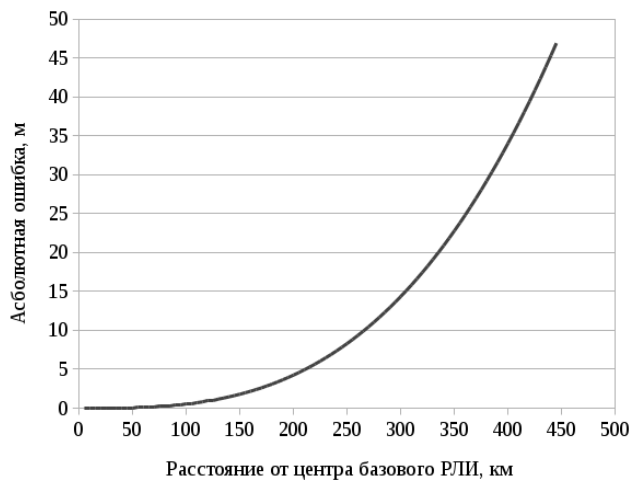




а)

б)

Рисунок Е.7 – Абсолютная (а) и относительная (б) ошибки определения расстояния на плоскости единой радиолокационной карты при  $\alpha = 130^\circ$



а)

б)

Рисунок Е.8 – Абсолютная (а) и относительная (б) ошибки определения расстояния на плоскости единой радиолокационной карты при  $\alpha = 150^\circ$