

На правах рукописи



Романов Александр Алексеевич

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

Специальность: 05.12.14 – «Радиолокация и радионавигация»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016 г.

Работа выполнена на кафедре 401 «Радиолокация и радионавигация» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Татарский Борис Григорьевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Карпов Олег Анатольевич
доктор технических наук, старший научный сотрудник
АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР»

Каргашин Юрий Дмитриевич
кандидат технических наук, доцент, главный специалист департамента
подготовки авиационного персонала ПАО «Компания «Сухой»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук

Защита состоится «06» июня 2017 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться на сайте ma.i.ru и в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.03
д.т.н., с.н.с.



М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Радиолокационные станции (РЛС) землеобзора являются эффективным средством решения задач мониторинга земной поверхности независимо от метеорологических условий и времени суток. Современные РЛС с синтезированием апертуры (РСА) позволяют получить радиолокационные изображения (РЛИ) земной поверхности высокого разрешения.

Дешифрирование данных радиолокационного мониторинга является одной из важнейших задач обработки получаемых изображений. При этом разработка систем автоматизированного и автоматического дешифрирования РЛИ позволит повысить оперативность получения результатов радиолокационного мониторинга.

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 элементов внешнего ориентирования и географической привязки РЛИ земной поверхности может достигать больших значений вследствие совокупности влияния множества факторов (рельефа местности, траекторных нестабильностей и прочих), что делает невозможным формирование радиолокационной карты путем простого наложения отдельных РЛИ согласно указанным данным.

В настоящее время не существует алгоритмов и программных комплексов, позволяющих проводить сшивку РЛИ земной поверхности без использования элементов внешнего ориентирования и географической привязки. В то время как привязка РЛИ к местности зачастую осуществляется операторами вручную по заранее определенным эталонным объектам. Данные факторы значительно увеличивают время формирования единой радиолокационной карты.

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

моделирований, 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», 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 рассмотрен общий подход к обработке данных радиолокационного мониторинга, проведен краткий обзор современных отечественных и зарубежных РЛС землеобзора авиационного и космического базирования, а также проведен аналитический обзор

существующих алгоритмов и программных комплексов сшивки изображений различных типов. Выяснено, что в настоящее время не существует алгоритмов и программных комплексов, позволяющих полностью автоматически проводить совмещение и сшивку РЛИ земной поверхности без использования информации об элементах внешнего ориентирования или географической привязки. Сшивка в таких случаях должна производиться по областям перекрытия на РЛИ земной поверхности.

В этой связи особое внимание уделено анализу существующих алгоритмов обработки изображений, совокупность которых потенциально позволяет производить автоматический поиск опорных точек на РЛИ на основе их областей перекрытия. Точку, попавшую в область перекрытия сшиваемых или сопоставляемых изображений, будем называть опорной, если известны ее координаты в системах координат (СК) обоих изображений. Обнаружено, что для успешного автоматического поиска опорных точек необходимы семантически насыщенные РЛИ (РЛИ, которым присущи ярко выраженные изменения контрастности в пределах кадра изображения). В то время как аналитический обзор методов определения качества изображений показал, что в настоящее время не существует методов количественной оценки насыщенности семантики изображения, подходящих для РЛИ.

Важным этапом процесса сшивки изображений является определение их ориентации друг относительно друга. В этой связи проведен анализ существующих в настоящее время подходов к вычислению ориентации изображений с помощью их областей перекрытия, по результатам которого наиболее подходящими выбраны алгоритмы выделения, описания и сопоставления точек интереса.

Детально рассматриваются два наиболее эффективных алгоритма выделения и описания точек интереса SURF и SIFT. Две точки интереса различных изображений составляют опорную точку, если евклидово расстояние между их векторами описания (дескрипторами) не превышает порогового значения. Алгоритм SIFT находит больше (до 1,5 раз) точек интереса в сравнении с SURF при обработке одного и того же изображения, однако при этом затрачивает примерно в 2,5 раза больше времени и значительно больший объем ОЗУ. Дескрипторы точек интереса SURF обладают уязвимостью к повороту семантики изображения, что ведет к снижению количества найденных опорных точек при значениях угла поворота в окрестности $\pi/4 + \pi/2$. Кроме того, проведен краткий обзор алгоритмов поиска ближайшего соседа, подходящих для автоматического сопоставления найденных точек интереса с целью получения опорных точек. Среди рассмотренных точных алгоритмов выделяется алгоритм с разбиением в k -мерное (kd -) дерево, как наиболее эффективный в рассматриваемом случае.

В заключении сформулированы цели и постановка задачи на исследование.

Во второй главе проводится поэтапная разработка искомого алгоритма сшивки РЛИ земной поверхности. В первую очередь формулируются критерии оптимального алгоритма сшивки.

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

$$I_i: P_i \rightarrow B_i, P_i \subset \mathbb{R}^2, B_i \subset \mathbb{R}, \quad (1)$$

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

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

$$F_i: P_{Ei} \rightarrow P_i, P_{Ei} \subset \mathbb{R}^3, \quad (2)$$

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

$$J_i: P_{Ei} \rightarrow P_{Si}, P_{Si} \subset \mathbb{R}^2, \quad (3)$$

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

Для входного набора перекрывающихся РЛИ земной поверхности Ω имеем:

$$\forall I_i \in \Omega \exists I_j \in \Omega: O_{Eij} = P_{Ei} \cap P_{Ej} \neq \emptyset, \quad (4)$$

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 :

$$O_{ij}^i = F_i(O_{Eij}), O_{ij}^j = F_j(O_{Eij}), O_{ij}^i \subset P_i, O_{ij}^j \subset P_j. \quad (5)$$

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

$$G_i: P_i \rightarrow L_i, L_i \subset P_R, P_R = \bigcup_i L_i, \quad (6)$$

где L_i – множество точек РЛИ земной поверхности I_i , преобразованного в единую СК, а P_R –

искомая единая радиолокационная карта такая, что:

$$\exists af: P_S \rightarrow P_R, \quad (7)$$

где af – некоторое аффинное преобразование. Условие (7) позволяет сохранить дешифровочные признаки объектов мониторинга и представление об их взаимном расположении на местности. Фактически данное условие говорит о минимизации угла между плоскостями единой радиолокационной карты и земной поверхностью.

Для существования взаимно-однозначного отображения (7) необходимо, чтобы для всех пар перекрывающихся РЛИ I_i и I_j из (4) выполнялось уравнение:

$$\int_{x_E} \|G_i(x^i) - G_j(x^j)\|^2 dx_E = 0, \quad (8)$$

$$x_E \in O_{Eij}, x^i = F_i(x_E), x^j = F_j(x_E), \quad (9)$$

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.

Первый критерий оптимальности искомого алгоритма сшивки РЛИ земной поверхности, опираясь на (8) и (9), может быть представлен, как:

$$E = \sum_i \sum_j E_{ij} = 0, \quad E_{ij} = \begin{cases} \int_{x_E} \|G_i(x^i) - G_j(x^j)\|^2 dx_E, & \text{если } O_{Eij} \neq \emptyset, \\ 0, & \text{если } O_{Eij} = \emptyset. \end{cases} \quad (10)$$

Второй критерий оптимальности алгоритма сшивки РЛИ земной поверхности с учетом пояснений к условию (7) представим, как:

$$\alpha_{SR} = 0, \quad (11)$$

где α_{SR} – угол между плоскостями P_S и P_R .

Далее, проводится анализ возможных геометрических искажений на РЛИ земной поверхности и делается вывод о невозможности построения оптимального алгоритма сшивки и необходимости разработки квазиоптимального алгоритма автоматической сшивки РЛИ земной поверхности.

Для автоматического 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. Анализ работы алгоритма SURF показал

взаимосвязь между снижениями количества сопоставленных точек интереса и количеством примесей областей в их окрестности, обрабатываемых на одном РЛИ и не обрабатываемых на другом, при вычислении двумерного вейвлет-преобразования Хаара на этапе поиска ориентации точки интереса (рисунок 1).

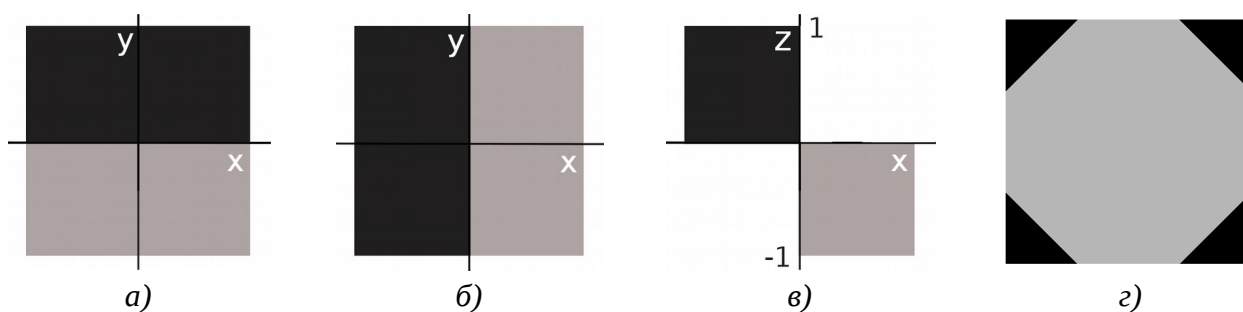


Рисунок 1 – Горизонтальный (а) и вертикальный (б) вейвлеты Хаара, проекция горизонтального вейвлета Хаара на плоскость, перпендикулярную изображению (в), а также примеси не обрабатываемых областей при угле поворота 45° (г, обозначены черным)

Вследствие ошибок, привносимых областями примесей, ориентация точек интереса определяется с погрешностью, что может приводить к значительным ошибкам при вычислении ее дескриптора. Для ослабления наблюдаемой уязвимости необходимо уменьшить долю примесей при всевозможных углах поворота одного РЛИ относительно другого с одновременным сохранением всей необходимой для обработки области в процессе вычисления двумерного вейвлет-преобразования и прямоугольного характера используемого двумерного вейвлета. Далее, предлагается замена исходного двумерного вейвлета Хаара (с размером стороны в $4s$, где s – коэффициент масштаба уменьшенной копии обрабатываемого изображения) составными вейвлетами Хаара, представленными на рисунке 2.

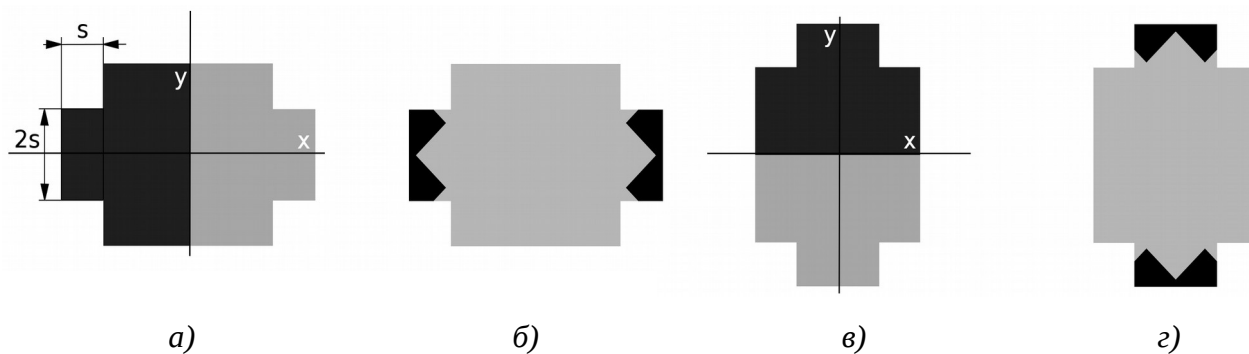


Рисунок 2 – Составные вейвлеты (серым обозначена область значений -1, черным – +1) для горизонтального (а) и вертикального (в) двумерных вейвлет-преобразований и примеси в них (обозначены черным) при угле поворота изображений 45° (б и г, соответственно)

В этом случае максимумы долей примесей значительно снижаются (рисунок 3).

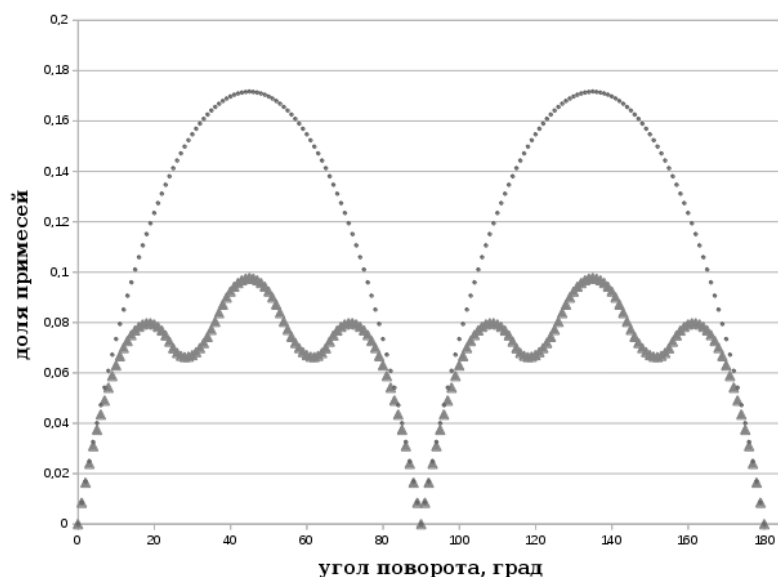


Рисунок 3 – Зависимость доли примесей от угла поворота одного РЛИ относительно другого при использовании двумерного вейвлета Хаара (обозначена точками) и предлагаемого двумерного вейвлета (обозначена треугольниками)

Искомый алгоритм определения количественной оценки насыщенности семантики РЛИ основывается на том же подходе, что и выделение точек интереса при использовании алгоритма SURF. Наличие таких точек интереса воспринимается, как показатель насыщенности семантики изображения — чем больше точек интереса, тем насыщеннее изображение. Применение схожего с алгоритмом SURF подхода позволяет дать более корректную оценку насыщенности семантики изображений с точки зрения разрабатываемого алгоритма сшивки и позволяет установить наиболее корректные требования ко входным РЛИ на основе получаемой характеристики.

Выделение точек интереса происходит путем обнаружения локальных максимумов детерминанта матриц следующего вида:

$$H(x, y, \sigma) = \begin{vmatrix} L_{xx}(x, y, \sigma) & L_{xy}(x, y, \sigma) \\ L_{yx}(x, y, \sigma) & L_{yy}(x, y, \sigma) \end{vmatrix}, \quad (12)$$

$$L_{xx}(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \sum_a \sum_b e^{-\frac{-(a)^2+(b)^2}{2\sigma}} I(x-a, y-b), \quad (13)$$

где σ – степень размытия изображения фильтром Гаусса, а $I(x, y)$ – обрабатываемое изображение. Компоненты матрицы $H(x, y, \sigma)$ вычисляются по аналогии с (13). Благодаря использованию

фильтра Гаусса, данный подход устойчив к шуму на РЛИ. Для выделения более значимых точек на следующем этапе выполняется пороговая фильтрация полученных локальных максимумов, бракуя значения меньше T . Искомый показатель насыщенности семантики изображения S вычисляется путем подсчета оставшихся после вышеописанной фильтрации точек интереса.

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

$$S_{ps} = S/S_I, \quad (14)$$

где S_I – площадь обрабатываемого изображения.

Для повышения чувствительности к малым областям насыщенной семантики на РЛИ большого размера вводится матричный показатель насыщенности следующим образом. На изображение накладывается сетка с некоторым шагом P . Для каждого узла сетки с координатами (i,j) подсчитывается количество N_{ij} найденных локальных максимумов, попадающих в окрестность данного узла с радиусом P . Таким образом, получаем матрицу S_m , состоящую из N_{ij} , которая фактически описывает распределение насыщенности семантики на РЛИ.

Далее, рассматриваются два подхода к поиску ориентации двух РЛИ земной поверхности с перекрытием. Для двух перекрывающихся РЛИ земной поверхности первый критерий оптимальности (10) можно переписать в виде:

$$E_{12} = \int_{x_E} \|G_{12}(x^1) - (x^2)\|^2 dx_E \rightarrow 0, \quad (15)$$

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.

Первый подход основан на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС). В качестве обучающей выборки рассматриваются найденные опорные точки в области перекрытия РЛИ. В качестве показателя эффективности ξ используется среднеквадратичное отклонение (СКО) точек, полученных с помощью ИНС, от соответствующих точек проверочной выборки.

С учетом специфики решаемой задачи из множества рассмотренных архитектур ИНС для детального анализа выбраны ИНС с прямыми и перекрестными связями. В качестве минимизируемой функции невязки используется сумма квадратов ошибок откликов сети на обучающей выборке, что фактически является дискретным приближением первого критерия

оптимальности (15) для пары перекрывающихся РЛИ земной поверхности.

Наилучший показатель эффективности ξ для рассматриваемых типов искажений среди указанных архитектур ИНС с различными функциями активации (ФА) нейронов показала трехслойная ИНС с перекрестными связями с $N_1 = 3$, $N_2 = 5$ и $N_1 = 5$, $N_2 = 4$, где N_1 и N_2 – количество нейронов первого и второго скрытых слоев соответственно (рисунок 4).

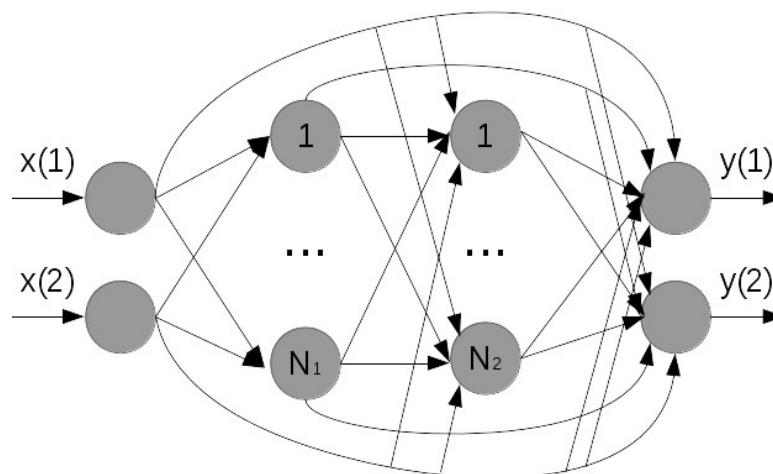


Рисунок 4 – Трехслойная нейронная сеть с перекрестными связями

В данной ИНС в качестве ФА первого скрытого слоя использовалась логистическая ФА:

$$F(S) = \frac{1}{1 + e^{-S}}, \quad S = \sum_i w_i x_i + w_0, \quad (16)$$

где w_i – весовые коэффициенты входных связей нейрона, а x_i – входные сигналы; а в качестве ФА второго скрытого и выходного слоев – линейная ФА $F(S) = S$.

К сожалению, нейросетевой подход к решению задачи ориентации перекрывающихся РЛИ нестабилен и может использоваться только при большом перекрытии РЛИ земной поверхности с большим количеством найденных опорных точек. В противном случае, несмотря на приемлемые значения показателя эффективности ξ , абсолютные значения отклонения отдельных, рядом стоящих точек могут значительно колебаться, что приводит к «дрожанию» изображений объектов на РЛИ после преобразования и значительно искажает их дешифровочные признаки.

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 . Анализ геометрических искажений и литературы показал, что искомое преобразование является проективным:

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ t \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{pmatrix}, \quad \det M \neq 0, \quad \text{где } u = \frac{u'}{t}, \quad v = \frac{v'}{t}, \quad (17)$$

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.

Пусть известно N опорных точек, тогда первый критерий оптимальности (15) с учетом (17) в дискретном случае можно записать в виде:

$$E_{12} = \sum_{i=1}^N (u_i \cdot (gx_i + hy_i + 1) - ax_i - by_i - c)^2 + \sum_{i=1}^N (v_i \cdot (gx_i + hy_i + 1) - dx_i - ey_i - f)^2 \rightarrow 0. \quad (18)$$

Предполагая, что ошибка определения координат опорных точек имеет распределение Гаусса с нулевым математическим ожиданием, для определения значения параметров искомого преобразования (17) используется метод наименьших квадратов с М-оценками при минимизации функции невязки:

$$E_{12} = \sum_{i=1}^N w_{il} \cdot (u_i \cdot (gx_i + hy_i + 1) - ax_i - by_i - c)^2 + \sum_{i=1}^N w_{il} \cdot (v_i \cdot (gx_i + hy_i + 1) - dx_i - ey_i - f)^2. \quad (19)$$

Процедура определения параметров проективного преобразования является итеративным процессом. Весовые коэффициенты w_{il} вычисляются с помощью параметров искомого преобразования предыдущей итерации:

$$w_{il} = \frac{1}{(1 + r_{il}^2)^2}, \quad r_{il} = \|G_{12}^{l-1}(\mathbf{x}_i^1) - \mathbf{x}_i^2\|, \quad w_{i1} = 1, \quad (20)$$

где l – номер текущей итерации.

Приравнивая к нулю первые производные (19), получаем:

$$\frac{\partial E_{12}}{\partial c} = -2 \sum_{i=1}^N (u_i \cdot (gx_i + hy_i + 1) - ax_i - by_i - c) = 0, \quad (21)$$

$$\frac{\partial E_{12}}{\partial f} = -2 \sum_{i=1}^N w_{il} (v_i \cdot (gx_i + hy_i + 1) - dx_i - ey_i - f) = 0. \quad (22)$$

Выражая c из (21), имеем

$$\sum_{i=1}^N w_{il} c_i = \sum_{i=1}^N (g_l u_i x_i + h_l u_i y_i + u_i - a_l x_i - b_l y_i), \quad (23)$$

$$c_i = g_l \overline{ux_w} + h_l \overline{uy_w} + \overline{u_w} - a_l \overline{x_w} - b_l \overline{y_w}, \quad (24)$$

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. Аналогичным образом получаем выражение для f .

Подставляя найденные уравнения для c и f в уравнения для частных производных (19) по остальным искомым параметрам проективного преобразования, в конечном итоге, получаем:

$$S_{ux ux} = \sum_{i=1}^N w_{il} (u_i x_i - \overline{ux_w})^2, \quad S_{ux uy} = \sum_{i=1}^N w_{il} (u_i x_i - \overline{ux_w})(u_i y_i - \overline{uy_w}), \quad (25)$$

$$\begin{pmatrix} g \\ h \\ a \\ b \\ d \\ e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{ux x} & S_{uy x} & -S_{x x} & -S_{x y} & 0 & 0 \\ S_{ux y} & S_{uy y} & -S_{x y} & -S_{y y} & 0 & 0 \\ S_{vx x} & S_{vy x} & 0 & 0 & -S_{x x} & -S_{x y} \\ S_{vx y} & S_{vy y} & 0 & 0 & -S_{x y} & -S_{y y} \\ S_{ux ux} + S_{vx vx} & S_{uy ux} + S_{vy vx} & -S_{ux x} & -S_{ux y} & -S_{vx x} & -S_{vx y} \\ S_{ux uy} + S_{vx vy} & S_{uy uy} + S_{vy vy} & -S_{uy x} & -S_{uy y} & -S_{vy x} & -S_{vy y} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -S_{u x} \\ -S_{u y} \\ -S_{v x} \\ -S_{v y} \\ -S_{ux u} - S_{vx v} \\ -S_{uy u} - S_{vy v} \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Определитель матрицы в (26) 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.

Условиями выхода из итеративного процесса являются:

$$\|p_l - p_{l-1}\| < \zeta, \quad p_l = \|a_l \ b_l \ c_l \ d_l \ e_l \ f_l \ g_l \ h_l\|^T, \quad \text{или } l > T_l, \quad (27)$$

где ζ и T_l – заранее заданные пороговые величины.

Далее, рассматривается построение графа связности из множества пар перекрывающихся РЛИ земной поверхности с найденной ориентацией (рисунок 5). *Граф связности* – неориентированный связный граф с неотрицательными весами ребер, 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 равен

$W_{ij} = E_{ij} / N_{ij}$, где E_{ij} – крайнее значение функции невязки (на последней итерации) при вычислении взаимной ориентации, а N_{ij} – количество достоверных опорных точек (веса (20) которых на последней итерации близки к единице).

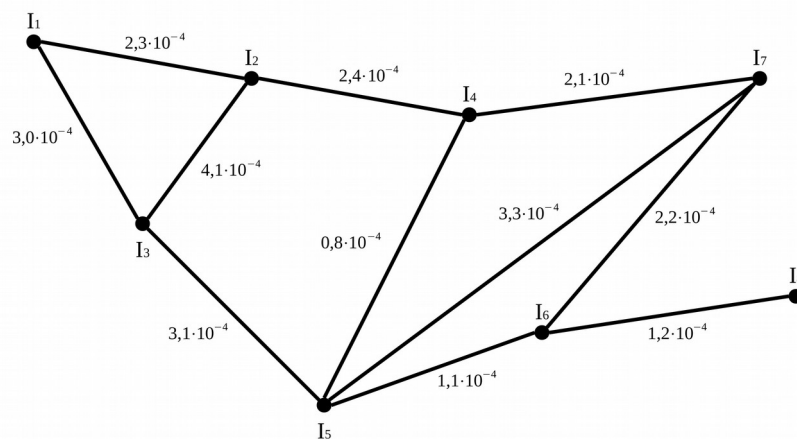


Рисунок 5 – Пример графа связности обрабатываемых РЛИ земной поверхности

С помощью графа связности можно найти преобразование между СК любых РЛИ данного графа. Так как географическая привязка каждого обрабатываемого РЛИ считается неизвестной, в качестве единой СК выбирается СК одного из РЛИ, которому соответствует вершина графа связности с максимальной степенью (количеством инцидентных ей ребер). Выбранное РЛИ назовем *базовым*. Используя алгоритм Дейкстры, в графе связности находим кратчайшие пути от вершины базового РЛИ до всех остальных. Зная преобразование СК для всех ребер (полученная ранее взаимная ориентация между вершинами ребра – перекрывающимися РЛИ), вычисляется ориентация каждого РЛИ относительно базового согласно найденному для него кратчайшему пути.

Эквивалентность единой СК и СК базового РЛИ земной поверхности подразумевает, что ориентация базового РЛИ характеризуется единичной матрицей в (17). Другими словами, плоскость базового РЛИ считается плоскостью земной поверхности. К сожалению, формирование РЛИ в РЛС землеобзора осуществляется в плоскости отличной от плоскости земной поверхности. В графе связности могут найтись РЛИ, на которые, согласно ошибочной плоскости земной поверхности базового РЛИ, якобы попал участок неба (такие участки на изображении называются фиктивными). Трансформирование таких РЛИ согласно полученной ориентации приведет к изображению бесконечных размеров. В этой связи рассматривается разработка алгоритма уточнения ориентации базового РЛИ земной поверхности, позволяющего приблизить плоскость единой радиолокационной карты к плоскости земной поверхности и избежать описанных некорректных искажений, а также способствующего минимизации второго

критерия оптимальности (11).

Точка начала СК РЛИ находится в левом верхнем углу изображения, оси Ox и Oy направлены вправо и вниз соответственно – координаты любой точки (x,y) на самом РЛИ в его СК всегда неотрицательны. Рассмотрим проективное преобразование (17) из СК РЛИ I_2 в СК РЛИ I_1 . При попадании фиктивной линии горизонта на изображение справедливо:

$$\exists x, y \in I_2 : t \rightarrow 0 \Rightarrow u \rightarrow \infty, v \rightarrow \infty, \quad (28)$$

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:

$$\forall I \in \Omega, \forall x, y \in I : t > 0. \quad (29)$$

Пусть M_B – матрица, описывающая ориентацию базового РЛИ (изначально M_B является единичной матрицей). Для достижения поставленной цели необходимо варьировать параметры g_B, h_B матрицы M_B , отвечающие за перспективные искажения. Введем функцию невязки:

$$Es(g_B, h_B) = \sum_{i=1}^N S_i^-, \quad S_i^- \in [0, 1], \quad (30)$$

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.

Особое внимание в описании алгоритма уделяется способу быстрой оценки величин S^- , так как решение «в лоб» – нахождение t для каждой точки каждого РЛИ – приводит к значительным вычислительным затратам.

Для минимизации функции невязки (30) применяется итеративный метод градиентного спуска, который прекращает свою работу по достижению одного из трех условий (l – номер итерации):

- 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 η – заданная пороговая величина;
- 3) $l > l_{max}$, где l_{max} – заранее заданное максимальное число итераций.

Если по окончанию 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 способствует минимизации функционала второго критерия оптимальности (11).

Общая структура полученного автоматического алгоритма сшивки РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования представлена на рисунке 6.

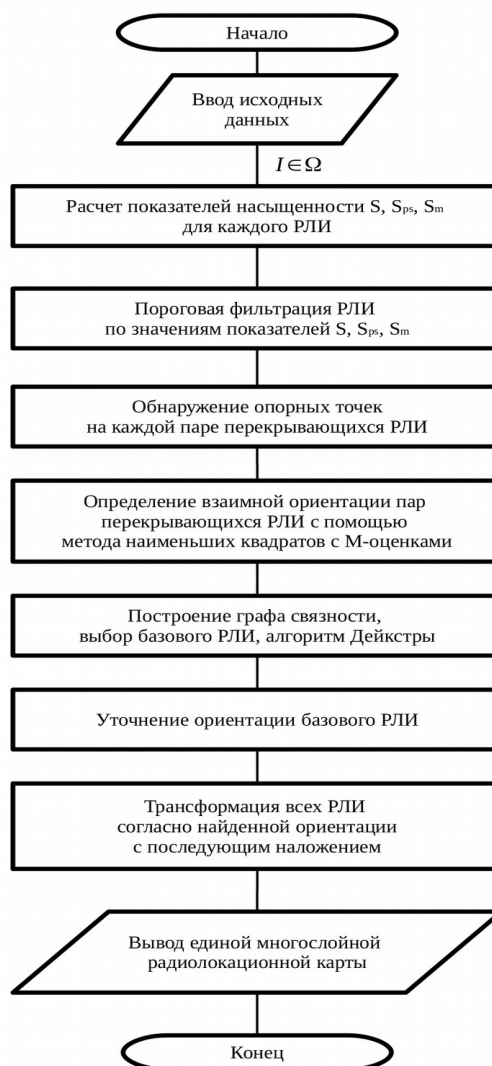


Рисунок 6 – Алгоритм автоматической сшивки РЛИ земной поверхности

В третьей главе приведены результаты моделирования и конкретные значения констант разработанного алгоритма автоматической сшивки РЛИ земной поверхности и всех его этапов в отдельности. Моделирование алгоритмов происходило на ЭВМ с центральным процессором Intel Core i5-2500K (4 ядра по 3,3 ГГц) и объемом ОЗУ 16 Гб под управлением Linux (Fedora 20).

Алгоритм определения количественной оценки насыщенности семантики РЛИ успешно позволяет проводить численную оценку насыщенности семантики изображения, а также локализовать области интереса на нем (S_m) при приемлемых временных затратах (~ 25 МПкс/с).

На рисунке 7 представлены 3 фрагмента РЛИ земной поверхности приблизительно одной площади (в экранных координатах), для которых были определены показатели S и S_{ps} (таблица 1). Из представленных результатов видно, что более насыщенная семантика изображения (рисунок 7, б) ведет к росту показателей S и S_{ps} , в то время как снижение насыщенности (рисунок 7, а и в) ведет к уменьшению отмеченных параметров.

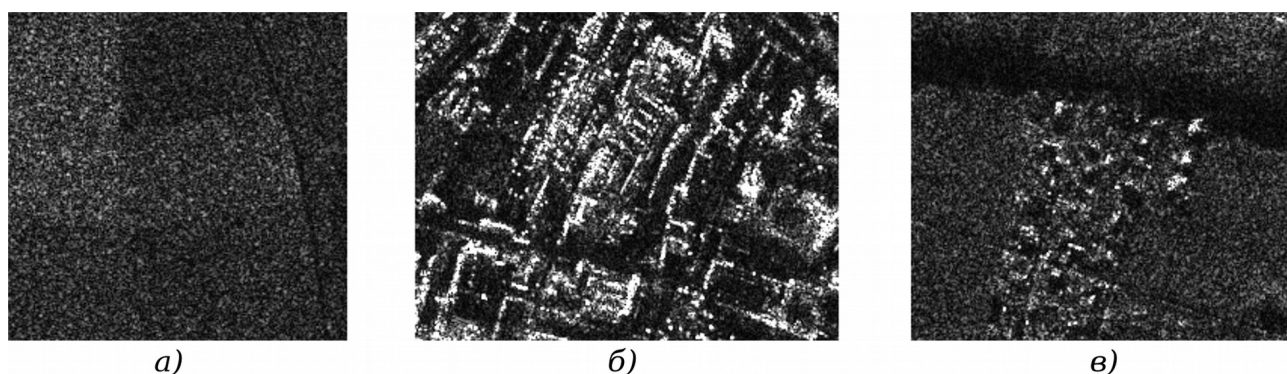


Рисунок 7 – Фрагменты радиолокационных изображений с различной степенью насыщенности семантики, на которых изображены поле (а), район города (б) и небольшие сельские постройки (в)

Таблица 1 – Показатели насыщенности семантики для фрагментов РЛИ

Фрагмент РЛИ	S	S_{ps}
Поле (рисунок 7, а)	9	$0,18 \cdot 10^{-3}$
Район города (рисунок 7, б)	432	$6,89 \cdot 10^{-3}$
Сельские постройки (рисунок 7, в)	74	$1,31 \cdot 10^{-3}$

На рисунке 8 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 8, в) интереса не представляет, показатель насыщенности семантики S такого изображения близок к нулю.

В ходе моделирования были установлены рекомендуемые значения параметров алгоритма.

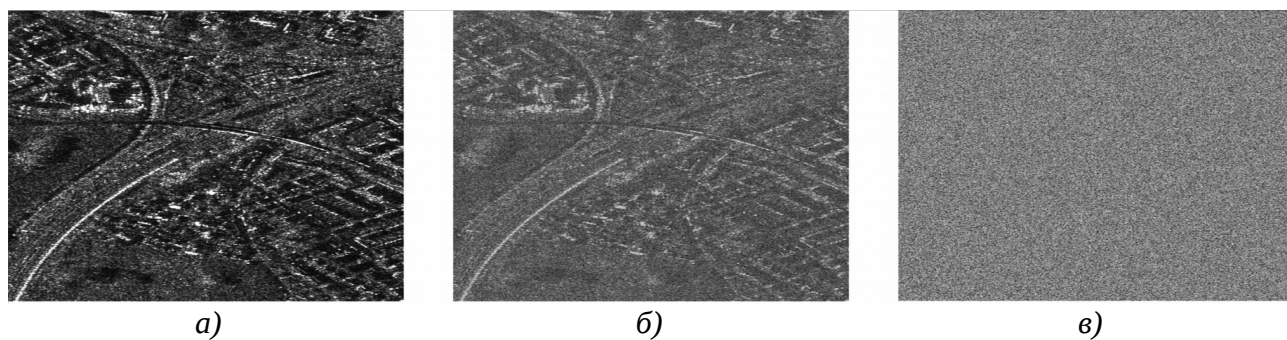


Рисунок 8 – Показатель насыщенности семантики для «чистого» РЛИ (а) $S = 1041$, зашумленного РЛИ (б) $S = 156$ и только шума (в) $S = 2$

Результаты моделирования модифицированного алгоритма SURF показали увеличение в среднем на 40% минимального количества найденных опорных точек в сравнении с оригинальным SURF (рисунок 9), при этом время обработки увеличилось на 5,5%.

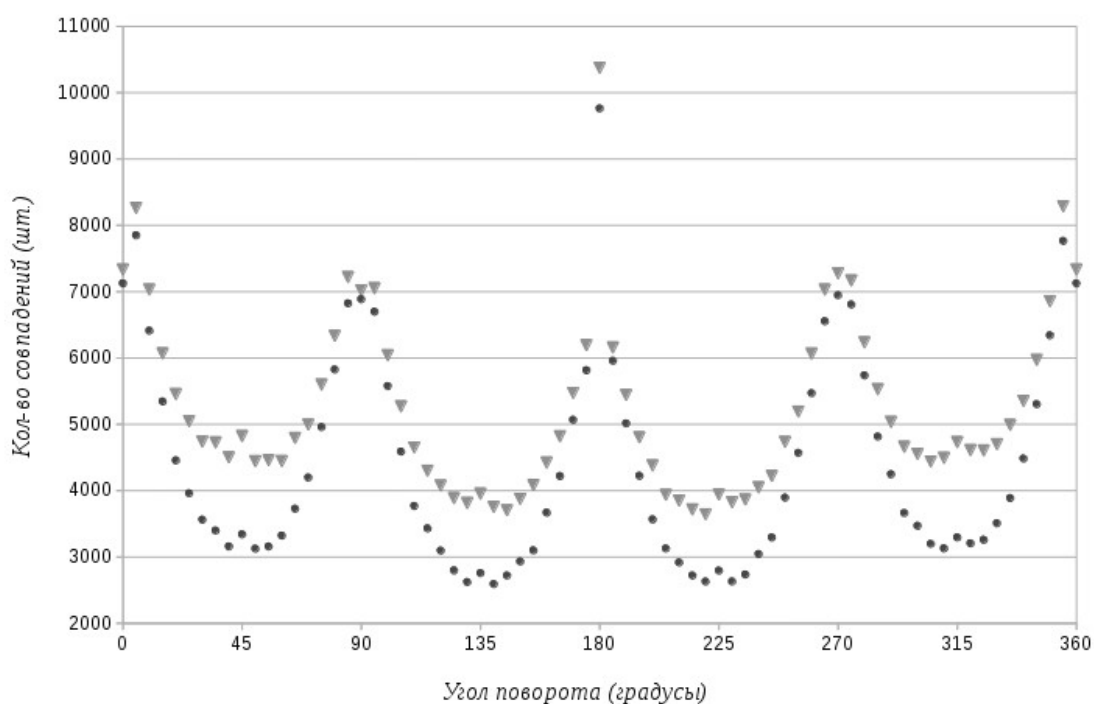


Рисунок 9 – Зависимость количества найденных совпадений (опорных точек) двух перекрывающихся РЛИ при использовании оригинального (отмечены точками) и модернизированного (отмечены треугольниками) алгоритмов SURF

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 сопоставление

325346 точек интереса одного РЛИ с 248719 точками интереса другого с помощью полного перебора занимает ~529,0 сек. Аналогичная задача с помощью k-мерного дерева решается за ~3,3 сек.

Моделирование алгоритма поиска ориентации двух перекрывающихся РЛИ земной поверхности показало его устойчивость к ошибочным опорным точкам (до 10-15% от общего количества). Расчет параметров проективного преобразования для двух 80МПкс изображений с областью перекрытия в 10% и 10490 опорными точками в ней занял 44 мс. При этом во всех случаях моделирования искомые параметры проективного преобразования были найдены с заданной точностью.

Реализация алгоритма уточнения ориентации базового РЛИ на всех тестовых наборах РЛИ с некорректными искажениями успешно корректировала ориентацию базового РЛИ земной поверхности. Время работы алгоритма уточнения ориентации базового РЛИ для двух перекрывающихся РЛИ зависит от их взаимной ориентации (значений элементов матрицы M) и колеблется в диапазоне 40-80 мкс, при этом количество итераций алгоритма не превышало 4.

В рамках моделирования алгоритма автоматической сшивки РЛИ земной поверхности при неизвестных элементах внешнего ориентирования целиком помимо прочих проводилась сшивка 10 перекрывающихся РЛИ, площадью 80МПкс каждое. Спустя 11 минут и 2 секунды была получена единая радиолокационная карта, представленная на рисунке 10, с точностью совмещения изображений в несколько элементов разрешения.

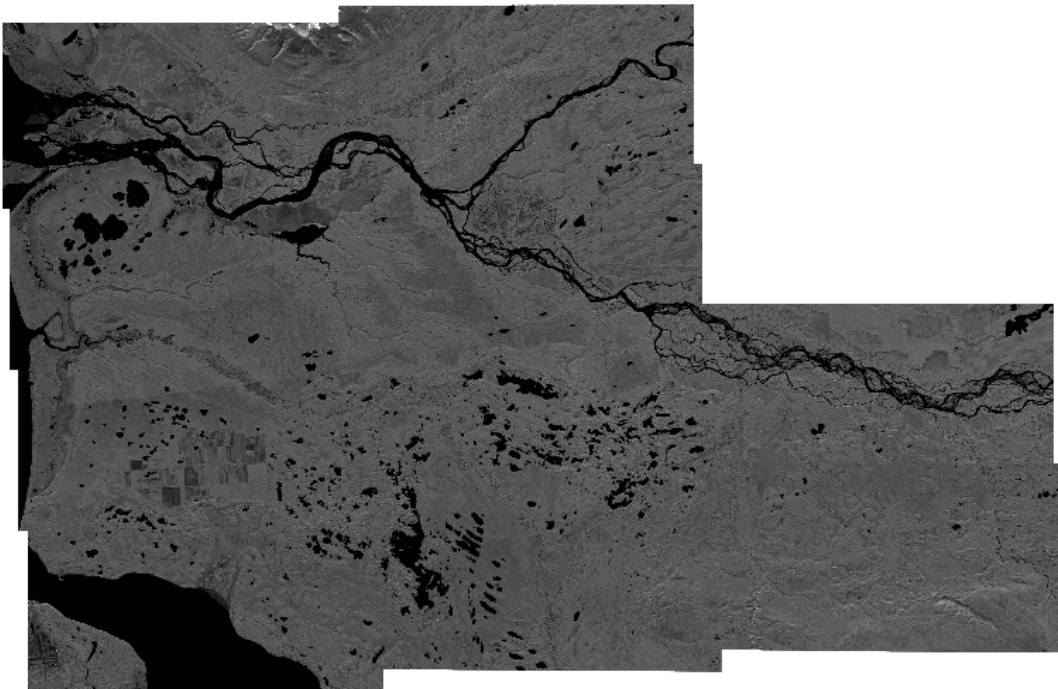
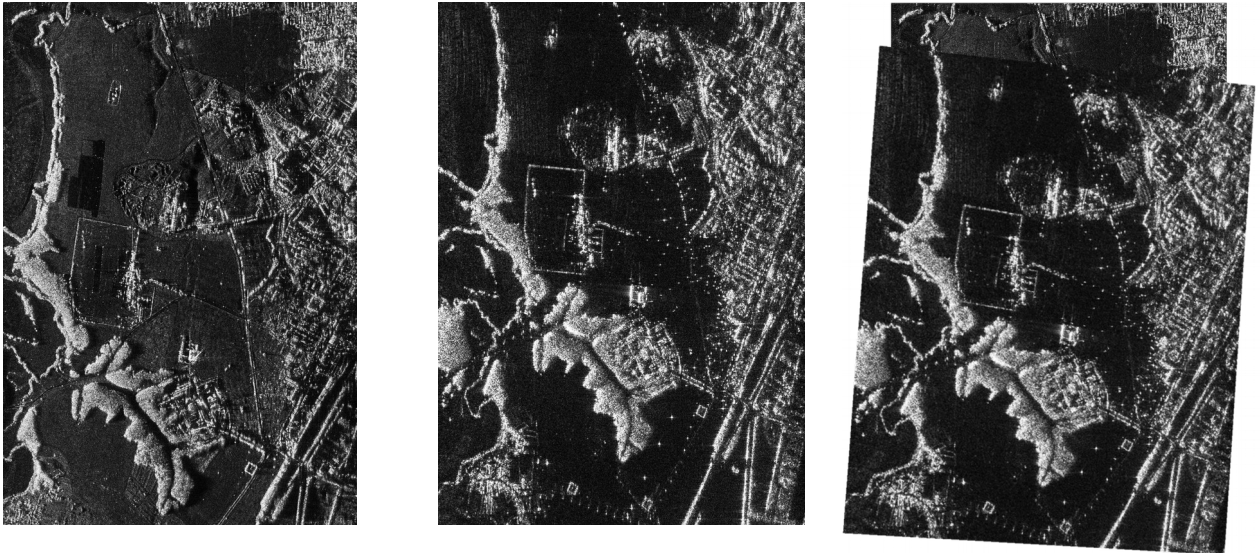


Рисунок 10 – Результаты сшивки 10 РЛИ земной поверхности

Пример сшивки с точностью в несколько элементов разрешения РЛИ одной и той же местности, полученных в различных диапазонах длин волн с помощью РСА «Компакт», приведен на рисунке 11.



а)

б)

в)

Рисунок 11 – РЛИ земной поверхности L-диапазона (а) и УКВ-диапазона (б), полученные с помощью РСА «Компакт», а также их сшивка (в) с помощью разработанного алгоритма

Кроме того, в главе представлены результаты успешной сшивки искаженных перекрывающихся фрагментов РЛИ (зашумление, проективное преобразование, изменение яркости), а также приведены необходимые пороговые значения параметров оценки насыщенности обрабатываемых РЛИ земной поверхности и приведена оценка количества ошибочных опорных точек при сшивке. Исходные данные и полученные единые радиолокационные карты описанных моделирований приведены в приложении диссертационной работы.

Далее, проводится анализ влияния высотных объектов и рельефа местности, а также кривизны земной поверхности на точность получаемой сшивки. Численное моделирование различных проявлений указанных факторов для некоторых авиационных и космических РСА позволяет сформулировать два дополнительных требования ко входному набору обрабатываемых РЛИ земной поверхности:

- 1) формирование единой радиолокационной карты с помощью разработанного алгоритма рекомендуется проводить для РЛИ равнинной или холмистой местности с перепадом высот в пределах одного кадра РЛИ менее 50 метров;
- 2) при заданной точности получаемой сшивки в 50 метров расстояние от центра базисного

РЛИ земной поверхности до самого удаленного изображения должно составлять не более 250 км (ограничение на размер сшивки $\sim 400 \times 400$ км).

В заключении представлены основные результаты диссертационного исследования.

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 $\sim 5,5\%$.
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 ~ 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.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
 5. 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.
 6. 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.
 7. 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.
 8. Романов, А.А. Объективная оценка насыщенности семантики радиолокационного изображения / А.А. Романов // Успехи современной радиоэлектроники, №5. — 2015. — С. 108-115.
 9. 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.
 10. 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.
 11. 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.
 12. 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.
 13. 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.