

Совмещение сформированных радиолокационных изображений с цифровой картой местности в бортовых системах оперативного мониторинга земной поверхности

Сенцов А.А.¹, Ненашев В.А.^{1*}, Иванов С.А.², Е.Л. Турнецкая¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ГУАП,

Большая Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия

²Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Садовая улица, 21, Санкт-Петербург, 191023, Россия

**e-mail: nenashev@guap.ru*

Статья поступила 03.03.2021

Аннотация

В работе рассматривается задача совмещения радиолокационного изображения, сформированного бортовой аппаратурой малого летательного аппарата, и цифровой географической карты местности с учетом высот в режиме реального времени. Для решения данной задачи в работе используются методы корреляционно-экстремального совмещения изображений, методы высокоточного бортового мониторинга, методы совмещения и обработки изображений. Для реализации системы оперативного отображения актуальной локационной информации, получаемой радиолокационной аппаратурой с бортов малых ЛА, требуется выполнить совмещение радиолокационных и топографических (оптических) изображений в единое информационное поле. Для этого необходимо найти соответствующее функциональное преобразование в целях наложения

актуальных данных, сформированных в режиме реального времени, на географическую карту. Полученные результаты могут быть использованы для актуализации топографических карт земной поверхности, для экологического мониторинга зон повышенного внимания, а также для реализации автономной навигации летательных объектов при проведении оперативных поисково-спасательных операций в зонах чрезвычайных ситуаций и катастроф природного и техногенного характера.

Ключевые слова: радиолокационное изображение, цифровая карта местности, совмещение изображений, малый летательный аппарат, локационная информация, режим реального времени.

Введение

В настоящее время современные малые летательные аппараты (МЛА) применяют для аэрофото- и видеосъемки, обработки с воздуха сельскохозяйственных культур, наблюдения за инфраструктурой и охраной объектов, картографирования радиолокационными методами [1-4], мониторинга земной поверхности при поисково-спасательных операциях, доставки грузов и даже при строительстве. Сфера применения автономных МЛА постоянно расширяется.

Преимущества использования бортовых малогабаритных РЛС в составе МЛА для задач экологической разведки и мониторинга зон чрезвычайных ситуаций позволяют:

- охватить за короткий промежуток времени обширные участки наблюдаемой земной поверхности,

- информировать оператора о наличии наблюдаемых объектов в зоне действия в реальном масштабе времени,

- реализовать высокую эффективность работы в неблагоприятных метеоусловиях и возможность работать в любое время суток.

В настоящее время во многих практических приложениях научных знаний актуальной задачей является применение способов совмещения радиолокационных изображений (РЛИ), в том числе полученных бортовой аппаратурой МЛА, с географической картой местности в целях ее актуализации. Сферой применения таких технологий являются геологоразведка, экологический мониторинг, поиск объектов в зонах бедствий, оценка состояния ледников, обнаружение пожаров, картографирование земной поверхности, мониторинг чрезвычайных ситуаций (кораблекрушение, техногенная катастрофа, землетрясение, наводнение, оползни, лесной пожар и т.д.) [1, 3, 5-10].

Для реализации совмещения РЛИ с цифровой картой местности (ЦКМ) в единое информационное поле применяются процедуры пространственного преобразования. В этом случае задача совмещения РЛИ с ЦКМ формулируется как задача нахождения некоторого преобразования, при котором достигается наибольшее совпадение границ контуров РЛИ с ЦКМ на основе корреляционно-экстремальных методов. В работе рассмотрено решение задачи совмещения изображений методом поиска характерных опорных точек контуров и совмещение объединенного РЛИ с

ЦКМ. Рассмотренный метод позволяет добиться высокой точности совмещения и снижения погрешностей совмещения между наложенными данными.

Выделение ориентиров-реперов на цифровой карте местности

Существующая практика говорит в пользу того, что на сформированном радиолокационном изображении наблюдаемого участка земной поверхности имеются отдельные ориентиры, сохраняющие характерный вид независимо от времени года. Поскольку подобные ориентиры представлены на крупномасштабных топографических картах, то последние и могут быть основой составления эталона для проведения корреляционно-экстремальных преобразований и привязки сформированных актуальных изображений к цифровым картам местности. Точность коррекции в этом случае будет определяться в основном масштабом карты и информативностью зоны коррекции, то есть распределением плотности полученных изображений на текущем кадре РЛИ и точностью изображения элементов района коррекции на топографической карте.

Логика алгоритма привязки при решении задачи коррекции в рассматриваемых условиях должна быть ориентирована на использование минимального количества информации (содержащейся в изображениях объектов изображения), достаточного для обеспечения заданного значения ошибки привязки МЛА. Алгоритмическое обеспечение, используемое в данном случае, должно включать процедуры обработки исходного изображения местности (карты) и подготовки соответствующего эталона

без избыточной информации. Предполагается использовать систему ориентиров-реперов, следующих двух типов:

- узлы пересечения прямых или самостоятельные отрезки прямых, соответствующие видимым на карте и измеримым элементам изображения (дорогам, рекам, объектам инфраструктуры), характеризуются направлением и длиной образующих их прямолинейных отрезков;

- компактные двумерные локально-контрастные области. Ориентиры этого типа характеризуются габаритными размерами, а также расположением возле линейных образований (например, дорог) на заданном удалении. Положение объекта (точки привязки) задается относительно названных ориентиров-реперов; от каждого из них строится вектор определенной длины и направления, указывающий относительное положение.

Таким образом, ориентиры первого типа характеризуются направлением и длиной образующих прямолинейных отрезков. При этом учитывается, что они могут иметь строгие или неопределенные размеры. Например, если это образующие линии зданий, то их размеры существенны в качестве их признака. А если это линия дороги, то в признаке ориентира-репера она определяется как «достаточно длинная». Ориентиры второго типа характеризуются габаритными размерами, а также расположением возле линейных образований (например, дорог) на заданном удалении [11].

Постановка задачи

Для реализации оперативного мониторинга при поисково-спасательных операциях необходимо решить задачу по разработке алгоритма совмещения полученной текущего РЛИ с ЦКМ. А именно, формирование единого информационного поля с целью оперативного получения высокоточного и подробного совмещенного изображения наблюдаемого ландшафта местности в режиме, приближенном к реальному масштабу времени.

В качестве исходных данных для совмещения используются матричные структуры радиолокационного изображения участка местности, сформированные источниками радиолокационной информации. Задачу наложения локационной информации следует рассматривать как задачу совмещения в единое информационное поле признаков, общих для радиолокационных снимков одного и того же наблюдаемого участка. Реализация разрабатываемого алгоритма совмещения должна выполняться в автоматическом режиме объединения радиолокационных данных с учетом ограничения времени обработки вследствие движения самих источников РЛИ.

Автоматизация процедуры совмещения РЛИ с ЦКМ, содержащей координатную сетку, на основе подбора соответствующих пар характерных по яркостным и геометрическим параметрам ориентиров-реперов, обеспечивает высокую скорость обработки данных, что особенно важно для систем, функционирующих в режиме, приближенном к реальному масштабу времени (с поправкой на собственную скорость носителя).

Алгоритмы совмещения радиолокационных изображений с цифровой картой местности

Для совмещения радиолокационных изображений с эталонной географической картой местности следует использовать дополнительные каналы информации. Например, дальномерный канал радиолокационной станции измеряет дальность до характерной точки, принадлежащей контуру ориентира-репера в заданном направлении. И для расчета координат точек зондирования радиолокационного луча необходимо помимо измерения дальности использовать измерения углового положения оси диаграммы направленности антенны радиолокатора, а также измерения углового положения связанных осей МЛА относительно осей геодезической системы координат.

Процесс совмещения РЛС с ЦКМ заключается в следующем. От бортовой аппаратуры МЛА в блок центра обработки и управления МЛА по беспроводному каналу связи [12-16] передаются РЛИ наблюдаемых поверхностей земли. В центре обработки осуществляется предварительная подготовка поступающих РЛИ [17, 18], после чего выполняется их сшивка, и далее происходит совмещение сшитого РЛИ с ЦКМ в области доверительного интервала, исходя из априорной информации о текущем местоположении. Обобщенная схема функционирования системы совмещения РЛИ и ЦКМ показана на рисунке 1.

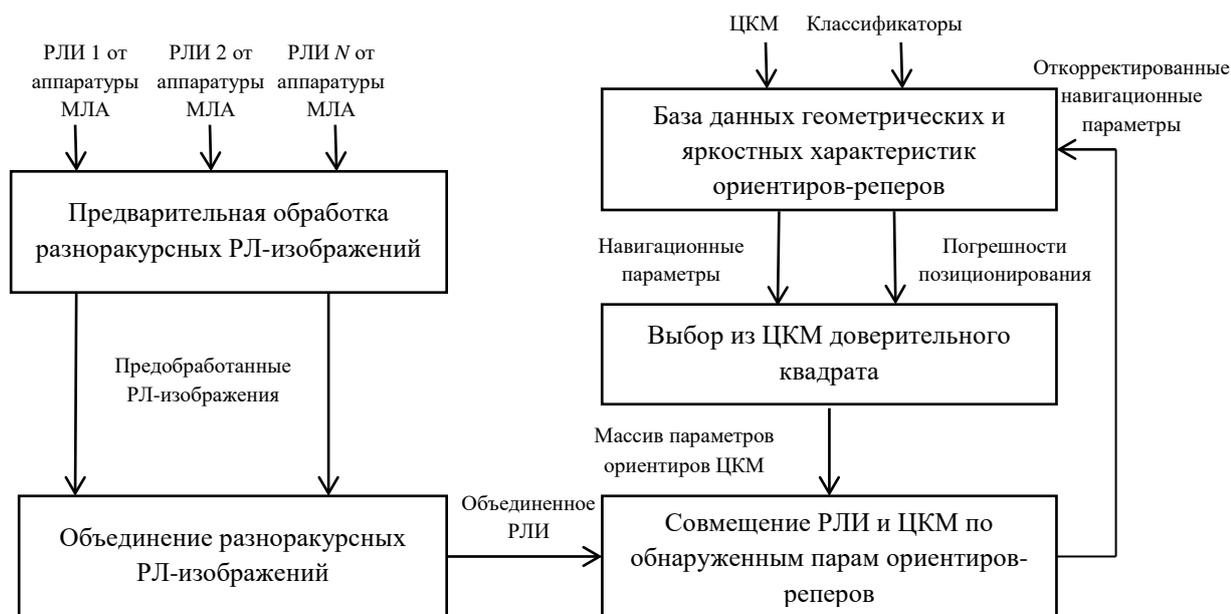


Рисунок 1 – Обобщенная схема функционирования системы совмещения РЛИ с ЦКМ

В бортовых системах мониторинга задача привязки РЛИ к ЦКМ решается с большими вычислительными затратами, что критично для систем оперативного мониторинга земной поверхности, требующих режима, приближенного к реальному времени.

Рассмотрим алгоритм привязки РЛИ и особенности его реализации для систем оперативного мониторинга, реализуемых на МЛА [19-30].

На рисунке 2 представлена блок-схема алгоритма совмещения РЛИ и ЦКМ на основе корреляционно-экстремального метода.



Рисунок 2 – Алгоритм совмещения РЛИ и ЦКМ на основе корреляционно-экстремального метода

Для разрешения условия алгоритма о нахождении МЛА в точке из доверительного квадрата, представленного на рисунке 2, предлагается использовать следующий критерий. Суть критерия заключается в совмещении не менее четырех пар ориентиров-реперов. В этом случае применение алгоритма поиска матрицы гомографии осуществляется в следующей последовательности шагов.

Шаг 1. Заполнение матрицы гомографии из массива соответствующих пар ориентиров-реперов с последующим объединением разноракурсных РЛИ на ее основе.

Шаг 2. Определение уровня детализации соответствия полученных изображений. В случае низкого уровня детализации определяется пара (пары) ориентиров-реперов с разбросом более 1,75 среднего расстояния внутри массива ориентиров-реперов, которые исключаются из множества пар ориентиров-реперов.

Шаг 3. Вторичное заполнение матрицы гомографии из усеченного массива пар ориентиров-реперов с последующим объединением разноракурсных РЛИ на ее основе.

При реализации алгоритма важной особенностью является то, что шаги 2 и 3 повторяются в цикле до получения требуемого уровня детализации совмещения. При этом накладываются временные ограничения (по скорости обработки данных) на работу алгоритма, с целью сохранения актуальности наблюдаемого изображения, в связи с учетом собственной скорости носителя.

Возможны ситуации, когда определение 4 пар ориентиров-реперов является затруднительным в силу условий наблюдения местности. В этом случае алгоритм предполагает использование уникальной пары. Тогда первичное сопоставление контуров характерных ориентиров-реперов на основе алгоритма поиска уникальной пары позволяет рассчитать предварительные оценки составляющих вектора ошибок навигационных данных [19] и включает выполнение следующих этапов.

1. Выделение контуров характерных ориентиров-реперов и их аппроксимация многоугольниками.

2. Оптимизация представления выделенных контуров характерных ориентиров-реперов с сокращением числа точек многоугольников.

3. Определение уникального соответствия между точками сформированных многоугольников.

4. Объединение разнородных изображений с учетом определяемого угла поворота.

5. Совмещение изображений по уникальной паре ориентиров-реперов путем преобразования-сдвига в плоскости Oxy на величину вычисленного смещения $\Delta x = x_M - x_{M'}$, $\Delta y = y_M - y_{M'}$.

6. Вычисление поправок по углу тангажа и по высоте.

Программная реализация вышеупомянутых алгоритмов на ПЛИС может быть выполнена с применением параллельных вычислений, что позволяет обеспечить режим, приближенный к реальному времени. При этом надежность такой реализации уступает корреляционно-экстремальным алгоритмам совмещения изображений, так как при поиске уникальных пар ориентиров-реперов на совмещаемых изображениях в автоматическом режиме вероятность возникновения ошибок достаточно велика при текущих уровнях детализации РЛИ и ЦКМ.

Полное совпадение ориентира-репера с элементом ЦКМ возникает в редких случаях ввиду действия шумов и искажений в режимах работы бортовых малогабаритных радиолокационных станций. Поэтому необходимо использовать функцию сходства, которая позволяет принять решение о степени схожести ориентира-репера и объекта ЦКМ. В качестве функции сходства можно использовать различные методы, широко распространенные в корреляционно-экстремальных системах. Для построения алгоритма совмещения РЛИ и ЦКМ на основе корреляционно-экстремального метода используется вычисление функции взаимной корреляции по следующей формуле [20]:

$$R(x_1, y_1) = \frac{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} l(x - x_1, y - y_1) \cdot k(x, y)}{\sqrt{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} l^2(x - x_1, y - y_1)} \cdot \sqrt{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} k^2(x, y)}},$$

где $l(\cdot)$ – выделенный фрагмент РЛИ как ориентир-репер, $k(\cdot)$ – элемент ЦКМ из доверительного квадрата размером $M \times N$.

Данная нормированная функция взаимной корреляции $R(\cdot)$ имеет максимальное значение в случае, когда произойдет совмещение ориентира-репера и элемента ЦКМ. В качестве недостатка корреляционно-экстремального метода можно отметить большой объем вычислений. Тем не менее, использование доверительного квадрата, выделяемого из ЦКМ, позволяет значительно сократить количество вычислений за счет «прицельного» применения ориентиров-реперов.

Массив эталонной картографической информации для зоны мониторинга 200 на 200 км через 50 м при условии выделения на представление одного значения высоты рельефа местности 2-х байтного целого числа требует для хранения 3200160002 байт (без учета служебной информации). Методы сжатия картографической информации [17,18] позволяют без потери точности в представлении поля высот рельефа местности осуществлять сжатие в 3 – 8 раз, что составит, соответственно, от 400 Мб до 1 Гб памяти постоянного запоминающего устройства. Коэффициент сжатия зависит от количества вычислений на распаковку данных на борту в режиме реального времени и характера рельефа местности.

Следует также отметить то обстоятельство, что указанные вычислительные затраты не включают в себя затраты на периодическую загрузку с постоянного запоминающего устройства в ОЗУ блоков цифровой карты рельефа местности и их

преобразование к формату, оптимальному для решения задач привязки РЛИ к цифровой картографической информации.

Эксперименты по объединению изображений с ЦКМ

Совмещение объединенного радиолокационного изображения с ЦКМ может выполняться в различных режимах работы бортовой малогабаритной радиолокационной станции. На рисунке 3 представлен результат программной реализации алгоритма совмещения РЛИ и ЦКМ в режиме Доплера без фильтрации по скорости с обзором сектора 180° .



Рисунок 3 - Совмещение в режиме Доплера

На рисунке 3 отчетливо определяются контуры сооружений городской застройки и подвижные объекты (здания, заборы, движущиеся автомобили). В случае применения фильтрации по скорости на совмещенном изображении останутся только объекты, скорость которых соответствует заданному в модуле фильтрации диапазону.

На рисунке 4 представлен результат программной реализации алгоритма совмещения РЛИ и ЦКМ в режиме реального луча без фильтрации по скорости с обзором сектора 60° .

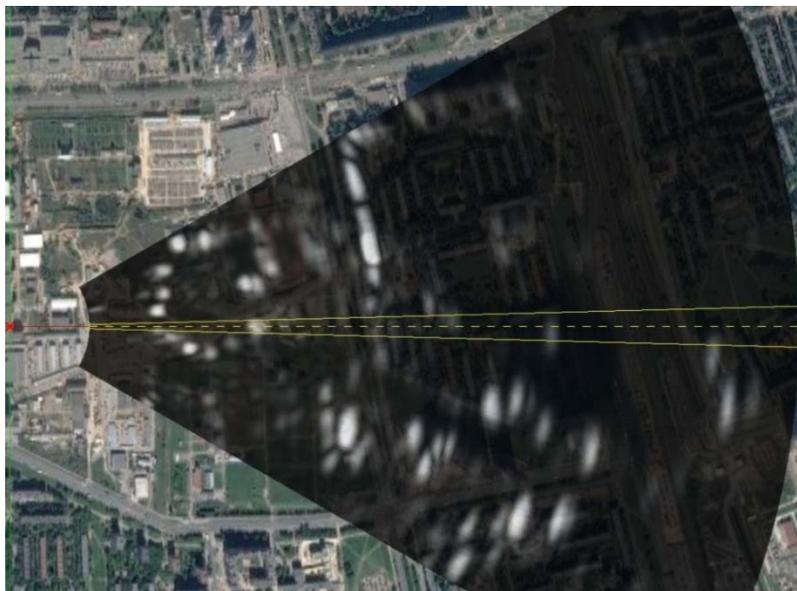


Рисунок 4 - Совмещение в режиме Доплера

На рисунке 4 менее отчетливо определяются контуры сооружений городской застройки и подвижные объекты (здания, заборы, движущиеся автомобили), но в режиме реального луча выше возможности настройки скорости сканирования сектора обзора, то есть возможен более оперативный режим получения радиолокационной информации.

Выводы

Результаты проведенных экспериментов подтвердили возможность объединения РЛИ и ЦКМ, полученных аппаратурой, размещенной на МЛА, входящей в единую систему оперативного мониторинга. При этом алгоритмы совмещения разноракурсных радиолокационных изображений от МЛА требуют

дополнительных экспериментальных исследований с учетом времени обработки данных и изменения положения МЛА за время обработки.

Анализ результатов экспериментов позволил выполнить корректировку программного обеспечения по совмещению изображений высокого разрешения с ЦКМ в режиме реального времени с целью отображения актуальной информации и решения поставленных задач на одном носителе.

Разработанный программный комплекс, включающий процедуру совмещения изображений с ЦКМ, применим для реализации в бортовых системах МЛА комплексирования информации.

Результаты работы адаптируемы для обработки изображений, полученных в разных спектральных диапазонах и их комплексирования с ЦКМ в целях повышения информативности получаемой информации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-00303)

Библиографический список

1. Wattimena M.G., Nenashev V.A., Sentsov A.A., Shepeta A.P. On-Board Unlimited Aircraft Complex of Environmental Monitoring // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint Petersburg, 2018. DOI: [10.1109/WECONF.2018.8604382](https://doi.org/10.1109/WECONF.2018.8604382)

2. Toro G.F., Tsourdos A. UAV sensors for environmental monitoring, Belgrade, MDPI, 2018, 661 p.
3. Исаков В.И., Шепета Д.А. Моделирование локационных сигналов, отраженных от кромки земля-море // Информационно-управляющие системы. 2017. № 5 (90). С. 89 - 94. DOI: [10.15217/issn1684-8853.2017.5.89](https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2017.5.89)
4. Nenashev V.A., Sentsov A.A., Shepeta A.P. Formation of radar image the earth's surface in the front zone review two-position systems airborne radar // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint Petersburg, 2019. DOI: [10.1109/WECONF.2019.8840641](https://doi.org/10.1109/WECONF.2019.8840641)
5. Блаунштейн Н.Ш., Сергеев М.Б., Шепета А.П. Прикладные аспекты электродинамики. - СПб.: Аграф+, 2016. - 272 с.
6. Richard Klemm et al. Novel Radar Techniques and Applications. Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar, London, Scitech Publishing, 2017, vol. 1, 952 p. DOI: [10.1049/SBRA512F](https://doi.org/10.1049/SBRA512F)
7. Richard Klemm et al. Novel Radar Techniques and Applications. Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion, London, Scitech Publishing, 2017, vol. 2, 553 p. DOI: [10.1049/SBRA512G](https://doi.org/10.1049/SBRA512G)
8. Зайцев Д.В. Многопозиционные радиолокационные системы. Методы и алгоритмы обработки информации в условиях помех. - М.: Радиотехника, 2007. - 96 с.
9. Nenashev V.A., Sentsov A.A., Shepeta A.P. The Problem of Determination of Coordinates of Unmanned Aerial Vehicles Using a Two-Position System Ground Radar //

2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint Petersburg, 2018. DOI: [10.1109/WECONF.2018.8604329](https://doi.org/10.1109/WECONF.2018.8604329)

10. Nenashev V.A., Kryachko A.F., Shepeta A.P., Burylev D.A. Features of information processing in the onboard two-position small-sized radar based on UAVs // SPIE Future Sensing Technologies, Tokyo, Japan, 2019, pp. 111970X-1-111970X-7.

11. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения – Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.

12. Ненашев С.А. Помехоустойчивые кодовые конструкции для синхронизации функционирования пространственно-распределенных портативных РЛС // XXIX Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации»: сборник трудов (Алушта, 14 - 20 сентября 2020). – СПб.: ГУАП, 2020. С. 142 - 143.

13. Подоплёкин Ю.Ф., Шепета Д.А., Махлин А.М., Каплин А.Ю. Цифровые обнаружители сверхширокополосных импульсных сигналов // Морской вестник. 2016. № 2 (58). С. 77 - 79.

14. Ненашев В.А., Сеницын В.А., Страхов С.А. Исследование влияния промышленных помех на характеристики сжатия фазоманипулированных сигналов в первичных РЛС // IX Общероссийская научно-практическая конференция «Инновационные технологии и технические средства специального назначения»: сборник трудов (Санкт-Петербург, 16–18 Ноября 2016). – СПб.: Балтийский государственный технический университет «Военмех», 2017. С. 351 – 355.

15. Shepeta A.P., Makhlin A.M., Nenashev V.A., Kryachko A.F. Performance of UWB Signal Detecting Circuits // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint Petersburg, 2018, DOI: [10.1109/WECONF.2018.8604440](https://doi.org/10.1109/WECONF.2018.8604440)
16. Махлин А.М., Подоплёкин Ю.Ф., Шепета А.П. Структурные схемы и алгоритмы приема, обнаружения и анализа сверхширокополосных сигналов // Морская радиоэлектроника. 2016. № 4 (58). С. 42 - 47.
17. Ерош И.Л., Сергеев М.Б., Соловьев Н.В. Методы быстрого распознавания символов, пригодные для аппаратной реализации // Информационно-управляющие системы. 2004. № 4 (11). С. 2 - 6.
18. Осипов Л.А., Сергеев М.Б., Соловьев Н.В., Шепета А.П. Использование спектральных характеристик для распознавания изображений, полученных при дистанционном зондировании // Фундаментальные исследования. 2004. № 6. С. 83 - 85.
19. Новиков А.И., Ефимов А.И. Предварительное совмещение изображений и методы оценки качества совмещения // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 3. С. 23 - 29.
20. Борисова И.В. Легкий В.Н. Обработка изображений с фильтрацией анизотропных шумов // Труды XIV Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения, АПЭП – 2018» (Новосибирск, 02–06 октября 2018). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Т. 4. С. 25 – 29.

21. Кондратенков Г.С., Быков В.Н., Викентьев А.Ю. Методика автоматического совмещения радиолокационных изображений с цифровыми картами и оптическими снимками местности // Радиотехника. 2007. № 8. С. 99 - 101.
22. Корнеев М.А., Максимов А.Н., Максимов Н.А. Методы выделения точек привязки для визуальной навигации беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=33061>
23. Гармаш В.Н., Петров Ю.В. Оценка информативности радиолокационных изображений при их совмещении с цифровыми картами местности // Информация и космос. 2011. № 1. С. 41 – 46.
24. Пуртов И.С., Синча Д.П. Исследование методов и разработка алгоритмов обработки видеоинформации в задачах локализации положения БЛА на основе распознавания изображений при помехах и искажениях // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29444>
25. Кирдяшкин В.В., Сосулин Ю.Г. Автоматическое совмещение радиолокационного изображения с оптическим изображением и цифровой картой местности // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 10. С. 59 - 71.
26. Кирпичников А.П., Мифтахутдинов Д.И., Ризаев И.С. Решение задачи корреляционной привязки изображения и цифровой карты местности // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 17. С. 186 - 189.
27. Елесина С.И., Ломтева О.А. Исследование алгоритмов корреляционного совмещения изображений в системах комбинированного видения // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 3. С. 71 - 76.

28. Лунёв Е.М., Неретин Е.С., Дяченко С.А. Дуброво А.И. Разработка программно-алгоритмического обеспечения прототипа системы синтетического видения для перспективных объектов авиационной техники // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66366>
29. Татарский Б.Г., Кирдяшкин В.В. Алгоритм выбора эталонов с целью автоматического совмещения радиолокационного изображения с цифровыми картами местности или оптическими изображениями // Радиотехника. 2009. № 12. С. 58 - 63.
30. Дяченко С.А. Разработка модели системы синтетического видения для перспективных гражданских самолётов // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91966>

Combining the generated radar images with a digital map of the area in on-board systems for operational monitoring of the earth's surface

Sentsov A.A.¹, Nenashev V.A.^{1*}, Ivanov S.A.², Turnetskaya E.L.¹

¹*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
67, Bolshaya Sea str., Saint Petersburg, 190000, Russia*

²*Saint-Petersburg State Economic University,
21, Sadovaya str., Saint Petersburg, 191023, Russia*

*e-mail: nenashev@guap.ru

Abstract

The article considers the problem of combining the radar image generated by the onboard equipment of a small aircraft and a digital geographical map of the area, taking into account the heights in real time. To solve this problem, we use methods of correlation-extreme image matching, methods of high-precision on-board monitoring, methods of image matching and processing. To implement a system for the operational display of current location information received by radar equipment from the sides of small aircraft, it is necessary to combine radar and topographic (optical) images into a single information field. To do this, you need to find the appropriate functional transformation in order to overlay the actual data generated in real time on the geographical map. For this purpose, an algorithm for combining the radar image and a digital map of the area based on the correlation-extreme method has been developed. To solve the condition of the algorithm for finding a small aircraft at a point from the confidence square, a criterion for combining four pairs of reference points is proposed. In the case of an insufficient number of reference point pairs, the algorithm provides for the

use of a unique pair, which allows you to perform a primary comparison of the contours of characteristic reference points and calculate preliminary estimates of the components of the error vector of navigation data. The software implementation of the above-mentioned algorithms on programmable logic integrated circuits can be performed using parallel calculations, which allows for a mode that is close to real time. The results obtained can be used to update topographic maps of the earth's surface, for environmental monitoring of areas of high attention, as well as for the implementation of autonomous navigation of aircraft during operational search and rescue operations in areas of emergencies and natural and man-made disasters. The results of the work are adaptable for processing images obtained in different spectral ranges and combining them with a digital map of the area in order to increase the information content of the information obtained.

Keywords: radar image, digital map of the area, image combination, small aircraft, location information, real-time mode.

References

1. Wattimena M.G., Nenashev V.A., Sentsov A.A., Shepeta A.P. On-Board Unlimited Aircraft Complex of Environmental Monitoring, *2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint Petersburg, 2018. DOI: [10.1109/WECONF.2018.8604382](https://doi.org/10.1109/WECONF.2018.8604382)
2. Toro G.F., Tsourdos A. *UAV sensors for environmental monitoring*, Belgrade, MDPI, 2018, 661 p.

3. Isakov V.I., Shepeta D.A. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2017, no. 5 (90), pp. 89 - 94. DOI: [10.15217/issn1684-8853.2017.5.89](https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2017.5.89)
4. Nenashev V.A., Sentsov A.A., Shepeta A.P. Formation of radar image the earth's surface in the front zone review two-position systems airborne radar, 2019 *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint Petersburg, 2019. DOI: [10.1109/WECONF.2019.8840641](https://doi.org/10.1109/WECONF.2019.8840641)
5. Blaunshtein N.Sh., Sergeev M.B., Shepeta A.P. *Prikladnye aspekty elektrodinamiki* (Applied aspects of electrodynamics), Saint Petersburg, Agraf+, 2016, 272 p.
6. Richard Klemm et al. *Novel Radar Techniques and Applications. Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar*, London, Scitech Publishing, 2017, vol. 1, 952 p. DOI: [10.1049/SBRA512F](https://doi.org/10.1049/SBRA512F)
7. Richard Klemm et al. *Novel Radar Techniques and Applications. Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion*, London, Scitech Publishing, 2017, vol. 2, 553 p. DOI: [10.1049/SBRA512G](https://doi.org/10.1049/SBRA512G)
8. Zaitsev D.V. *Mnogopozitsionnye radiolokatsionnye sistemy. Metody i algoritmy obrabotki informatsii v usloviyakh pomekh* (Multi-position radar systems. Methods and algorithms of information processing in the conditions of interference), Moscow, Radiotekhnika, 2007, 96 p.
9. Nenashev V.A., Sentsov A.A., Shepeta A.P. The Problem of Determination of Coordinates of Unmanned Aerial Vehicles Using a Two-Position System Ground Radar, 2018 *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint Petersburg, 2018. DOI: [10.1109/WECONF.2018.8604329](https://doi.org/10.1109/WECONF.2018.8604329)

10. Nenashev V.A., Kryachko A.F., Shepeta A.P., Burylev D.A. Features of information processing in the onboard two-position small-sized radar based on UAVs, *SPIE Future Sensing Technologies*, Tokyo, Japan, 2019, pp. 111970X-1-111970X-7.
11. Baklitskii V.K. *Korrelyatsionno-ekstremal'nye metody navigatsii i navedeniya* (Correlation-extreme methods of navigation and guidance), Tver', TO «Knizhnyi klub», 2009, 360 p.
12. Nenashev S.A. *XXIX Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sovremennye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii»*, Saint Petersburg, GUAP, 2020, pp. 142 - 143.
13. Podoplekin Yu.F., Shepeta D.A., Makhlin A.M., Kaplin A.Yu. *Morskoi vestnik*, 2016, no. 2 (58), pp. 77 - 79.
14. Nenashev V.A., Sinitsyn V.A., Strakhov S.A. *IX Obshcherossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva spetsial'nogo naznacheniya»*, Saint Petersburg, Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet «Voenmekh», 2017, pp. 351 – 355.
15. Shepeta A.P., Makhlin A.M., Nenashev V.A., Kryachko A.F. Performance of UWB Signal Detecting Circuits, *2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint Petersburg, 2018, DOI: [10.1109/WECONF.2018.8604440](https://doi.org/10.1109/WECONF.2018.8604440)
16. Makhlin A.M., Podoplekin Yu.F., Shepeta A.P. *Morskaya radioelektronika*, 2016, no. 4 (58), pp. 42 - 47.

17. Erosh I.L., Sergeev M.B., Solov'ev N.V. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2004, no. 4 (11), pp. 2 - 6.
18. Osipov L.A., Sergeev M.B., Solov'ev N.V., Shepeta A.P. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2004, no. 6, pp. 83 - 85.
19. Novikov A.I., Efimov A.I. *Tsifrovaya obrabotka signalov*, 2014, no. 3, pp. 23 - 29.
20. Borisova I.V. Legkii V.N. *Trudy XIV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya, APEP – 2018»*, Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2018, vol. 4, pp. 25 – 29.
21. Kondratenkov G.S., Bykov V.N., Vikent'ev A.Yu.. *Radiotekhnika*, 2007, no. 8, pp. 99 - 101.
22. Korneev M.A., Maksimov A.N., Maksimov N.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 58. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=33061>
23. Garmash V.N., Petrov Yu.V. *Informatsiya i kosmos*, 2011, no. 1, pp. 41 – 46.
24. Purtov I.S., Sincha D.P. *Trudy MAI*, 2012, no. 52. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29444>
25. Kirdyashkin V.V., Sosulin Yu.G. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2010, no. 10, pp. 59 - 71.
26. Kirpichnikov A.P., Miftakhutdinov D.I., Rizaev I.S. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 17, pp. 186 - 189.
27. Elesina S.I., Lomteva O.A. *Tsifrovaya obrabotka signalov*, 2015, no. 3, pp. 71 - 76.
28. Lunev E.M., Neretin E.S., Dyachenko S.A. Dubrovo A.I. *Trudy MAI*, 2016, no. 86. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=66366>

29. Tatarskii B.G., Kirdyashkin V.V. *Radiotekhnika*, 2009, no. 12, pp. 58 - 63.

30. Dyachenko S.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL:

<http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91966>