

УДК 004.932

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД СОВМЕЩЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Новиков А.И., к.т.н., доцент кафедры «Высшая математика» Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: novikovanatoly@yandex.ru;

Логинов А.А., к.т.н., доцент кафедры «Электронные вычислительные машины» Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: loginal@mail.ru;

Колчаев Д.А., магистрант кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: 3force3@mail.ru.

COMBINED METHOD OF HETEROGENEOUS IMAGES IMPOSITION IN AVIATION COMPUTER VISION SYSTEM

Novikov A.I., Loginov A.A., Kolchaev D.A.

A combined algorithm for imposition of a real image with an image synthesized from a digital terrain map, using a prediction of navigational data is presented. The synthesized image in it is formed on the basis of the predicted values of navigation parameters. The prediction of the navigation parameter values is carried out for each frame of the video sequence according to the linear models in the finite memory scheme.

Key words: real and synthesized images, correlation-extreme algorithm, linear prediction, combination of images, quality of combining.

Ключевые слова: реальное и синтезированное изображения, корреляционно-экстремальный алгоритм, линейный прогноз, совмещение изображений, качество совмещения.

Введение

Необходимость решения задачи совмещения изображений и использования полученных результатов возникает во многих областях науки и техники. Создание систем технического зрения для летательных аппаратов (ЛА) обусловлено, в первую очередь, требованиями безопасности полетов при плохой видимости (сложные метеословия, ночной полет). Совмещение реальных изображений и изображений, синтезированных по цифровой карте местности, позволяет создавать и отображать на экране комбинированное изображение и, как следствие, обеспечивать управление ЛА в сложных условиях.

Для совмещения реального и синтезированного изображений корреляционно-экстремальными методами приходится генерировать некоторое множество ракурсов виртуальной карты местности. Под ракурсом понимается конкретный набор значений шестимерного арифметического вектора $\mathbf{v} = (x, y, h, \psi, \theta, \gamma)$ – навигационных параметров позиционирования ЛА. Параметры позиционирования ЛА являются исходными данными для формирования синтезированного изображения по цифровой карте местности.

Требования к точности совмещения изображений и быстродействию вычислительных алгоритмов, обеспечивающих решение задачи совмещения изображений и других вспомогательных задач, определяются документом [1]. В соответствии с этим документом ошибка совмещения реального и синтезированного изображений

Приведен комбинированный метод совмещения реального изображения и изображения, синтезированного по цифровой карте местности. Синтезированное изображение в нем формируется на основе прогнозируемых значений навигационных параметров, скорректированных на величины поправок. Поправки вычисляются однократно с помощью корреляционно-экстремального алгоритма при выходе прогнозных значений за пределы заданной погрешности. Прогноз значений навигационных параметров осуществляется для каждого кадра видеопоследовательности по линейным моделям в схеме с конечной памятью.

не должна превышать 5 миллирадиан по горизонтали и по вертикали. Корреляционно-экстремальные алгоритмы при корректном выборе размеров сетки и расположения ее узлов в шестимерном пространстве параметров обеспечивают хорошее качество совмещения, но требуют недопустимо высоких затрат машинного времени на их реализацию [2]. Еще одно преимущество корреляционно-экстремальных методов совмещения заключается в том, что одновременно с решением задачи совмещения изображений решается навигационная задача. Точка экстремума целевой функции – это оценка $\hat{\mathbf{v}}_{opt}$ вектора $\mathbf{v}_{ист} = (x_{ист}, y_{ист}, h_{ист}, \psi_{ист}, \theta_{ист}, \gamma_{ист})$, истинных значений навигационных параметров.

Желание использовать преимущества корреляционно-экстремальных методов совмещения изображений, заключающееся в гарантированно высоком качестве совмещения, с одной стороны, и недопустимо высокие затраты времени на реализацию алгоритмов этой группы, с другой стороны, вынуждают искать компромиссные решения. Один вариант решения этой проблемы предложен в работе [3]. В основу подхода, предлагаемого авторами этой работы, положены три предложения:



- отказ от перебора углов курса, крена и тангажа;
- использование пирамиды изображений Гаусса;
- использование данных о динамике перемещения летательного аппарата в последовательности кадров.

В работе [4] было показано, что если ошибки сенсоров углов тангажа, крена и курса не превосходят $0,1^\circ$, то рассогласование между парой соответствующих точек, обусловленное предельными значениями только этих ошибок, не превосходит 5 мрад. Это соответствует приблизительно 5 пикселям для камеры 704×576 пикселей и с углами обзора $40^\circ \times 30^\circ$. Поэтому отказ от перебора углов курса, крена и тангажа, с одновременным расширением поля зрения виртуальной камеры как по вертикали, так и по горизонтали, вполне обоснован.

Как следует из приведенных в [3] результатов экспериментальной проверки алгоритма совмещения с использованием пирамиды изображений совместно с расширением поля зрения, его быстрое действие увеличивается более чем в 30 раз по сравнению с полным перебором навигационных параметров. Значит, поиск способов комбинирования различных методов совмещения разнородных изображений является оправданным.

Схема алгоритма совмещения

Предлагаемый алгоритм совмещения реального видеоизображения и отвечающего ему виртуального изображения (ВИ), синтезированного по цифровой карте местности состоит из четырех основных этапов:

- выделение контуров на реальном изображении (РИ);
- улучшение контурных препаратов на РИ и ВИ;
- подготовительный режим к совмещению изображений;
- основной режим совмещения изображений.

Первые два этапа – выделение контуров градиентными методами [5, 6] и улучшение контурных препаратов с учетом специфики решаемых задач – рассмотрены подробно в работах [7, 8]. Выделение контуров производилось с помощью алгоритма Canny [9], а улучшение контурных изображений – с помощью базовых морфологических операций дилатации и эрозии [6].

На подготовительном этапе происходит накопление кадров изображений и отвечающих им значений навигационных параметров в количестве, равном заданной памяти прогнозной модели (5-7 кадров). Пусть $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_k$ – первые k значений шестимерного вектора навигационных параметров, полученные от соответствующих сенсоров. Для каждого из 6 параметров в составе вектора $\mathbf{v} = (x, y, h, \psi, \theta, \gamma)$ строится линейная модель по соответствующим k значениям этого параметра. В точке k одновременно формируется синтезированное изображение по ЦКМ, выполняется совмещение этого изображения с отвечающим ему реальным изображением с помощью корреляционно-экстремального алгоритма и находится оптимальная оценка вектора навигационных параметров $\hat{\mathbf{v}}_{opt}^{(k)}$.

На основном этапе для каждого i -го кадра ($i > k$) в скользящем режиме производится оценка параметров

a_0, a_1 прогнозных моделей по k точкам, предшествующим этому кадру, выполняется прогноз каждого параметра на одну точку вперед с корректировкой прогнозного значения на величину уклонения оптимальной оценки $\hat{u}_k^{КЭ}$ от фактического (см. выражение (2), верхний и нижний индексы?) значения данного параметра в этой точке:

$$\hat{u}_i = a_0^{(i)} + a_1^{(i)}(k+1) + \Delta u_k, \quad (1)$$

где

$$\Delta u_k = \hat{u}_k^{КЭ} - \hat{u}_k^{факт}, \quad (2)$$

Здесь u – один из 6 навигационных параметров.

По полученной прогнозной оценке $\hat{\mathbf{v}}_{прогн}^{(k+1)}$ вектора навигационных параметров по ЦКМ формируется синтезированное изображение и осуществляется совмещение (наложение) реального и виртуального изображений.

Вычислительный алгоритм

На подготовительном этапе для каждого из 6 навигационных параметров после получения первых k кадров в соответствии с методом наименьших квадратов вычисляются оценки $\hat{a}_0^{(k)}, \hat{a}_1^{(k)}$ прогнозных моделей (1):

$$\hat{a}_1^{(k)} = \frac{12}{k(k_2-1)} \left(B - \frac{k+1}{2} A \right) \quad (3)$$

$$\hat{a}_0^{(k)} = \frac{1}{k} \left(A - \frac{k(k+1)}{2} B \right),$$

$$\text{где } A = \sum_{j=1}^k u_j, \quad B = \sum_{j=1}^k j \cdot u_j.$$

Для конкретного значения параметра k – числа точек, по которым производится оценка коэффициентов линейной модели, – формулы (3) максимально упрощаются. Например, при $k=5$ будем иметь

$$\hat{a}_1^{(5)} = \frac{1}{10}(B-3A), \quad \hat{a}_0^{(5)} = \frac{1}{5}(A-15B), \quad (4)$$

Первое прогнозируемое значение параметра u в этом случае находится для 6-го кадра по формуле $\hat{u}_6 = \hat{a}_0^{(5)} + 6\hat{a}_1^{(5)} + \Delta u_5$, где $\Delta u_5 = \hat{u}_5^{КЭ} - \hat{u}_5^{факт}$. Для следующего 6-го кадра по формулам (4) находятся новые оценки параметров $\hat{a}_0^{(6)}, \hat{a}_1^{(6)}$ прогнозных моделей по фактическим значениям u_2, u_3, \dots, u_6 соответствующего навигационного параметра и осуществляется прогноз его значения к 7-у кадру: $\hat{u}_7 = \hat{a}_0^{(6)} + 6\hat{a}_1^{(6)} + \Delta u_5$ и т.д.

Оценка $\hat{u}_5^{КЭ}$ находится с помощью оптимизированного варианта корреляционно-экстремального алгоритма в схеме с расширенным ракурсом. Введение расширенного ракурса вместе с другими модификациями классического варианта корреляционно-экстремального алгоритма позволяет уменьшить вычислительную сложность алгоритма. Поле зрения расширяется, как показано на рис. 1 [10], по вертикали и по горизонтали с учетом интервалов неопределенности углов тангажа и курса соответственно. Такой подход позволяет отказаться от перебора углов курса и тангажа при поиске оптимального соответствия между РИ и ВИ.

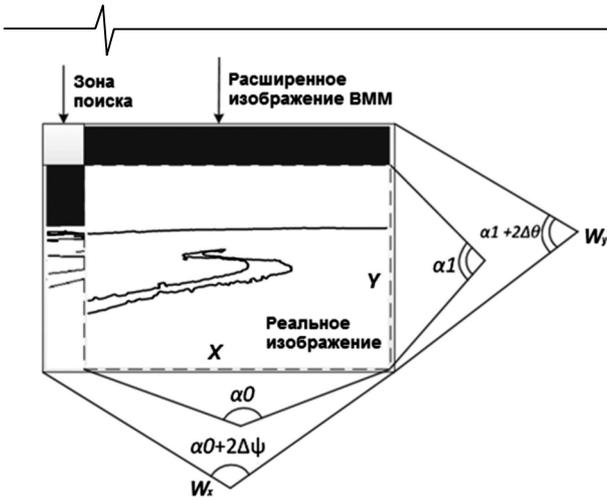


Рис. 1. Размеры расширенного ВИ

Алгоритм имеет два этапа. На первом этапе осуществляется сканирования координат по широте, долготе и высоте. На втором этапе обход координат осуществляется с уменьшенным в два раза шагом вокруг точки, найденной на первом этапе. На каждом этапе для уменьшения вычислительных затрат уточнение точки глобального экстремума осуществляется за счет последовательного трёхуровневого уточнения смещении левого верхнего угла обработанного реального изображения относительно левого верхнего угла расширенного виртуального изображения с учетом результатов предыдущего уровня. Значение критериальной функции вычисляется в каждом узле сетки.

На рис. 2 приведена схема корреляционно-экстремального алгоритма совмещения

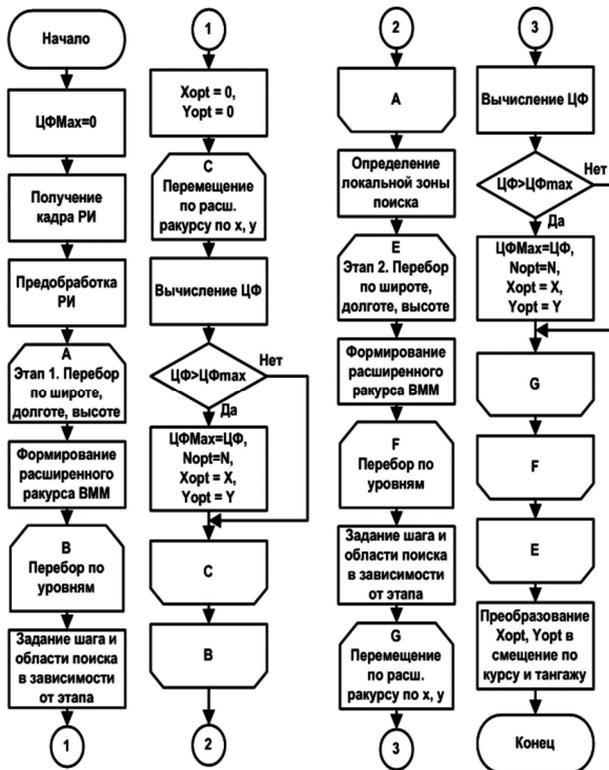


Рис. 2. Схема корреляционно-экстремального алгоритма

Входные данные алгоритма:

- реальное изображение в формате BMP 24 бит, полученное из AVI-файла;
- навигационные данные (информация о текущем мес-

тоположении летательного аппарата в пространстве);

– значения каждого из трех параметров (широты, долготы и высоты) в узлах сетки сканирования на 1-м этапе: $\{-100, -50, 0, 50, 100\}$, либо $\{-100, 0, 100\}$, т.е.

$5^3 = 125$ точек в первом и $3^3 = 27$ – во втором случае.

В качестве целевой функции для оценки степени совпадения реального и виртуального изображений использовалась парная критериальная функция Рао [11]

$$K = \frac{a}{a + e + b + c}.$$

В этой формуле использованы обозначения:

$a = F_{11}(I_{PI}, I_{ВИ})$ – число совпадений черных пикселей на сравниваемых реальном (I_{PI}) и виртуальном ($I_{ВИ}$) изображениях;

$b = F_{10}(I_{PI}, I_{ВИ})$ – число совмещенных пикселей, имеющих различную яркость на сравниваемых изображениях: черную на реальном (I_{PI}) и белую на виртуальном ($I_{ВИ}$);

$c = F_{01}(I_{PI}, I_{ВИ})$ – число совмещенных пикселей, имеющих различную яркость на сравниваемых изображениях: белую на реальном (I_{PI}) и черную на виртуальном ($I_{ВИ}$);

$e = F_{00}(I_{PI}, I_{ВИ})$ – число совпадений белых пикселей на сравниваемых реальном (PI) и виртуальном (ВИ) изображениях.

Рассмотрим схему работы корреляционного алгоритма.

1. На первом этапе последовательно выбираются узлы заданной сетки.

2. Вычисляются значения координат точки с наибольшим значением критериальной функции из окрестности возможного глобального экстремума. Шаг перемещения РИ относительно расширенного виртуального изображения задается равным 8-10 пикселям ($h_1 = 8 - 10$), как для перемещения по горизонтали, так и по вертикали. После того, как найдено значение максимума критериальной функции на этой сетке, запоминаются координаты ($X_{отн}$ и $Y_{отн}$) РИ относительно расширенного виртуального изображения, а так же значение максимума критериальной функции для этих координат.

3. На втором уровне формируется сетка с шагом $h_2 = h_1 / 2$, т.е. 4 или 5 пикселей в окрестности точки экстремума критериальной функции. Границы области поиска выбираются по определенной схеме в зависимости от соотношения величин $X_{отн}, Y_{отн}$ и шага h_1 смещений на предыдущем этапе. Для каждого смещения по координатам x, y вычисляются значения критериальной функции. Затем осуществляется поиск максимума критериальной функции в построенной области с вычислением новых значений $X_{отн}, Y_{отн}$ координат РИ относительно расширенного виртуального изображения.

4. На заключительном, третьем уровне шаг смещений по каждой координате выбирается равным 1 пикселю ($h_3 = 1$), а зона поиска формируется с учетом шага h_2 смещений предыдущего уровня.

В основном режиме совмещения изображений осуществляется поиск оптимальных значений параметров $\hat{a}_0^{(i)}, \hat{a}_1^{(i)}$ линейных моделей для каждого из 6 навигационных параметров. Оптимальные оценки параметров для каждого i -го кадра находятся по фактическим значениям каждого из этих параметров на k предыдущих кадрах. В результате формулы (3) видоизменяются следующим образом

$$\begin{cases} \hat{a}_1^{(i)} = \frac{12}{k(k_2-1)} \left(B_i - \frac{k+1}{2} A_i \right) \\ \hat{a}_0^{(i)} = \frac{1}{k} \left(A_i - \frac{k(k+1)}{2} B_i \right), \end{cases}$$

где $A_i = \sum_{j=1}^k u_{i+j-1}$, $B_i = \sum_{j=1}^k j \cdot u_{i+j-1}$, $i > k$.

Для каждого навигационного параметра осуществляется прогноз на один шаг (кадр) вперед по формуле (1) с корректировкой прогнозного значения на величину поправки $\Delta u_k = \hat{u}_k^{КС} - \hat{u}_k^{факт}$. В результате получаем вектор \hat{v}_{i+1} прогнозных значений навигационных параметров для следующего $i+1$ -го кадра. На основании этого вектора формируется ВИ и осуществляется наложение этого изображения на реальное изображение.

Прогнозное значение каждого параметра $k+1$ -му кадру сравнивается с его фактическим значением в этой точке. Если модуль уклонения $|\hat{u}_{i+1} - u_{i+1}^{факт}|$ окажется больше заданного порога ε , то производится запуск корреляционно-экстремального алгоритма и с его помощью формируется новое значение поправки $\Delta u_{i+k} = \hat{u}_{i+k}^{КС} - \hat{u}_{i+k}^{факт}$.

Экспериментальная часть и обсуждение

Апробация представленного алгоритма совмещения разнородных изображений проводилась на реальных видеоизображениях, синхронизированных с навигационными параметрами, полученными в ходе реальных полетов.

На рис. 3 приведены графики изменения параметров высоты и тангажа, полученные по навигационным данным в одном из таких полетов. По горизонтальной оси на рисунке отложены номера кадров, а по вертикальной оси – значения высоты в метрах и здесь же – угла тангажа в градусах. Четыре значения угла тангажа: $-11^\circ, 0^\circ, 2,5^\circ, 10^\circ$ – выделены на рисунке горизонтальными линиями с соответствующими надписями с правой стороны рисунка.

Можно отметить достаточно гладкий характер изменения высоты и значимые флуктуации угла тангажа. Кроме того, угол тангажа изменяется достаточно резко, но при этом согласованно с изменением высоты (5 раз за время полета в рассматриваемом фрагменте из 200000 кадров).

Количество прогнозируемых кадров до срыва зависит как от навигационных данных, так и от результата корреляционного совмещения. В среднем, это количество на рассматриваемых сюжетах равно 58.

На рис. 4 приведена иллюстрация совмещения РИ и ВИ в каждом из двух режимов работы комбинированного корреляционно-экстремального алгоритма, дополненного блоком прогнозирования навигационных параметров. Значение параметра k в блоке прогнозирования РИ навигационных параметров было взято равным 5. На рис. 4 а приведен результат простого наложения ВИ, сгенерированного по фактическим значениям навигационных параметров для 5-го кадра, содержащих ошибки позиционирования. Этому кадру соответствуют по 5 предшествующих значений каждого из 6 навигационных параметров, необходимых для построения прогнозных моделей. В этой точке выполняется одновременно и корреляционно-экстремальное совмещение ВИ и РИ. Результат такого совмещения ВИ с РИ приведен на рис. 4 б. На визуальном уровне качество совмещения можно оценить как достаточно высокое.

В основном режиме, начиная с 6-го кадра, совмещение ВИ с РИ производится только на основании прогнозных значений навигационных параметров. Пример такого совмещения для 51-го кадра приведен на рис. 4 в и 4 г. На рис. 4 в представлен результат простого наложения ВИ на РИ. Можно отметить существенное расхождение реального и виртуального изображений. На рис. 4 г приведен результат совмещения ВИ и РИ на основании спрогнозированных значений навигационных данных. Качество совмещения изображений можно оценить как вполне удовлетворительное.

Отметим, что преобразование найденного смещения изображения ВММ относительно расширенного изображения в изменения углов курса и тангажа производится по формулам:

$$\begin{cases} dKurs = \frac{(X_1 - X_0) cm_x}{W}, \\ dTang = \frac{(Y_1 - Y_0) cm_y}{H}, \end{cases}$$

где W, H – ширина и высота реального изображения, cm_x, cm_y – углы зрения камеры, X_0, Y_0 – координаты левого верхнего угла изображения ВММ относительно расширенного изображения при совмещении центров изображений, X_1, Y_1 – координаты левого верхнего угла изображения ВММ после совмещения.

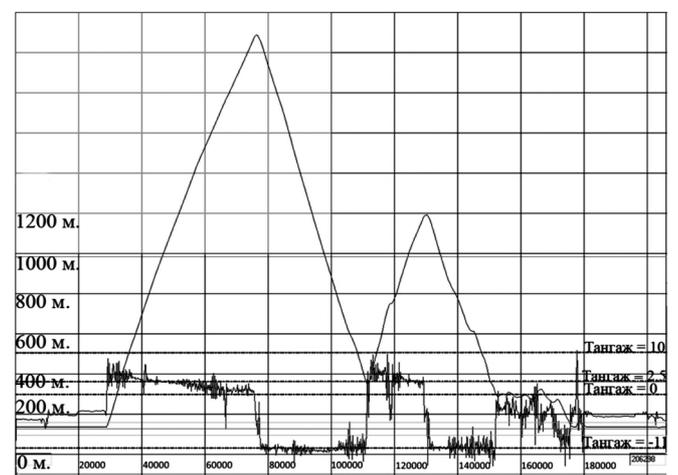


Рис. 3. Динамика изменения параметров высоты и тангажа

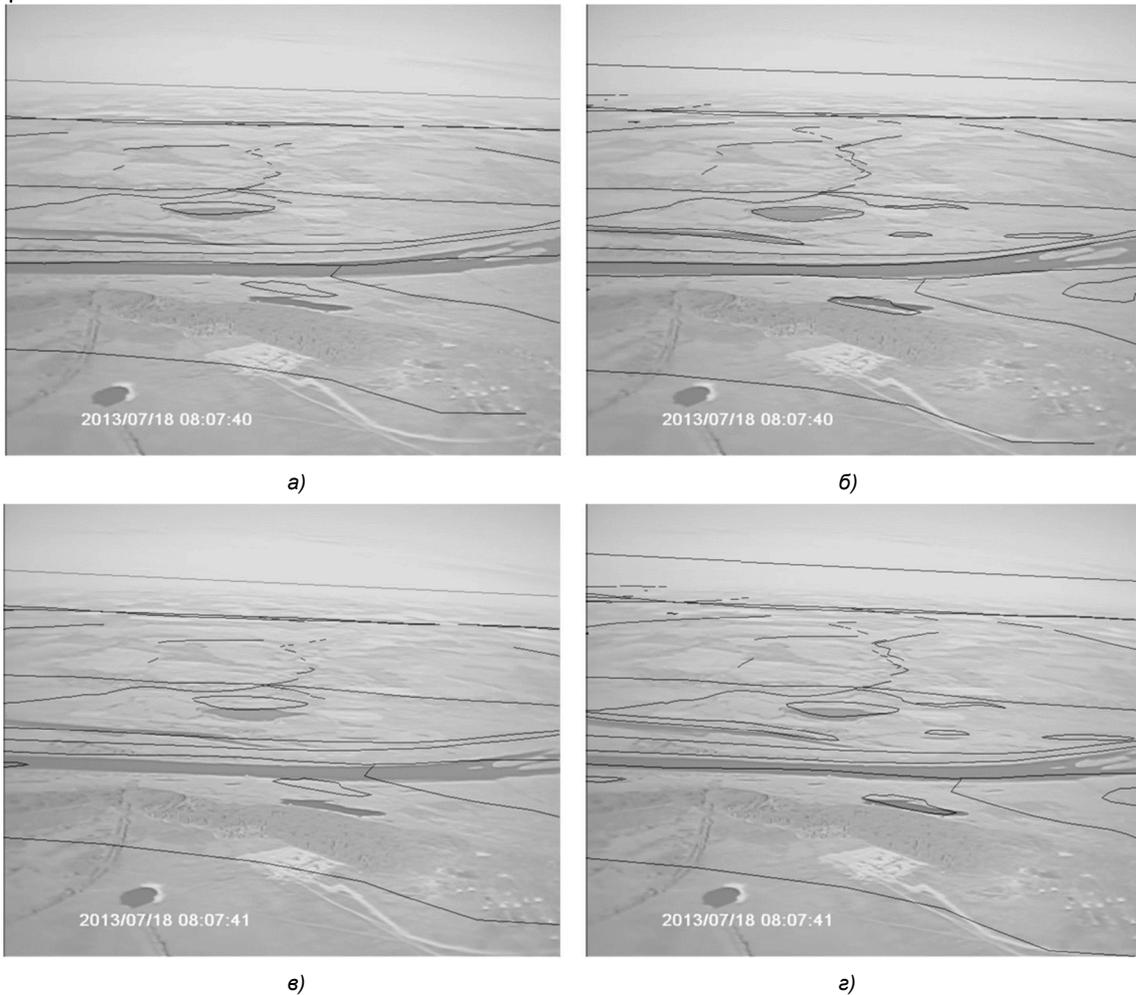


Рис. 4. Совмещение изображений: а – простое наложение ВИ на РИ на 5-м кадре;
 б – результат совмещения ВИ и РИ корреляционным алгоритмом на 5-м кадре;
 в – простое наложение ВИ на РИ на 51-м кадре;

г – результат совмещения ВИ и РИ на 51-м кадре на основании спрогнозированных значений навигационных данных

Вычисления проводились на компьютере с процессором Intel Core i3-550, ОЗУ 2Гб, по оригинальной программе, написанной на языке СИ++. Затраты машинного времени на выполнение совмещения корреляционно-экстремальным алгоритмом для одного кадра в среднем равны 4,8 сек. В основном режиме работы алгоритма расчет параметров прогнозных моделей для каждого кадра осуществляется практически мгновенно, но при этом 0,15 сек тратится на формирование ВИ по ЦКМ и наложение ВИ на РИ.

Апробация алгоритма выполнена на различных видах подстилающей поверхности по видеопоследовательностям длиной в 500-1000 кадров. Ожидаемо, наилучшие результаты совмещения получены на сюжетах, содержащих объекты постоянного присутствия на поверхности Земли: водные объекты, дороги. Частота перехода из основного, быстрого режима работы алгоритма совмещения изображений – прогнозирования значений навигационных параметров, – в режим корректировки поправок к значениям навигационных параметров корреляционно-экстремальным алгоритмом в значительной мере зависит от частоты и величин изменений компонент вектора навигационных параметров.

На рис. 5 представлен фрагмент графика показателя качества совмещения РИ и ВИ по предложенному алгоритму.

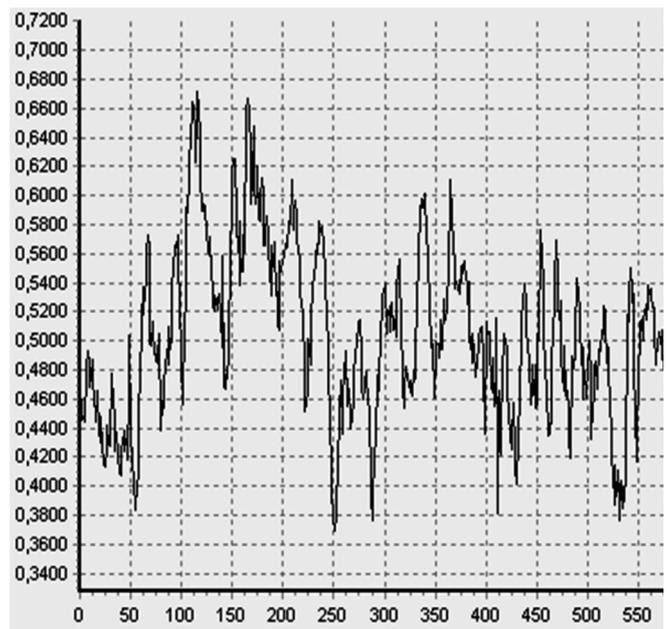


Рис. 5. Зависимость качества совмещения предложенного алгоритма от номера кадра

На графике по горизонтали отложены номера кадров, а по вертикали значения показателя α качества совмещения. Значение интегрального показателя качества

α для каждого кадра находилось как отношение числа совпавших черных пикселей при наложении ВИ на контурный образ реального изображения к общему числу черных пикселей на РИ [8]. Данный показатель является нормированным и его значения изменяются в пределах от 0 до 1. На реальных изображениях даже при хорошем (по мнению экспертов) качестве совмещения его значение находится на уровне 0,45...0,65. Среднее значение показателя качества в эксперименте, соответствующем рис. 5, оказалось равным 0,512. В других сериях сюжетов оно находилось в пределах 0,48...0,53. Минимальные значения показателя качества на рис. 5 в основном соответствуют моментам переключения алгоритма из режима совмещения ВИ с РИ на основании прогнозных значений навигационных параметров в режим корреляционно-экстремального совмещения.

Было выполнено сравнение предлагаемого алгоритма с алгоритмами «Трехуровневая пирамида изображений» и «Анализ последовательности изображений» [3]. Вычисления проводились в одинаковых условиях на программном стенде и на одинаковой видеопоследовательности изображений, состоящей из 799 кадров. Оценивались качество совмещения для каждого кадра и время работы алгоритма для одного кадра. Результаты этого сравнения представлены в таблице.

Таблица. Результаты сравнение алгоритмов совмещения

Название алгоритма	Качество совмещения	Время выполнения, с.
1. Простое наложение РИ на ВИ	0,311	0
2. Трехуровневая пирамида изображений	0,357	14,3 (44,6)
3. Анализ последовательности изображений	0,326	0,1 (7,6)
4. Корреляционное совмещение и экстраполяция	0,512	0,15 (4,8)

Для алгоритмов 2 и 3 в третьем столбце таблицы в скобках указано время работы алгоритмов, приведенное в статье [3], а без скобок – время работы, зафиксированное в ходе исследований алгоритмов на программном стенде. Для алгоритма 4 в скобках указано время работы предлагаемого алгоритма в режиме корреляционно-экстремального совмещения, а без скобок – в основном режиме прогнозирования.

Можно отметить, что предлагаемый алгоритм по показателю качества совмещения и времени, затрачиваемому на обработку одного кадра, не уступает в целом сравниваемым алгоритмам.

Заключение

Представлен алгоритм, основанный на комбинировании двух режимов совмещения: корреляционно-экстремального и совмещения по экстраполированным значениям навигационных параметров, скорректированных на величины соответствующих поправок. Выполнены сравнительные испытания предложенного ал-

горитма с другими известными алгоритмами на реальных видеопоследовательностях.

Сочетание преимуществ корреляционно-экстремального алгоритма при совмещении разнородных изображений с высоким быстродействием алгоритма совмещения, основанного на использовании прогнозных значений навигационных параметров, позволяет реализовать его в бортовом вычислительном комплексе.

Литература

1. Руководство Р-315 «По минимальным стандартам характеристик авиационных систем (MASPS) для систем улучшенного видения, систем искусственного видения, комбинированных систем искусственного видения и бортовых систем увеличения дальности видения» Авиационного Регистра Межгосударственного Авиационного Комитета (АР МАК). М. 2008. 86 с.
2. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения. Тверь: Книжный клуб, 2009. 216 с.
3. Бабаян П.В., Ершов М.Д.. Алгоритмы устранения рассогласования разнородных изображений в бортовой системе видения // Вестник РГРТУ, № 54, Часть 2, Рязань, 2015. с. 15-20.
4. Герман Е.В., Муратов Е.Р., Новиков А.И. Математическая модель формирования зоны неопределенности в задаче совмещения изображений // Вестник РГРТУ, № 4, вып. 46, часть 2. Рязань, 2013. с. 10-16.
5. Форсайт Д.А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
6. Гонзалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
7. Ефимов А.И., Новиков А.И. Алгоритмы совмещения изображений на основе преобразования в комплексной плоскости// Тезисы научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления», Москва, 14-16 марта 2017. с. 34-36.
8. Anatoly I. Novikov, Victoria A. Sablina, Aleksey I. Efimov, Michael B. Nikiforov. Contour Analysis in the tasks of real and virtual images superimposition// Journal Coupled Systems and Multiscale Dynamics, vol 4(4), 2016 pp. 251-259. (Doi: 10.1166/jcsmd. 2016.1112 J. Coupled Syst. Multiscale Dyn. vol 4(4)/2330-152X/2016/251/009).
9. J. Canny; A computational approach to edge detection; Proc. Of IEEE Transactions on Pattern and Machine Intelligence PAMI-8, 679 (1986).
10. S. Elesina, O. Lomteva. Increase of image combination performance in combined vision systems using genetic algorithm. Proceedings of the 3rd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). Montenegro, Budva, 2014, pp. 158-161.
11. Елесина С.И., Ефимов А.И. Отбор критериальных функций для систем улучшенного и комбинированного видения // Известия ТулГУ, технические науки, вып. 9, ч. 1. 2013. – С. 229-236.