

Программно-алгоритмический комплекс совмещения изображений в авиационных системах технического зрения

А.И. Ефимов^а, А.И. Новиков^а

^а Рязанский государственный радиотехнический университет, 390005, ул. Гагарина, 59, Рязань, Россия

Аннотация

Одной из важнейших задач, решаемых на борту воздушного судна, является задача совмещения реальных изображений и изображений, синтезированных по цифровой карте местности. Комплекс вспомогательных задач и собственно задача совмещения должны решаться в реальном времени (с частотой 25 кадров в секунду) и с жесткими требованиями к точности совмещения разнородных изображений. Традиционные корреляционно-экстремальные методы совмещения обеспечивают требуемую точность, но требуют недопустимо больших затрат машинного времени. В работе приводится описание алгоритма совмещения, основанного на аффинных преобразованиях синтезированного изображения к плоскости реального видеоизображения, а также алгоритмов решения вспомогательных задач.

Ключевые слова: предварительная обработка; контурный препарат; улучшение изображений; аффинные преобразования; преактивные преобразования; совмещение изображений.

1. Введение

Необходимость повышения безопасности полетов воздушного судна, обеспечения безопасного захода на посадку и приземления требует создания новых способов интеграции и интерпретации информации от бортовых систем технического зрения (СТЗ) различных спектральных диапазонов, а также от навигационных приборов и цифровой карты местности (ЦКМ) [1,2]. Видеоинформация от СТЗ совместно с синтезированным изображением рельефа местности, картографической и навигационной информацией, поступающими в режиме реального времени, помогают экипажу осуществлять пилотирование и посадку в условиях плохой видимости. В составе бортовых СТЗ могут присутствовать телевизионная (ТВ) камера, тепловизор, лидар и радиолокатор, которые формируют соответственно ТВ, тепловизионное (ТПВ) и локационные изображения подстилающей поверхности.

2. Объект исследования

Объектом исследования является процесс совмещения реального телевизионного (ТВ изображение), получаемого с телевизионной камеры, установленной на борту воздушного судна, и синтезированного изображений в бортовых СТЗ. Синтезированное изображение формируется в бортовом вычислителе по цифровой карте местности. Совмещение реального и синтезированного изображений в бортовых СТЗ – это одна из важнейших и наиболее трудных задач, решаемых в бортовом вычислительном комплексе. Проблемы, возникающие при ее решении, обусловлены рядом причин. Одна из основных заключается в ошибках определения текущих координат воздушного судна как материальной точки в воздушном пространстве (широты λ , долготы φ и высоты h), а также в ошибках определения ориентации воздушного судна как протяженного объекта в пространстве. К ним относятся ошибки в измерении параметров курса ψ , тангажа θ и крена γ . Ошибки могут присутствовать и в цифровой карте местности (ЦКМ). Еще одним источником ошибок могут быть сами сенсоры, формирующие изображение. Разная природа реального и синтезированного изображений является еще одной причиной, затрудняющей решение задачи совмещения изображений. К ошибкам позиционирования могут добавляться еще и геометрические искажения, привносимые в обработанные изображения на этапах выделения границ перепада яркостей и формирования замкнутых контуров.

3. Методы исследования

Широко известные корреляционно-экстремальные методы совмещения изображений, как показывает практика их применения, обеспечивают достаточно хорошее качество совмещения [3]. Однако в данном случае поиск глобального экстремума целевой функции сопряжен с формированием порядка 10^6 ракурсов (наборов из 6 чисел – координат вектора $\mathbf{v} = (x, y, h, \psi, \theta, \gamma)$ навигационных параметров) и, как следствие, с недопустимо большими затратами машинного времени. Известны попытки сокращения размерности пространства параметров за счет использования расширенного ракурса при формировании синтезированного изображения и применения пирамиды разномасштабных изображений для последовательного уточнения точки глобального оптимума целевой функции при корреляционно-экстремальном подходе к совмещению изображений [4]. Такая модернизация корреляционно-экстремальных методов совмещения приводит к сокращению вычислительных затрат, но не решает проблему до конца как по времени, так и по точности решения задачи.

Предельные значения ошибок в определении навигационных параметров задают в 6-ти мерном пространстве параметров соответствующий параллелепипед. В пределах этого параллелепипеда формируется сетка с узлами. По значениям вектора параметров в каждом узле строится синтезированное изображение. Это изображение накладывается на реальное изображение, вычисляется и запоминается значение целевой функции, являющейся мерилем качества совмещения. После перебора всех узлов находится глобальный экстремум целевой функции и вектор навигационных параметров V_{opt} , на котором достигается этот оптимум.

Альтернативный способ совмещения изображений сводится к поиску на паре разнородных изображений одних и тех же объектов, их сопоставлению, вычислению геометрического преобразования одного изображения к плоскости другого и слияния изображений для отображения пилоту. Алгоритмы, основанные на геометрическом преобразовании синтезированного изображения к плоскости реального, требуют меньших вычислительных затрат на их реализацию по сравнению с корреляционно-экстремальными методами и обеспечивают приемлемое качество совмещения изображений. Однако применимы эти методы в тех случаях, когда на подстилающей поверхности устойчиво выделяются контуры объектов постоянного присутствия (водные объекты, дороги, крупные сооружения и т.д.). Кроме того узким местом в этих методах является поиск на паре совмещаемых изображений ключевых (соответствующих) точек, с помощью которых строится преобразование синтезированного изображения к плоскости реального. Корректность выбора ключевых точек определяет степень близости «совмещенных» изображений, то есть качество совмещения изображений [5]. Способы повышения качества совмещения изображений с помощью проективных преобразований при наличии малоинформативных областей на изображении и, как следствие, наличии некорректных пар ключевых точек, предлагаются в работах [6,7]. Альтернативный и широко распространенный способ построения качественного проективного преобразования при наличии в множестве пар ключевых точек некоторого подмножества некорректных пар заключается в использовании алгоритма RANSAC [8].

Рассматриваемый ниже алгоритм совмещения основан на анализе и сопоставлении контуров на паре изображений. В его основе аффинные преобразования синтезированного изображения к плоскости реального видеоизображения. Аффинные преобразования не учитывают проективные искажения, которые неизбежно возникают при аэрофотосъемках [9]. Их преимущество заключается в простоте реализации, низких вычислительных затратах, обеспечивающих функционирование в реальном времени, и удовлетворительном качестве совмещения изображений. Предлагаемый алгоритм занимает промежуточное положение между корреляционно-экстремальными методами совмещения и методами проективной геометрии и является определенным компромиссом в условиях, когда названные методы не удается реализовать в автоматическом режиме с приемлемыми точностными и временными характеристиками.

Совмещение изображений хотя и является заключительной и очень важной процедурой, но возможность и качество совмещения изображений существенно зависят от того, насколько успешно решены вспомогательные задачи. К ним относятся задачи выделения контуров на изображениях, улучшения изображений, идентификации контуров и установления взаимно однозначного соответствия между контурами на паре разнородных изображений, формирование множества пар ключевых точек.

3.1. Алгоритм совмещения на основе преобразования в комплексной плоскости

Для реализации алгоритма необходимо иметь контуры объектов постоянного присутствия как на реальном изображении, так и на отвечающем ему синтезированном изображении. К качеству контуров, которые используются в алгоритме, предъявляются определенные требования. Они обсуждаются ниже.

Алгоритм основан на аффинном преобразовании точек на комплексной плоскости по формуле $z_k^{(r)} = z_{np} \cdot z_k^{(s)}$, $z = x + iy$, где $z_k^{(s)}$ – точка на контуре синтезированного изображения, $z_k^{(r)}$ – результат преобразования, к плоскости реального изображения, $z_{np} = x_{np} + iy_{np}$ – комплексное число, обеспечивающее преобразование точек одного изображения к плоскости другого. Для нахождения комплексного числа z_{np} необходимо найти на одном и на втором контурах по паре соответствующих (ключевых) точек.

Пусть D – некоторая область на изображении с границей ∂D . В предлагаемом варианте алгоритма в качестве соответствующих точек берутся точки, принадлежащие концам диаметра области, т. е. $\{M_1, M_2\} = \arg \max_{M_i, M_j \in \partial D} \rho(M_i, M_j)$. Такие точки находятся для соответствующих объектов, как на реальном, так и на отвечающем ему синтезированном изображениях. Найденным точкам $M_1(x_1, y_1)$ и $M_2(x_2, y_2)$ на реальном изображении и отвечающим им точкам $M'_1(x'_1, y'_1)$, $M'_2(x'_2, y'_2)$ на синтезированном, ставятся в соответствие векторы $\mathbf{a}_1 = (x_2 - x_1; y_2 - y_1)$ и $\mathbf{a}'_1 = (x'_2 - x'_1; y'_2 - y'_1)$. На комплексной плоскости этим векторам отвечают комплексные

числа $z_1 = x_2 - x_1 + i(y_2 - y_1)$ и $z'_1 = x'_2 - x'_1 + i(y'_2 - y'_1)$. Комплексное число z_{np} , осуществляющее преобразование всех точек виртуального изображения к плоскости реального, находится по формуле $z_{np} = \frac{z_r}{z_s} = \frac{z_r \cdot \bar{z}_s}{z_s \cdot \bar{z}_s}$.

Алгоритм нахождения точек M_1, M_2 , принадлежащих концам диаметра таков. Берется произвольная точка M на контуре, выбирается направление обхода контура, и в этом направлении находится ближайшая точка \tilde{M} , на которой реализуется локальный максимум

$$\rho(M, \tilde{M}) = \max_{M_j \in \partial D} \rho(M, M_j) \quad (1)$$

Затем точка \tilde{M} принимается за начальную, и теперь уже для нее находится следующая точка, на которой достигается локальный максимум вида (1). После полного обхода контура в выбранном направлении из множества локальных максимумов выбирается глобальный и, как следствие, находятся искомые точки M_1, M_2 . Большой объем экспериментальных исследований алгоритма нахождения точек M_1, M_2 , принадлежащих концам диаметра, подтверждает его корректность. Для поиска точек M_1, M_2 , принадлежащих концам диаметра некоторого контура, необходимо, чтобы контур был замкнут. Контур реального изображения, полученные в результате применения алгоритмов выделения границ перепада яркости, могут содержать разрывы. На основании информации из цифровой карты местности известен тип объекта и, в частности, понятно, что контуры его границ должны быть замкнуты. Ниже описывается алгоритм формирования контуров и дополнительной обработки, призванный улучшить контурное изображение и, в частности, устранить разрывы малой длины, контуры которых должны быть замкнуты.

Качество совмещения изображений с помощью описанного алгоритма зависит от качества выделения границ перепада яркости. Контурные препараты, полученные в результате выделения границ перепада яркости, содержат, как правило, большое число коротких линий. Они существенно затрудняют поиск объектов интереса и установление взаимно однозначного соответствия между такими объектами (между контурами объектов) на реальном и отвечающем ему виртуальном изображениях. Для устранения этих недостатков был разработан алгоритм дополнительной обработки контурных изображений. Он позволяет отсеять как замкнутые, так и незамкнутые линии малой длины. Описание алгоритма приведено в [10]. На рис. 1 приведены соответственно исходное ТВ изображение, границы, выделенные с использованием детектора Canny [11] и улучшенное контурное изображение, а также отвечающее исходному ТВ изображению синтезированное изображение.

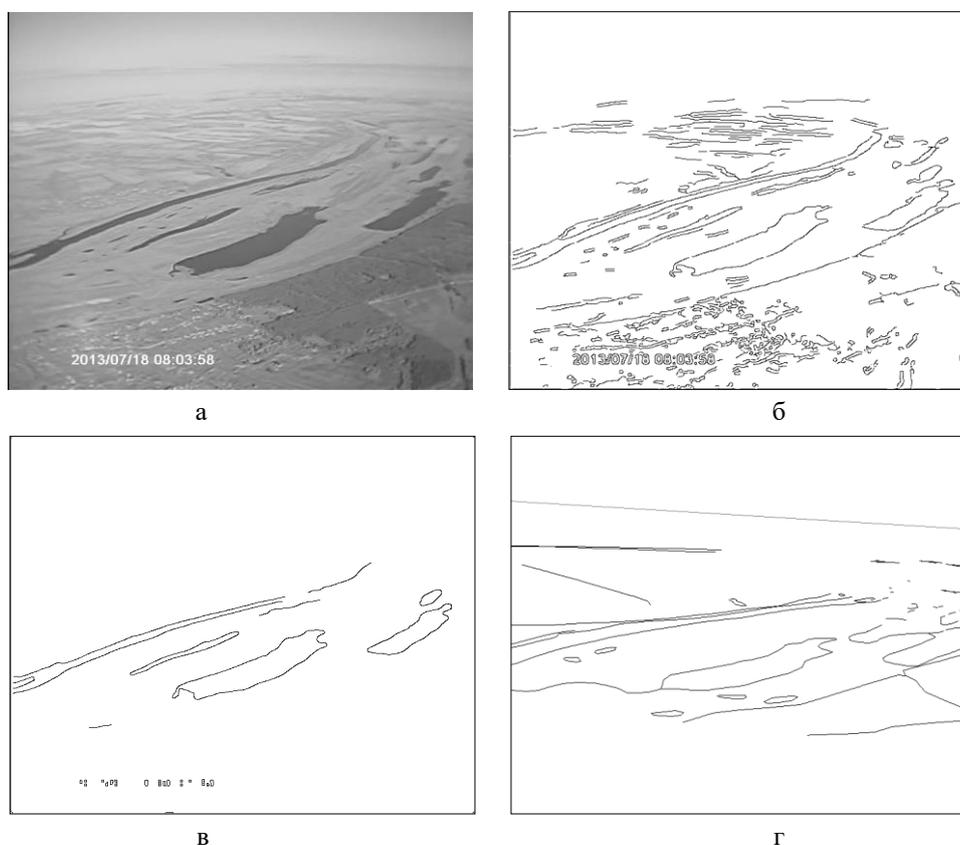


Рис. 1. Изображения на разных стадиях выполнения технологической цепочки:

а – исходное ТВ изображение; б – границы, выделенные с использованием детектора Canny;
в – улучшенное контурное изображение; г – синтезированное изображение, построенное по цифровой карте местности.

После того, как получено улучшенное изображение границ (рис. 1,в), требуется получить описание контуров как связанного множества точек. Эта процедура реализована следующим образом:

- 1) просматриваются пиксели растрового черно-белого изображения, полученного в результате предшествующей обработки;
- 2) если найден черный пиксель, он принимается как начало контура, помечается текущим пикселем для анализа, начинается итеративное выполнение шагов 3-4. Черные пиксели, ранее включенные в состав некоторого контура, исключаются из рассмотрения;
- 3) просматриваются пиксели, соседние с текущим пикселем, в порядке, показанном на рисунке 2. В случае нахождения в позициях 1-8 соседа, он добавляется в контур и помечается как текущий, операция повторяется;
- 4) если в позициях 1-8 нет черных пикселей, обход контура прекращается, происходит возврат к шагу 1;
- 5) если просмотрены все пиксели изображения, происходит завершение работы алгоритма.

5	1	6
3	X	4
8	2	7

Рис. 2. Порядок просмотра точек при оконтуривании.

На практике часто встречаются случаи, когда контур протяженного объекта содержит незначительные разрывы. С этой целью к полученным с помощью описанного выше подхода контурным описаниям применяется операция дополнительного объединения в том случае, если расстояние между крайними точками (началом и концом) некоторой пары контуров не превышает порогового значения (пороговое значение принято равным 7 пикселям). Операция дополнительного объединения заключается в добавлении к списку пикселей одного контура пикселей другого в случае, если выполняется описанное выше условие. Это позволяет устранить малые разрывы и повысить качество последующих процедур совмещения.

В результате после обработки всего изображения имеем набор связанных контуров. Естественным и логичным представляется удаление из него контуров малой длины, то есть контуров, число пикселей в которых менее порогового значения (в результате экспериментальных исследований установлено, что для изображений с разрешением 704×576 пикселей длина контуров должна быть более 120 пикселей). В итоге получаем связанные контуры большой длины, соответствующие протяженным объектам на исходном изображении. Помимо проверки на превышение минимальной пороговой длины, выполняется проверка на удовлетворение ряду дополнительных условий (подробно смысл данных величин будет описан ниже):

– координаты (x, y) «центра масс» объекта должны лежать в некоторой окрестности хотя бы одного из объектов с виртуальной карты, в противном случае для названного объекта не будет найдено соответствий, что негативным образом повлияет на конечный результат совмещения изображений;

– длина d диаметра контура должна составлять не более $2/3$ от его длины L ;

– ширина w контура не менее 12 пикселей.

Выполнение указанных дополнительных условий гарантирует, что на изображении останутся только контуры протяженных замкнутых объектов, которые можно использовать для дальнейшего совмещения.

3.2. Автоматическая идентификация контуров и установление соответствий между ними на реальном и виртуальном изображениях

Цифровая карта местности содержит информацию о типах объектов, контуры которых отображаются на синтезированном изображении. Эта информация позволяет идентифицировать соответствующие объекты на синтезированном изображении. Контурный аналог реального изображения может не содержать контуры некоторых объектов, которые, тем не менее, присутствуют на синтезированном изображении. И, наоборот, на реальном изображении могут присутствовать контуры, которые содержат определенные отличия от соответствующих им контуров на синтезированном изображении. Отличия могут быть обусловлены как не актуальным состоянием цифровой карты местности, так и недостатками алгоритмов выделения контуров на всех этапах обработки реального изображения.

На визуальном уровне однозначное соответствие между контурами объектов устанавливается достаточно легко. Задача установления такого соответствия компьютером в автоматическом режиме является достаточно сложной. Для решения данной задачи предложен алгоритм, основанный на использовании ряда числовых характеристик. Они вычисляются для каждого контура на реальном и синтезированном изображениях:

- координаты (x, y) «центра масс» объекта;

- длина L контура;

- длина d диаметра контура;
- ширина w контура.

Обозначим $M_i^r(x_i^r, y_i^r)$, $M_j^s(x_j^s, y_j^s)$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$ центры масс объектов, контуры которых выделены соответственно на реальном и синтезированном изображениях. Здесь i - номер объекта на реальном изображении, а j - на синтезированном изображении. Координаты «центров масс» находятся как средние значения по соответствующей координате по всем пикселям контура. Для множества объектов на реальном и на виртуальном изображениях строится матрица расстояний между центрами масс размером $I \times J$, т.е.

$$\begin{pmatrix} \rho(M_1^r, M_1^s) & \rho(M_1^r, M_2^s) & \dots & \rho(M_1^r, M_J^s) \\ \rho(M_2^r, M_1^s) & \rho(M_2^r, M_1^s) & \dots & \rho(M_2^r, M_J^s) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho(M_I^r, M_1^s) & \rho(M_I^r, M_1^s) & \dots & \rho(M_I^r, M_J^s) \end{pmatrix}.$$

Расстояния находятся в евклидовой метрике.

Анализ соответствий между центрами масс объектов основан на вполне реалистичном предположении, что смещение объекта на синтезированном изображении относительно отвечающего ему объекта на реальном изображении не превосходит некоторой предельной величины T . Поэтому, если в некоторой строке i_0 таблицы расстояний все расстояния больше этой величины, то объекту под номером i_0 на реальном изображении не соответствует никакой объект на синтезированном изображении. Соответственно, если такая ситуация имеет место в j_0 -м столбце, то объекту под номером j_0 на синтезированном изображении не соответствует никакой объект на реальном изображении. Такие объекты не участвуют дальше в процедуре установления соответствия между объектами.

После удаления из матрицы объектов, не имеющих соответствующего объекта на другом изображении, начинается собственно процедура установления соответствия между объектами. Пусть I_1, J_1 – количества оставшихся объектов соответственно на реальном и на синтезированном изображениях. Для всех оставшихся объектов как на реальном, так и на виртуальном изображениях вычисляются:

- длины L_i^r, L_j^s , $i = \overline{1, I_1}$, $j = \overline{1, J_1}$ контуров;
- длины d_i^r, d_j^s , $i = \overline{1, I_1}$, $j = \overline{1, J_1}$ диаметров;
- значения ширины объектов w_i^r, w_j^s , $i = \overline{1, I_1}$, $j = \overline{1, J_1}$.

Под длиной контура в данном алгоритме понимается число пикселей в контуре. Под шириной области понимается длина $|\mathbf{b}|$ вектора $\mathbf{b} = \overrightarrow{N_1 N_2}$ с концами на контуре в его средней части и ортогонального вектору \mathbf{a} – диаметру области.

После того как все числовые характеристики всех объектов найдены выполняется цепочка вычислительных процедур и сравнений. Последовательно, в цикле по i от 1 до конца списка реальных объектов, выбираются объекты и для каждого из них выполняются следующие действия:

1) в цикле по j проверяется выполнение неравенства $\rho(M_i^r, M_j^s) < T$. Объекты j_1, j_2, \dots, j_k , для которых это неравенство выполняется, участвуют в дальнейшем сравнении, остальные нет;

2) по каждому из трех параметров L, d, w для i -го контура на реальном изображении ищется ближайший «сосед» на синтезированном изображении

$$\begin{aligned} j_1^* &= \arg \min_j \left\{ |L_i - L_{j_1}|, |L_i - L_{j_2}|, \dots, |L_i - L_{j_k}| \right\} \\ j_2^* &= \arg \min_j \left\{ |d_i - d_{j_1}|, |d_i - d_{j_2}|, \dots, |d_i - d_{j_k}| \right\} \\ j_3^* &= \arg \min_j \left\{ |w_i - w_{j_1}|, |w_i - w_{j_2}|, \dots, |w_i - w_{j_k}| \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

Ближайший сосед в каждом из трех условий в (2) должен удовлетворять еще неравенству $|L_i - L_{j_1^*}| < \delta \cdot L_i$, $|d_i - d_{j_2^*}| < \delta \cdot d_i$, $|w_i - w_{j_3^*}| < \delta \cdot w_i$. Здесь $\delta = 1,3$. Эти неравенства основаны на предположении, что значения каждого из трех параметров для соответствующих объектов на реальном и виртуальном изображениях не могут отличаться более, чем на $\delta - 1$ в относительных единицах.

Если $j_1^* = j_2^* = j_3^* = j^*$, то принимается решение о том, что объекту с номером i на реальном изображении соответствует объект с номером j^* на виртуальном изображении. Если же все величины j_1^*, j_2^*, j_3^* различны, то принимается решение о том, что для объекта с номером i на реальном изображении не найден отвечающий ему объект на виртуальном изображении.

4. Результаты

На рис. 3 приведены контуры объектов, выделенных на реальном и синтезированном изображениях после этапа улучшения изображений.

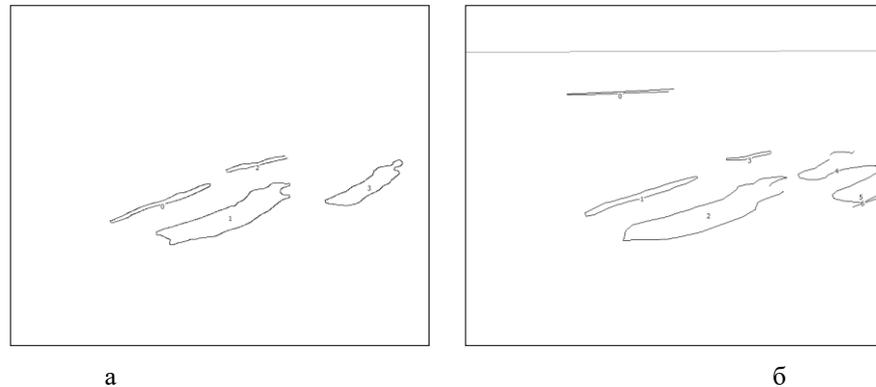


Рис. 3. Контуров объектов выделенные на реальном (а) и синтезированном (б) изображениях.

В соответствии с алгоритмом установления соответствия на паре изображений были вычислены расстояния между каждым объектом на реальном изображении и всеми объектами на виртуальном изображении. Эти расстояния приведены в таблице 1.

Таблица 1. Расстояния между объектами на реальном и синтезированном изображениях

Объект	РИ-0	РИ-1	РИ-2	РИ-3
СИ-0	187	233	196	376
СИ-1	42	80	130	307
СИ-2	152	39	82	200
СИ-3	234	145	63	134
СИ-4	371	266	208	35
СИ-5	408	297	253	62
СИ-6	411	299	259	69

Объект СИ-0 (объект с номером 0 на синтезированном изображении) подлежит исключению из процедуры установления соответствия между объектами, поскольку расстояние от него до каждого из четырех объектов на реальном изображении больше порогового значения T (в данном эксперименте было принято значение $T=100$). Анализ данных таблицы 1 позволяет предположить, что по критерию минимума расстояний между объектами на реальном и синтезированном изображениях (рис. 3) имеют место соответствия: $РИ-0 \Leftrightarrow СИ-1$; $РИ-1 \Leftrightarrow СИ-2$; $РИ-2 \Leftrightarrow СИ-3$; $РИ-3 \Leftrightarrow СИ-4$.

Однако контроль установленных соответствий по другим параметрам объектов в соответствии с алгоритмом (2), оставляет для итогового совмещения лишь первые три соответствия, а именно: $РИ-0 \Leftrightarrow СИ-1$; $РИ-1 \Leftrightarrow СИ-2$; $РИ-2 \Leftrightarrow СИ-3$.

Теперь можно выполнить заключительный этап обработки – совмещение контуров синтезированного изображения с реальным ТВ – изображением. На рис. 4а приведен результат простого наложения синтезированного изображения на реальное изображение. Можно отметить значимые несоответствия между контурами, которые выражаются как в сдвиге синтезированного изображения относительно реального, так и в размерах контуров. На рис. 4б приведен итоговый результат совмещения, выполненный в соответствии с алгоритмом. На визуальном уровне качество совмещения можно оценить как вполне удовлетворительное.

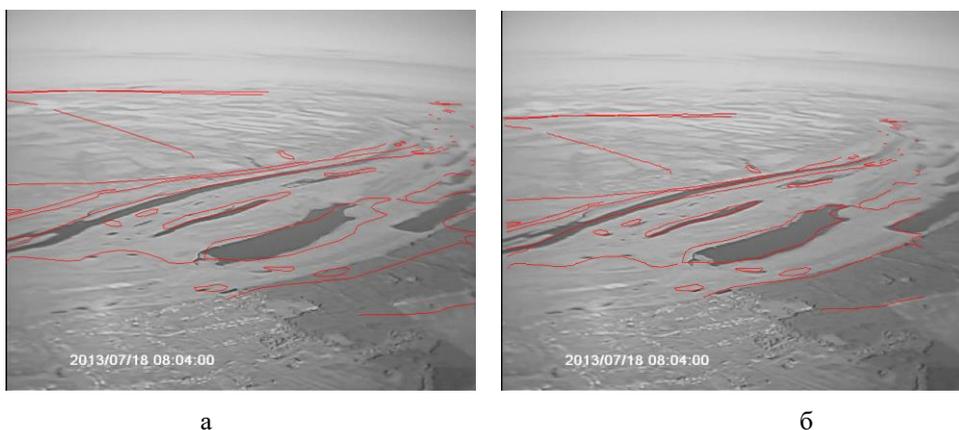


Рис. 4. а – результат наложения реального и синтезированного изображений
б – результат совмещения.

Для оценки работоспособности алгоритма было выполнено совмещение каждого восьмого кадра в видеопоследовательности, отвечающей съемкам в течение 4 сек полета. Результаты оценки качества совмещения по 13 парам реальных и синтезированных по ЦКМ кадров из этой видеопоследовательности приведены в таблице 2. Оценка качества совмещения выполнена с помощью показателя α , введенного в работе [7].

Таблица 2. Результаты оценки качества совмещения

Номер пары кадров	Показатель α до совмещения	Показатель α после совмещения	Изменение показателя α Абсол. /в проц.	Экспертная оценка качества совмещения
1	0,281	---		Срыв совмещения
9	0,282	0,402	0,12/ 42,6%	улучшилось
17	0,247	0,421	0,174/ 70,4%	улучшилось
25	0,231	0,481	0,25/ 108,2%	улучшилось
33	0,232	0,418	0,186/ 80,2%	улучшилось
41	0,334	0,236	-0,098/ -29,3%	ухудшилось
49	0,300	0,389	0,089/ 29,7%	улучшилось
57	0,313	0,241	-0,072/ -23,0%	ухудшилось
65	0,229	0,364	0,135/ 59,0%	улучшилось
73	0,324	0,426	0,102/ 31,5%	улучшилось
81	0,279	0,381	0,102/ 36,6%	улучшилось
89	0,261	0,362	0,101/ 38,7%	улучшилось
97	0,194	0,240	0,046/ 23,7%	улучшилось
Средние значения	0,268	0,363	0,095/ 35,4%	

Основная идея предлагаемого метода заключается в следующем. Изображение разбивается на квадратные блоки (клетки) определённого размера, например – 100x100 пикселей. Это даёт возможность получать не только интегральную оценку качества совмещения, но и локальные оценки в каждом из выделенных квадратных блоков. В каждой клетке для всех информативных (отличных от цвета фона) точек одного из изображений ищутся информативные точки другого изображения, лежащие в некоторой квадратной окрестности размером $(2k + 1) \times (2k + 1)$ с центром в обрабатываемой информативной точке. Как правило, $k = 1$ или $k = 2$. Значение $k = 1$ равносильно утолщению тонкой линии в один пиксель первого контура до двух пикселей, а $k = 2$ – до трех.

Скользящее окно выбранного размера (в рассматриваемом эксперименте 5×5) перемещается по строкам изображения. Как только информативная точка первого изображения попадает в центр этой окрестности, то ищутся и помечаются информативные пиксели второго изображения, попавшие в эту окрестность и не помеченные на предыдущих этапах. После того, как выполнено сканирование всего изображения, в каждом квадратном блоке подсчитывается число m_i помеченных точек совмещаемого (второго) контура и находится отношение этого числа к общему числу информативных точек M_i первого контура, т.е. $\alpha_i = \frac{m_i}{M_i}$. Коэффициент α_i назовем показателем

качества совмещения в i -м блоке изображения, а коэффициент $\alpha = \frac{\sum m_i}{\sum M_i}$ – интегральным показателем качества

совмещения всего контура.

Результаты оценки качества совмещения по 13 парам реальных и синтезированных по ЦКМ кадров из этой видеопоследовательности приведены в таблице 2. При обработке первого кадра произошел срыв совмещения из-за того, что не удалось установить соответствие между контурами на реальном и отвечающем ему синтезированном изображениях. На двух кадрах не удалось добиться улучшения качества совмещения. На 10 кадрах качество совмещения повысилось в пределах от 24 % до 108 %.

В работе [12] совмещение разнородных изображений на этих же 13 кадрах выполнено с использованием дробно-линейных преобразований, которые позволяют учитывать и проективные искажения. В этой работе получены более высокие показатели качества совмещения изображений. Технология совмещения изображений, представленная в [12] требует больших вычислительных затрат и пока не конца автоматизирована.

Алгоритм также был проверен на реальных видеопоследовательностях от ТВ камеры в составе СТЗ за большой промежуток времени. На рис. 5 представлен график оценки качества для 900 кадров (36 сек полета). Оценка математического ожидания показателя качества совмещения в названной видеопоследовательности составила 0,27, оценка дисперсии – 0,004. Было проведено исследование влияния характера сцены на результаты оценки качества совмещения. Установлено, что оценка качества результата алгоритма совмещения на основе преобразования в комплексной плоскости превосходит показатель до совмещения на тех фрагментах, где удается выделить и установить соответствие как минимум между двумя объектами. Для тех кадров, где не установлено соответствий, оценка качества остается неизменной.

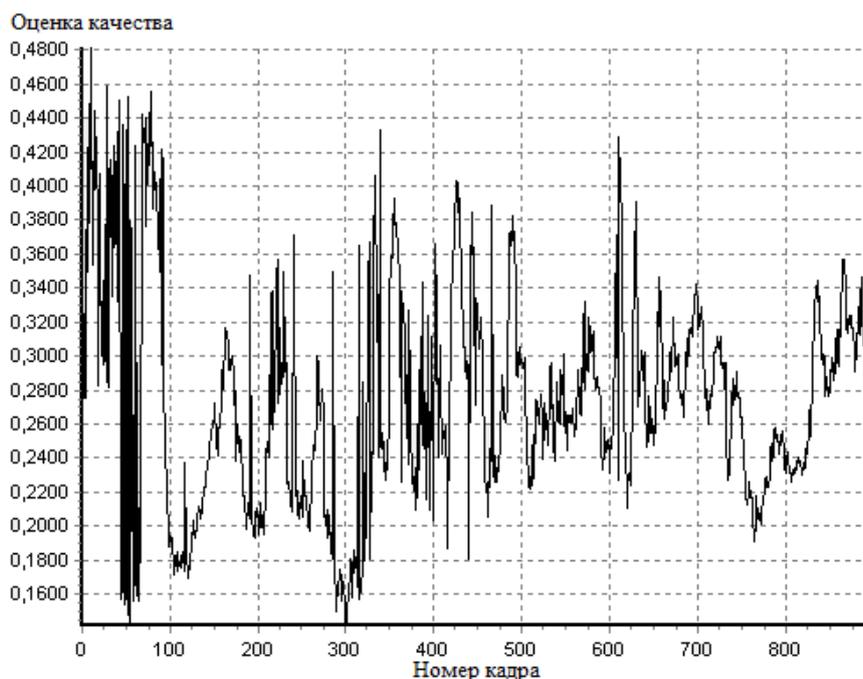


Рис. 5. График оценки качества для видеопоследовательности.

5. Описание программно-алгоритмического комплекса

Программно-алгоритмический комплекс совмещения изображений в авиационных системах технического зрения, составляющей частью которого является алгоритм совмещения изображений на основе преобразования в комплексной плоскости, состоит из следующих основных блоков:

- 1) блок регистрации изображений от сенсора технического зрения (в случае программной реализации на стенде – захвата кадра из видеопоследовательности);
- 2) блок для построения виртуального изображения по виртуальной модели местности;
- 3) блоки предварительной обработки реального и виртуального изображений;
- 4) блок, отвечающий непосредственно за совмещение и устранение геометрического рассогласования реального и виртуального изображений между собой;
- 5) блок визуализации результата совмещения.

Схема организации программно-алгоритмического комплекса представлена на рисунке 6.

Наиболее важными для всего комплекса и сложными с точки зрения их конструирования являются блоки 2, 3 и 4.

В разработанной реализации комплекса совмещения изображений построение виртуальной модели местности реализуется отдельным программным модулем. Его основными функциями являются позиционирование виртуальной камеры в соответствии с задаваемыми координатами положения и построение изображения по имеющейся цифровой карте в формате sxf. Предусмотрено получение кадра как в тонких линиях, так и с наложенными текстурами.

Блок предварительной обработки реализует вспомогательные операции, необходимые для осуществления геометрического совмещения: выделение границ, удаление малоинформативных линий, получение связных контуров – для реальных изображений; удаление линий малой протяженности и получение связных контуров – для виртуальных изображений. Качество предварительной обработки во многом определяет результативность последующего совмещения.

Ключевым элементом программно-алгоритмического комплекса совмещения изображений является блок геометрического совмещения. В качестве одного из алгоритмов устранения геометрического несовпадения предполагается применение алгоритма совмещения на основе преобразования в комплексной плоскости как достаточно быстрого и надежного подхода.

Быстродействие алгоритма совмещения изображений на основе преобразования в комплексной плоскости следующие: суммарные затраты на предварительную обработку не превышают 0,3 с на кадр, на процедуры совмещения – 0,05 с. Вычисления выполнялись на компьютере с центральным процессором Intel i7-3630QM, 2.40 ГГц, с 8 Гб оперативной памяти, реализация алгоритмов предварительной обработки и алгоритма совмещения выполнена на языке программирования C++.

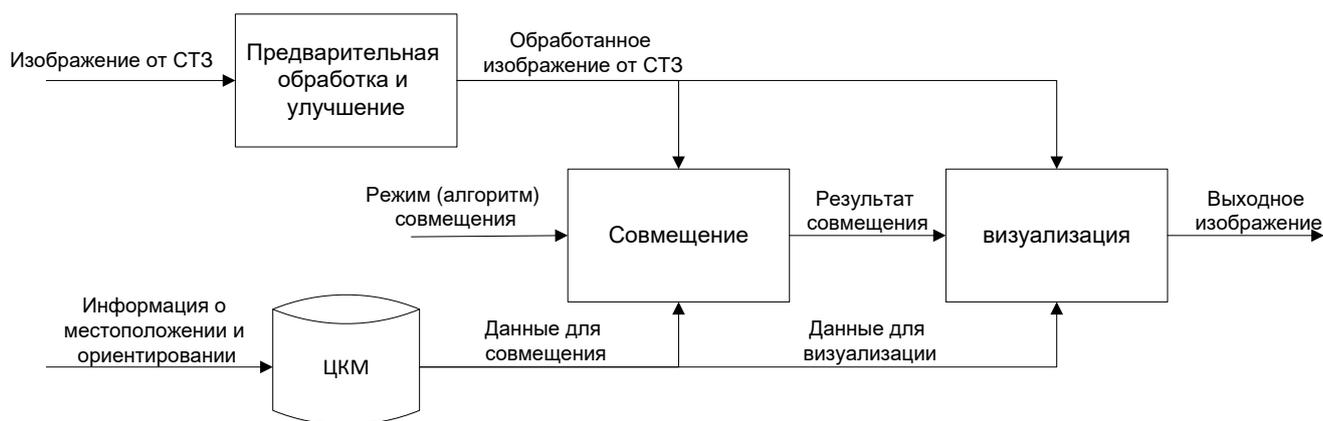


Рис. 6. Схема организации программно-алгоритмического комплекса совмещения изображений.

6. Заключение

Как уже отмечалось, корреляционно-экстремальные методы совмещения обеспечивают требуемую точность, но требуют недопустимо больших затрат машинного времени. Дробно-линейные преобразования синтезированного изображения к плоскости реального видеоизображения уязвимы из-за проблем поиска в автоматическом режиме множества пар ключевых точек [9]. Предложенный алгоритм является определенным компромиссом между требованиями к точности алгоритмов совмещения разнородных изображений и требованиями к их реализуемости в автоматическом режиме и в реальном времени.

Рассматриваемый алгоритм может работать и при больших ошибках навигационных параметров, если только сохраняется подобие контуров соответствующих объектов на реальном и синтезированном изображениях.

Разработанный алгоритм может применяться самостоятельно для совмещения изображений и может использоваться в комбинированных схемах с алгоритмами более высокого уровня для предварительного совмещения.

Литература

- [1] Елесина, С.И. Совмещение изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах / С.И. Елесина; под ред. Л.Н. Костяшкина, М.Б. Никифорова. – М.: Радиотехника, 2015. – 208 с.
- [2] Авиационные системы улучшенного и синтезированного видения: аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников / Гос. науч. центр Рос. Федерации, Гос. науч.-исслед. ин-т авиац. систем (ФГУП «ГосНИИАС»), Науч.-информ. центр; сост.: Ю.В. Визильтер [и др.]; под общ. ред. Е.А. Федосова. – М., 2011. – 77 с.
- [3] Баклицкий, В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В.К. Баклицкий. – Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.
- [4] Бабаян, П.В. Алгоритмы устранения рассогласований в бортовой системе видения / П.В. Бабаян, М.Д. Ершов // Вестник РГРТУ. – 2015. № 4, ч. 2. – С. 32-38.
- [5] Crum, W.R. Non-rigid image registration: theory and practice / W.R. Crum, T. Hartkens, D. L.G. Hill // The British Journal of Radiology/. – 2014/ - Vol. 77. – P. 140-153.
- [6] Гошин, Е.В. Двухэтапное формирование пространственного преобразования для совмещения изображений / Е.В. Гошин, А.П. Котов, В.А. Фурсов // Компьютерная оптика. – 2014. - Т. 38, № 4. – С. 886-891.
- [7] Ефимов, А.И. Алгоритм поэтапного уточнения проективного преобразования для совмещения изображений / А.И. Ефимов, А.И. Новиков // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 258-266. – DOI: 18287/2412-6179-2016-40-2-258-266.
- [8] Hast, A. Optimal RANSAC – Towards a Repeatable Algorithm for Finding the Optimal Set / A. Hast, J. Nysjö, and A. Marchetti // Journal of WSCG. – 2013. – Vol. 21(1). – P. 21-30.

- [9] Грузман, И. С. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетрягин, А.А. Спектор. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - 351 с
- [10] Novikov, A.I. Image Superimposition Technique in Computer Vision Systems Using Contour Analysis Methods / Anatoly I. Novikov, Victoria A. Sablina, Aleksey I. Efimov // 5th Conference on Embedded Computing (MECO) Proceedings. – 2016. – Bar, Montenegro. P. 132–137.
- [11] John Canny. A Computational Approach to Edge Detection / IEEE Transactions on Pattern an Machine Intelligence, vol. PAMI-8 №. 6. – 1986. – P. 679 – 698.
- [12] Новиков, А.И. Алгоритмы автоматической идентификации объектов на разнородных изображениях и совмещения изображений /А.И. Новиков, В.А. Саблина, М.Б. Никифоров (в настоящем сборнике).