

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ СОВМЕЩЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СОВМЕЩЕНИЯ

Новиков А.И., доцент кафедры «Высшая математика» ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», e-mail: novikovanatoly@yandex.ru;

Ефимов А.И., магистрант кафедры «Электронные вычислительные машины» ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», e-mail: lexie62rus@mail.ru

Ключевые слова: реальное и виртуальное изображения, контуры объектов, ключевые точки, качество совмещения.

Введение

Необходимость решения задачи совмещения изображений и использования полученных результатов возникает во многих областях науки и техники. Это картография, дистанционное зондирование Земли, многоспектральные системы технического зрения (СТЗ) летательных аппаратов (ЛА), зрение робототехнических систем, системы автоматического роботизированного управления. Настоящее исследование ориентировано на применение в многоспектральных СТЗ ЛА. В современной авиации техническое зрение решает такие актуальные задачи, как корреляционно-экстремальная навигация, обнаружение и сопровождение целей, визуализация изображения кабинного пространства для пилота и др.

Разработка и создание систем комбинированного видения (CVS) и улучшенного видения (ESVS) в настоящее время является исключительно важной задачей. Это обусловливается требованиями повышения безопасности полетов в сложных метеоусловиях, при плохой видимости, в ночное время. Интенсивное развитие и внедрение систем, обеспечивающих совмещение реальных изображений, получаемых от датчиков различной физической природы, и изображений, синтезированных по цифровой карте местности, позволяет создавать и отображать комбинированное изображение и, как следствие, обеспечивать управление ЛА в сложных условиях.

В качестве источников информации в таких системах могут использоваться: видео датчики, инфракрасные (ИК) датчики различных диапазонов, миллиметровые радары (МР), лазерные локаторы (ЛЛ), базы данных рельефа местности вдоль маршрутов полёта, базы данных аэропортов и объектов взлётно-посадочной полосы (ВПП), навигационные параметры и др.

Сформированная системой ESVS оперативная графическая информация далее представляется пилоту в реальном времени на соответствующем устройстве отображения – индикаторе на лобовом стекле (ИЛС) или многофункциональном индикаторе (МФИ), представляющем собой компьютерный дисплей, входящий в состав бортовой системы отображения информации.

Совмещение реального и синтезированного изобра-

Приведен алгоритм предварительного совмещения реального изображения и изображения, синтезированного по цифровой карте местности, предназначенный для реализации в бортовых вычислительных комплексах летательных аппаратов. Применение алгоритма позволяет локализовать в пространстве шести параметров точку с истинными координатами воздушного судна. Одновременно предложены методы оценки качества совмещения реального и виртуального изображений.

жений в бортовых СТЗ является одной из сложнейших задач по нескольким причинам. Одна из основных заключается в ошибках определения текущих координат ЛА как материальной точки в воздушном пространстве (широты λ , долготы φ и высоты h), а также в ошибках определения ориентации ЛА как протяженного объекта в пространстве. К ним относятся ошибки в измерении параметров курса ψ , тангажа θ и крена γ .

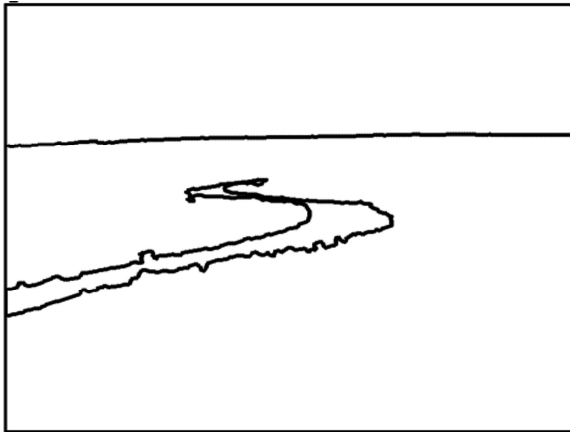
Для совмещения реального и синтезированного изображений приходится генерировать некоторое множество ракурсов виртуальной карты местности. Под ракурсом будем понимать конкретный набор значений шестимерного арифметического вектора $\mathbf{v} = (x, y, h, \psi, \theta, \gamma)$ – параметров позиционирования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

К ошибкам позиционирования могут добавляться еще и геометрические искажения контуров объектов, привносимые в обработанные изображения на этапах выделения границ перепада яркостей и формирования замкнутых контуров. Разная природа реального и синтезированного изображений является еще одной причиной, затрудняющей решение задачи совмещения изображений. Гладким контурам береговой линии водоема на синтезированном изображении могут отвечать линии с большей степенью изменчивости (колебания) на обработанном реальном изображении.

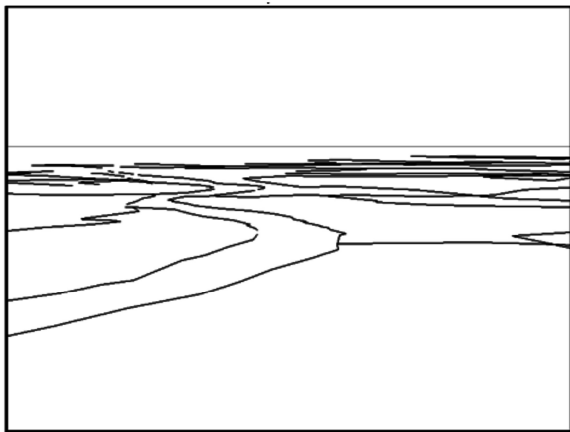
Пример пары таких изображений – реального (рис. 1а) и синтезированного по цифровой карте местности (рис. 1б), содержащего контуры линии горизонта и реки, приведен на рис. 1.

Синтезированное изображение получено из цифровой карты местности по навигационным параметрам, которые содержат неизвестные нам ошибки. Поэтому простое наложение изображений, представленных на рис. 1, обнаруживает существенное несовпадение кон-

туров основных объектов (линии горизонта и контуров реки). Результат наложения изображений приведен на рис. 2 (черным цветом показано реальное изображение, серым – синтезированное). Сравнение линий горизонта реального и виртуального изображений позволяет утверждать, что они различаются по углам крена; контуры реки на изображениях смещены в плоскости Оху, а это означает, что оставшиеся пять навигационных параметров также могут содержать ошибки.



а)



б)

Рис. 1. Обработанное реальное (а) и отвечающее ему синтезированное (б) изображения

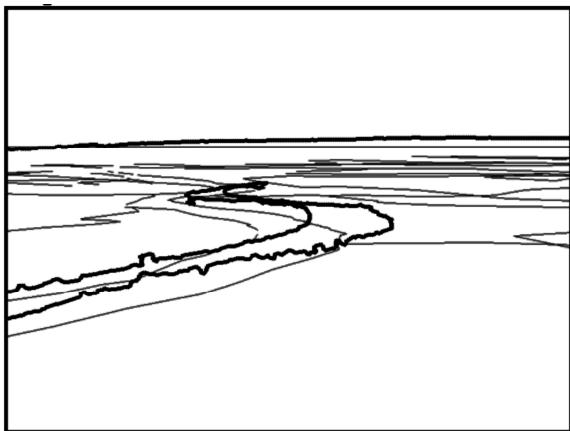


Рис. 2. Результат наложения реального и синтезированного изображений, представленных на рис. 1

Алгоритмы совмещения изображений

Наиболее известными и часто применяемыми в практике совмещения изображений являются корреля-

ционные алгоритмы совмещения [1]. Они дают достаточно хорошие результаты совмещения [2]. Однако применение этих методов в бортовых СТЗ летательных аппаратов нереально из-за их высокой вычислительной сложности, исключающей возможность решения задач в реальном времени. Естественным в этих условиях является переход от сравнения самих изображений к сопоставлению контуров основных объектов, присутствующих на сравниваемых изображениях, и выработке на этой основе способов совмещения изображений.

Достаточно оптимистичные результаты дает метод совмещения изображений, базирующийся на поиске некоторого множества соответствующих пар ключевых точек на сравниваемых изображениях и нахождении преобразования T , приводящего одно изображение к плоскости другого. Идея совмещения двух контуров (двух изображений) с помощью матрицы гомографии T заключается в умножении этой матрицы

$$T = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & 1 \end{pmatrix} \text{ на вектор } X_i = (x_i, y_i, 1)^T, i = \overline{1, n},$$

первые две компоненты которого являются координатами i -й точки совмещаемого контура (изображения).

Преобразование $X'_i = T \cdot X_i, i = \overline{1, n}$ выполняет «совмещение» изображений. Например, синтезированное изображение «накладывается» на реальное. Элементы t_{ij} матрицы гомографии находятся в результате решения соответствующей системы восьми линейных алгебраических уравнений $G \cdot t = Y$. Основная матрица G порядка 8 и вектор свободных членов Y этой системы формируются из координат четырех пар ключевых точек. Вектор t – решение системы – содержит первые 8 компонент искомой матрицы гомографии T [3].

Метод, основанный на использовании матрицы гомографии, обладает достаточно низкой вычислительной сложностью, и, значит, по этому критерию его можно было бы включать в состав математического обеспечения реальных СТЗ ЛА. Недостатком метода является сильная зависимость качества совмещения изображений от того, насколько удачно были выбраны пары ключевых точек на совмещаемых изображениях [4]. Кроме того, в рамках данного метода не решена пока обратная задача – получение оценки вектора ошибок навигационных параметров $(\Delta x, \Delta y, \Delta h, \Delta \psi, \Delta \theta, \Delta \gamma)$. Эта оценка необходима для корректировки навигационных параметров.

Метод ключевой точки

Предлагается подход, позволяющий осуществить предварительное совмещение контуров на тех же идеях ключевых точек. Основные отличия предлагаемого метода от метода, основанного на использовании матрицы гомографии, заключаются в следующем. Во-первых, для реализации этого метода *необходима лишь одна пара ключевых точек*. Во-вторых, он *позволяет* в процессе совмещения изображений (контуров) *получить предварительные оценки пяти компонент $\Delta x, \Delta y, \Delta h, \Delta \theta, \Delta \gamma$ вектора ошибок навигационных параметров $v = (x, y, h, \psi, \theta, \gamma)$* . Ошибка $\Delta \psi$ по курсу в рамках пред-

лагаемого алгоритма не оценивается. Алгоритм предсказания состоит из нескольких шагов. Рассмотрим основные шаги алгоритма и результаты их применения к паре изображений, представленных на рис. 1.

На первом этапе осуществляется аппроксимация контуров основных объектов на реальном и синтезированном изображениях многоугольниками. В нашем случае это контуры реки. Аппроксимирующие многоугольники должны содержать минимальное число вершин (угловых точек), но при этом достаточно точно повторять контуры объекта. Эти требования противоречивы, поэтому к их конкретному описанию предъявляются особые требования.

Поиску угловых структур на векторных изображениях посвящен ряд работ [5, 6]. В [6] для детектирования углов на изображениях в каждой точке обрабатываемого контура производится аппроксимация участков контура отрезками, образующими угловую структуру. Параметры пары линейных функций находятся методом наименьших квадратов. Затем находится квадратичная ошибка аппроксимации контура углом, вычисляется значение критерия χ^2 , с помощью которого находится вероятность p_1 гипотезы о том, что данный участок контура является уголком. После этого оценивается противоположная гипотеза о том, что данный участок является плавно изменяющейся кривой. Для получения ответа на этот вопрос осуществляется аппроксимация рассматриваемого участка контура полиномом третьей степени. Вновь вычисляются квадратичная ошибка аппроксимации, значение критерия χ^2 и находится вероятность p_2 противоположной гипотезы. Из сравнения полученных значений p_1 и p_2 вероятности гипотез делается вывод, какая из них правдоподобнее.

Приведенные в работе [6] результаты апробации метода на реальных изображениях говорят о хорошем качестве детектирования углов и, в частности, на зашумленных изображениях. Очевидный недостаток метода кроется в высокой вычислительной сложности, не позволяющей использовать его в реальных СТЗ на борту летательного аппарата.

В [3] для решения этой задачи предложен алгоритм, основанный на вычислении косинусов углов между двумя прямыми, проходящими через текущую точку контура. Алгоритм основан на выборе в качестве вершин аппроксимирующего многоугольника тех точек контура, в которых достигается локальный максимум оценок косинусов углов при этих вершинах. Остальные точки замкнутого контура отбрасываются. Оценки косинусов углов вычисляются по нескольким соседним точкам с обеих сторон, причем количество таких точек m – настраиваемый параметр алгоритма.

В каждой точке контура вычисляется косинус

$$\cos \alpha = \frac{p_1 p_2 + \hat{k}'_1 \hat{k}'_2}{\sqrt{1 + \hat{k}_1^2} \sqrt{1 + \hat{k}_2^2}} \quad (1)$$

угла между прямыми $L_1 : y = \hat{k}_1 x$ и $L_2 : y = \hat{k}_2 x$, проходящими через данную точку и через m пикселей слева и справа от этой точки. В формуле (1): $p_1 = 1, p_2 = 1$,

$\hat{k}'_1 = \hat{k}_1, \hat{k}'_2 = \hat{k}_2$, если $\sum_{i=1}^m x_i > 0$. Если же $\sum_{i=1}^m x_i < 0$, то знаки в равенствах меняются на противоположные, т.е. $p_1 = -1, p_2 = -1; \hat{k}'_1 = -\hat{k}_1, \hat{k}'_2 = -\hat{k}_2$.

Оптимальная оценка \hat{k} углового коэффициента каждой прямой находится как оценка метода наименьших квадратов по формуле

$$\hat{k} = \frac{\sum_{i=1}^m y_i x_i}{\sum_{i=1}^m x_i^2}.$$

В этой формуле (x_i, y_i) – координаты точек $A_i, i = \overline{1, m}$ в подвижной системе координат Ox для углового коэффициента k_1 и (x_i, y_i) – координаты точек $B_i, i = \overline{1, m}$ – для углового коэффициента k_2 .

Следующим шагом алгоритма является установление взаимно однозначного соответствия между угловыми точками многоугольников, полученных на предыдущем шаге (поиск пар ключевых точек). Для этого в каждой точке M_i первого многоугольника вычисляются значение критерия $\delta_{ij} = \delta(M_i, M_j)$ «похожести» углов

$\alpha_i = \angle M_{i-1} M_i M_{i+1}$ и $\beta_j = \angle M'_{j-1} M'_j M'_{j+1}$:

$$\delta_{ij} = \frac{1}{2} \left| \cos \alpha_i - \cos \beta_j \right| + \frac{\left| |\bar{a}_1| - k \cdot |\bar{b}_1| \right|}{|\bar{a}_1| + |\bar{b}_1|} + \frac{\left| |\bar{a}_2| - k \cdot |\bar{b}_2| \right|}{|\bar{a}_2| + |\bar{b}_2|} \quad (2)$$

Здесь $\bar{a}_1 = \overline{M_i M_{i-1}}, \bar{a}_2 = \overline{M_i M_{i+1}};$
 $\bar{b}_1 = \overline{M'_j M'_{j-1}}, \bar{b}_2 = \overline{M'_j M'_{j+1}}; \quad k = \frac{p_1}{p_2}$, где $p_1,$

p_2 – периметры первого и второго контуров соответственно. При фиксированном значении индекса i пройдем все точки M'_j второго контура из списка $\{M'_j\}_{j=1}^n$, вычисляем в каждой из них значение критерия (2) и находим индекс j_0 точки M'_{j_0} , для которой $\delta(M_i, M'_j) = \min \delta_{ij}, j = \overline{1, n}$, т.е. $j_0 = \arg \min_{j=1, n} \delta_{ij}$. Найденная точка

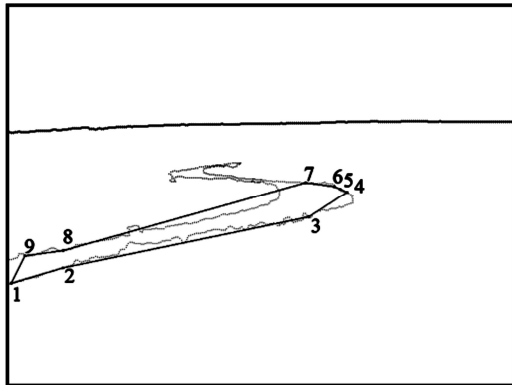
M'_{j_0} на втором контуре ставится в соответствие точке M_i на первом контуре. Это соответствие можно будет считать взаимно однозначным после прохождения всех точек первого контура при условии, что на каком-то шаге алгоритма точка M'_{j_0} не будет поставлена в соответствие еще одной точке первого контура.

Нужно заметить, что на втором контуре может быть найдена более чем одна точка M'_j с близкими значениями критерия δ_{ij} . При этом одна из набора таких точек может быть действительно «идентичной» точке M_{i+1} , а другие – нет. Для разрешения возникающего противоречия вводится дополнительная проверка «идентичности» сравниваемых точек. Формируются векторы $\bar{a}'_1 = \bar{a}_1 + \bar{a}_2$ и $\bar{a}'_1 = \bar{b}_1 + \bar{b}_2$ и вычисляется косинус

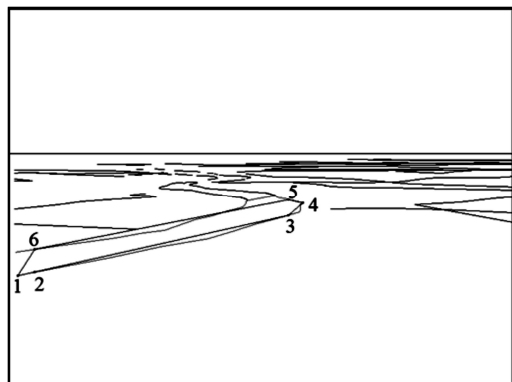
$$\cos \phi = \frac{(\bar{a}_1, \bar{a}'_1)}{|\bar{a}_1| \cdot |\bar{a}'_1|}$$
 угла между ними.

Если $\cos \varphi > c$, где, например, $c = 0,966$, что соответствует углу в 15 градусов, то точки M_i и M_{j_0} признаются «идентичными». В противном случае выносится решение о том, что точка, «идентичная» точке M_i , на втором контуре не найдена.

На рис. 3 приведены многоугольники, аппроксимирующие контуры реки соответственно на реальном и синтезированном изображениях. Каждой точке виртуального изображения ставится в соответствие некоторая точка реального изображения, эти соответствия и значения коэффициента δ_{ij} приведены в табл. 1.



а)



б)

Рис. 3. Многоугольники, аппроксимирующие контуры реки на реальном и синтезированном изображениях

Таблица 1. Соответствия точек контуров и коэффициенты похожести

Точка ВИ	Точка РИ	Коэфф. δ
1	1	0,49
2	2	0,51
3	3	0,42
4	4	0,56
5	7	0,45
6	8	0,73

В табл. 1 использованы следующие сокращения: ВИ – виртуальное изображение, РИ – реальное изображение.

Выбор ключевой точки из ограниченного множества пар соответствующих точек осуществляется по критерию $j_0 = \arg \min_{j=1, n} \delta_{ij}$. Однако соответствующие пары точек могут располагаться слишком близко к линии горизонта и к краям изображения, где оценки координат точек могут содержать наибольшие ошибки. Поэтому выбор клю-

чевой точки дополняется сравнением на множестве пар точек со значением критерия δ_{ij} близким к минимальному δ_{ij_0} по положению этих точек относительно линии горизонта и краев изображения.

На основании анализа значений коэффициента δ_{ij} в табл. 1 и дополнительных критериев в качестве ключевой точки для осуществления дальнейших процедур совмещения выбрана пара точек с номерами 4-4. Значение коэффициента δ в этой точке больше чем, например, в точках 1, 2, 3, 5, но данная точка проходит по дополнительным условиям. Так, например, пары точек 1-1 и 2-2 находятся слишком близко к краю совмещаемых изображений. Пары 3-3 и 5-7 имеют худшие по сравнению с парой 4-4 значения дополнительного показателя по углам между векторами $\vec{d}_1 = \vec{a}_1 + \vec{a}_2$ и $\vec{d}_2 = \vec{b}_1 + \vec{b}_2$, т. е. по ориентации углов $\alpha_i = \angle M_{i-1}M_iM_{i+1}$ и $\beta_j = \angle M'_{j-1}M'_jM'_{j+1}$ относительно координатных осей.

Следующие этапы алгоритма предсовмещения контуров связаны непосредственно с процедурой совмещения. Устранение несовпадения синтезированного и реального изображения целесообразно начать с определения угла между линиями горизонта на этих изображениях. Угол, на который нужно повернуть одно из двух изображений, определяется как угол между прямыми, аппроксимирующими линии горизонта на реальном и синтезированном изображениях. Линия горизонта на виртуальном изображении всегда четко выражена. Её положение рассчитывается в рамках специального комплекса программ, обеспечивающего формирование изображения, синтезированного по цифровой карте местности. На реальном изображении за линию горизонта принимается «линейный» массив пикселей максимальной длины в верхней части изображения не содержащий разрывов, за исключением, быть может, одиночных разрывов не более чем в один пиксель.

Оценки угловых коэффициентов b , b_1 уравнений прямых $\tilde{\Gamma}: x = a + by$, $\tilde{\Gamma}: x = a_1 + b_1y$, аппроксимирующих линии горизонта соответственно на реальном и синтезированном изображениях можно найти стандартным методом наименьших квадратов (МНК) по формуле

$$\hat{b} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (3)$$

Однако в вычислительном отношении эти оценки проще вычислить с помощью скалярного произведения

$$\hat{b} = \bar{q} \cdot \bar{x} \quad (4)$$

В формуле $\bar{q} = \frac{3}{k(k+1)(2k+1)} (-k, -k+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, k-1, k)$ – весовые коэффициенты оператора, обеспечивающего вычисление оптимальной МНК-оценки частной производной $\frac{\partial f}{\partial x}$ [7]; $\bar{x} = (2k+1)$ – мерный век-

тор ($n = 2k + 1$) ординат линии горизонта. Применение формулы (4) обеспечивает выигрыш во времени вычисления оптимальной оценки углового коэффициента в среднем в 4 раза по сравнению с формулой (3).

После того как оценки \hat{b} , \hat{b}_1 угловых коэффициентов найдены вычисляем угол, на который нужно повернуть синтезированное изображение для его совмещения с реальным изображением по линиям горизонта.

$$\gamma = \arccos \frac{1 + \hat{b} \cdot \hat{b}_1}{\sqrt{1 + \hat{b}^2} \cdot \sqrt{1 + \hat{b}_1^2}} \quad (5)$$

Для изображений, приведенных на рис. 1, оценка угла (5) между линиями горизонта оказалась равной $1,088^\circ$. Это означает, что в навигационных данных, по которым построено синтезированное изображение, содержится ошибка $\Delta\gamma = 1,088^\circ$ по углу крена. На рис. 4 приведен результат наложения исходного (рис. 1) синтезированного изображения, предварительно повернутого на угол $1,088^\circ$, на реальное изображение.

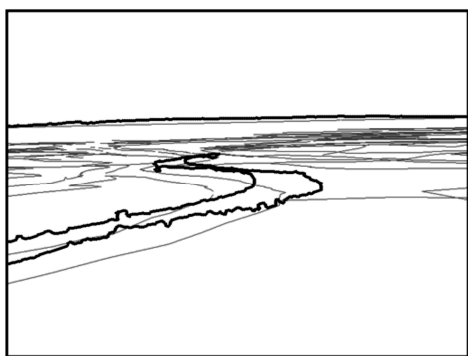


Рис. 4. Результат наложения реального и синтезированного изображений, после корректировки по углу крена

Можно отметить, что на визуальном уровне линии горизонта теперь совпадают. Однако одно изображение смещено относительно другого и, возможно, повернуто на некоторый угол. Для совмещения изображений с помощью операции сдвига вдоль вектора, выделим из найденного на первых двух этапах множества пар угловых точек одну *ключевую* точку. Выбор ключевой точки подчиним двум основным требованиям: она, во-первых, должна находиться в окрестности средней линии между нижним срезом экрана и линией горизонта и, во-вторых, должна быть *наиболее значимой* – принадлежать углу с максимально длинными сторонами.

Вычислив параметры сдвига $\Delta x = x_M - x_{M'}$, $\Delta y = y_M - y_{M'}$, получим в нашем случае, что $\Delta x = 68$, $\Delta y = 17$ пикселей. Сместим синтезированное изображение на эти величины вдоль соответствующих осей. Теперь ключевые точки совпадут. Но одновременно возникнет смещение по вертикали линии горизонта синтезированного изображения относительно реального (рис. 5). Обозначим эту величину Δz .

Смещение линий горизонта обусловлено наличием проекционных искажений. Для учета этих искажений нужно подобрать такие значения смещений по высоте Δh и по углу тангажа $\Delta\theta$, которые привели бы к совмещению как линий горизонта, так и ключевых точек.

«Выбрать» это недосовмещение можно в рамках многошаговой процедуры за счет корректировки значений угла тангажа и высоты.

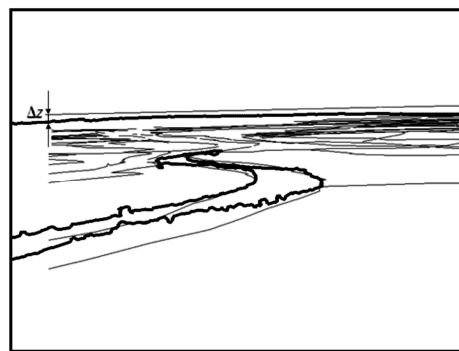


Рис. 5. Результат совмещения изображений по ключевым точкам

Корректировка по углу тангажа θ заключается в следующем: на предыдущих стадиях выполнения алгоритма методом наименьших квадратов были найдены уравнения прямых, аппроксимирующих линии горизонта на реальном и синтезированном изображениях. По коэффициентам a и a_1 этих прямых определяется, какой знак имеет поправка к углу тангажа, а также расстояние между этими прямыми в пикселях. В рамках итерационной процедуры производится уточнение истинного значения угла тангажа (критерием «уточнения» служит сокращение расстояния между линиями горизонта). Для этого задается некоторый шаг, с которым начинает изменяться угол тангажа. Для каждого значения этого угла и фиксированных значений остальных параметров генерируется новое синтезированное изображение и производится сравнение расстояний между прямыми, аппроксимируемыми линиями горизонта. Выполнение процедуры прекращается, когда расстояние между прямыми становится меньше некоторого заранее заданного порога (в рамках проводимых исследований – 2 пикселя).

Определение смещения Δh по высоте также носит итерационный характер. Выбирается некоторый шаг по данной координате и производится генерация ракурсов с различными значениями по высоте. Далее для каждой пары реального и синтезированного изображений рассчитывается некоторая мера близости изображений (в проводимом исследовании выбрана парная критериальная функция Рао [2]). В конечном итоге выбирается пара максимально близких по выбранному критерию изображений. Полученная пара из реального и синтезированного изображений и принимается за итоговый результат предсовмещения. Финальный результат цепочки таких преобразований приведен на рис. 6.

Итоговые значения корректировок угла тангажа и высоты таковы: $\Delta\theta = -0,3^\circ$, $\Delta h = -20$ м. Приведем значения корректировок по всем параметрам, задействованным в преобразованиях: $\Delta x = 68$, $\Delta y = 17$, $\Delta\gamma = 1,088^\circ$, $\Delta\theta = -0,3^\circ$, $\Delta h = -20$ м.

Смещения Δx и Δy приведены в пикселях.

Для сравнения на рис. 7 приведен результат совмещения реального и синтезированного изображений корреляционно-экстремальным методом с использованием парной критериальной функции Рао [2]. Поиск глобаль-

ного экстремума критериальной функции проводился в пространстве 6 параметров $(\Delta x, \Delta y, \Delta h, \Delta \psi, \Delta \theta, \Delta \gamma)$ на сетке, содержащей около 10^6 узлов.

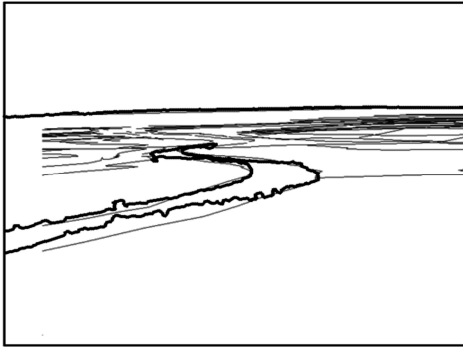


Рис. 6. Конечный результат совмещения изображений

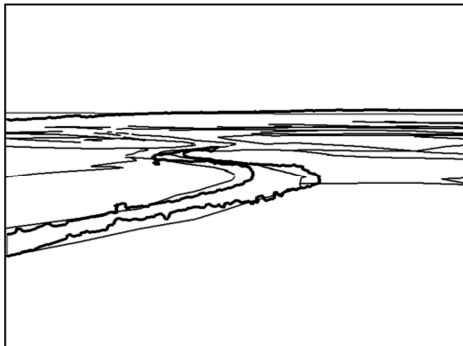


Рис. 7. Результат совмещения изображений корреляционным методом

Визуальное сопоставление результатов совмещения по ключевой точке (рис. 6) и корреляционным методом (рис. 7) позволяет говорить о том, что контуры реки совмещены в обоих случаях приблизительно одинаково. Однако по линиям горизонта изображения на рис. 7 недосовмещены. Для более точного сопоставления результатов совмещения изображений нужны критерии качества совмещения, основанные на количественных характеристиках.

Итоговые значения корректировок по каждому из шести параметров, полученные при корреляционном совмещении методом полного перебора таковы: $\Delta x = 32$ м, $\Delta y = 0$, $\Delta h = -16$ м, $\Delta \psi = -1^\circ$, $\Delta \gamma = -0,2^\circ$, $\Delta \theta = -0,2^\circ$. Оценки смещений Δh и $\Delta \theta$, полученные методом ключевой точки близки к оценкам, найденным корреляционным методом; Смещения Δx и Δy трудно сопоставлять по двум причинам. Во-первых, они измеряются в разных единицах. Во-вторых, в методе ключевой точки не производятся коррекция по курсу. Поэтому оценки смещений Δx и Δy в методе ключевой точки содержат в своем составе и ошибку оценивания курса. Существенное несовпадение оценок ошибок по крену ($\Delta \gamma = 1,088^\circ$ и $\Delta \gamma = -0,2^\circ$) объясняется тем, что в методе ключевой точки линии горизонта совмещены качественно, а в корреляционном методе они недосовмещены.

Оценка качества совмещения изображений

От качества совмещения реального и синтезированного изображений зависит точность пересчета параметров пространственного и углового позиционирования

сенсоров, а также адекватность и эргономичность восприятия комбинированного изображения экипажем. Поэтому важно количественно оценить степень (качество) совмещения изображений для принятия решения о возможности использования результатов совмещения изображений для КЭНС и визуализации экипажу.

Качество совмещения линии горизонта можно оценить с двух позиций: есть ли систематическое смещение (рис. 8а) по одной из координат на плоскости и недосовмещение по углу (рис. 8б). Так, например в процессе совмещения реального и виртуального изображений после корректировки по углу крена смещение Δz линии горизонта по вертикали (рис. 5) синтезированного изображения относительно реального составило 8 пикселей.

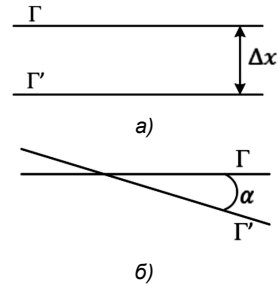


Рис. 8. Варианты недосовмещения линий горизонта

Для замкнутых областей D и D' можно ввести показатели качества совмещения δ и δ' – отношение площади пересечения замкнутых совмещаемых областей $D \cap D'$ к площади соответственно первой и второй областей:

$$\delta = \frac{S_{D \cap D'}}{S_D} \cdot 100\%,$$

$$\delta' = \frac{S_{D \cap D'}}{S_{D'}} \cdot 100\%.$$

Оценка качества совмещения по первой формуле в составе (6) реального и синтезированного изображений (рис. 6) методом ключевой точки дала следующий результат: $\delta = 73,18\%$. Не очень высокое значение показателя качества совмещения объясняется структурой реального и синтезированного изображений. В нижней части изображения (рис. 3) контуры реки на реальном и синтезированном изображениях имеют существенные отличия, не позволяющие повысить качество совмещения.

Оценка качества совмещения по формуле (6) методом ключевой точки на каждом шаге этого метода приведена в табл. 2.

Оценка качества совмещения тех же изображений корреляционным методом с полным перебором узлов сетки (рис. 7) по первой формуле в составе (6) приводит к следующему результату: $\delta = 72,4\%$.

Близкие значения коэффициента δ в методе ключевой точки и в корреляционном методе, основанном на полном переборе узлов сетки, позволяют говорить о возможности предсовмещения методом ключевой точки.

Отметим, что описанная методика оценки качества совмещения изображений может применяться без участия человека-оператора, что позволяет рассматривать её как возможное решение проблемы определения степени совмещения изображений на борту ЛА.

Таблица 2. Результаты поэтапной оценки качества совмещения изображений

Наименование этапа	Площадь области D (количество пикселей)	Площадь области D' (количество пикселей)	Площадь пересечения областей D и D'	Значение коэффициента δ
Исходные изображения (рис. 1)	14812	26567	7018	47,38%
Изображения после корректировки угла крена (рис. 4)	14812	26606	5438	36,71%
Изображения после сдвига вдоль осей (рис. 5)	14812	26606	8035	54,24%
Изображения после корректировок по высоте и углу тангажа (рис.6)	14812	23408	10839	73,18%

Заключение

Жесткие ограничения на время обработки реального и синтезированного изображений на борту ЛА вынуждают искать быстрые алгоритмы решения каждой задачи в составе комплекса задач, решаемого бортовым вычислителем. Задача совмещения изображений с одновременным определением ошибок навигационных параметров ЛА, является в этом комплексе наиболее важной и сложной в вычислительном отношении.

Предложенный метод ключевой точки преследует цель сокращения вычислительных затрат на решение этой задачи. Он обеспечивает предварительное совмещение изображений. Оно, как это следует из данного исследования, может быть достаточно хорошим. Однако метод ключевой точки не решает в полном объеме задачу оценивания ошибок в навигационных параметрах.

Метод ключевой точки позволяет найти оценку $\Delta\gamma$ смещения по крену, близкие к истинным оценки смещений по высоте Δh и по углу тангажа $\Delta\theta$. Менее точными являются оценки смещений Δx и Δy . Полученная данным методом оценка 6-мерного вектора навигационных параметров $(\hat{\Delta x}, \hat{\Delta y}, \hat{\Delta h}, 0, \hat{\Delta\theta}, \hat{\Delta\gamma})$ может использоваться в качестве исходного (нулевого) приближения для поиска «истинных» значений этого вектора корреляционным методом. Поиск в этом случае нужно будет осуществлять не по всему параллелепипеду в 6-мерном пространстве, а лишь в некоторой, достаточно малой, окрестности найденной точки и, возможно, лишь по трем параметрам Δx , Δy и $\Delta\psi$. Это может позволить сократить количество вычислений парной критериальной функции с 10^6 значений при полном переборе до 10^2 .

Литература

1. Баклицкий В.К., Бочкарев А.М. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. М.: Радио и связь, 1986. 1072 с.
2. 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.
3. Новиков А.И., Саблина В.А., Горячев Е.О. Приме-

нение контурного анализа для совмещения изображений// Известия ТулГУ, технические науки, вып. 9, ч.1. 2013. – С. 260-270.

4. Novikov A.I., Sablina V.A., Nikiforov M.B., Loginov A.A. Contour Analysis and Image superimposition Task in Computer vision Systems//11th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA– 11–2013). Samara, 2013. vol. 1. – PP. 282-285.

5. Dmitry Chetverikov and Zsolt Szabo. A Simple and Efficient Algorithm for Detection of High Curvature Points in Planar Curves, Proc. 23rd Workshop of the Austrian Pattern Recognition Group, 1999, pp. 175-184.

6. Непомнящий П.В., Юрин Д.В. Поиск опорных точек на векторных изображениях путем детектирования угловых структур с помощью статистической оценки гипотез. // Graphicon 2002 proceedings, <http://www.graphicon.ru/2002/>.

7. Новиков А.И. Алгоритмы выделения границ полезных сигналов // Вестник РГПУ. №2 (выпуск 24). – Рязань. - 2008. - С. 11-15.

PRE-COMBINING IMAGES AND QUALITY EVALUATION METHODS OF COMBINING

Novikov A.I., Efimov A.I.

The report examines the problems of development of enhanced and combined vision systems of aircraft. It focuses on the issue of different spectral image combining. The authors propose a methodology of images pre-combining based on finding a «key point» for binding of combined images. Authors describe the steps for correcting the coordinates of the aircraft (roll and pitch angles and height) which significantly improves the quality of combining images obtained from a camera on the board of aircraft and images generated by digital area map. In the report demonstration of new algorithm of pre-combining images is made. It also shows high quality of transformation series over the virtual image and result of images combining. Thus it is possible to obtain estimates of navigational error of the aircraft. Authors demonstrated the possibility of quality rating not only visually, but also by using quantitative index of quality.