

МЕТОДИКА ВЫСОКОТОЧНОЙ СШИВКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ СЪЕМКЕ ОБСТАНОВКИ МНОГОМАТРИЧНЫМ СКАНИРУЮЩИМ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

П.К. Кузнецов¹, Б.В. Мартемьянов¹, В.К. Скирмунт², В.И. Семавин¹

¹ Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»
443009, Самара, ул. Земеца, 18

Рассматривается методика сшивки полос изображений, получаемых многоматричными сканирующими оптико-электронными преобразователями при съемке обстановки с борта мобильной платформы. Алгоритмы, реализующие методику, отличаются высокой точностью и быстродействием и основаны на методе функционализации параметров изображений.

Ключевые слова: оптико-электронный преобразователь, сшивка изображений, метод функционализации.

1. Постановка задачи

Многоматричные сканирующие цифровые оптико-электронные преобразователи (МОЭП) используются при получении широкоформатных снимков обстановки с борта мобильных платформ. Примером МОЭП может служить аппаратура типа «Сангур» разработки НПП «ОПТЭКС». В ней фоточувствительные матрицы, составляющие МОЭП, построены на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС матрицы) и работают в режиме задержки и накопления зарядов (ВЗН). Как источник информации, каждая матрица эквивалентна ПЗС линейке, с которой одномоментно снимается только одна строка видеoinформации. Кадровая развертка получается механическим сканированием сцены (обстановки). При этом каждая матрица порождает полосу изображения шириной равной количеству ПЗС ячеек в строке матрицы. За счет такой организации процесса съемки имеется возможность получения кадров, длина которых (количество строк изображения) ограничивается только объемом буферной памяти съемочной аппаратуры и технологическими режимными ограничениями. Каждая ПЗС матрица может содержать более 1000 ПЗС ячеек в строке.

МОЭП аппаратуры типа «Сангур» может содержать несколько десятков матриц. Взаимное расположение ПЗС матриц (линеек) на картинной плоскости изображительной системы (ИС) представлено на рис.1. Такая топология МОЭП обеспечивается, наряду с использованием соответствующей оптики в ИС, широкий захват сцены.

Расстояние между матрицами МОЭП с четными и нечетными номерами, измеренное в направлении по нормали к строке, определяется размерами матриц и технологией сборки. Оно может достигать единицы миллиметров. В приведенных ниже

Павел Константинович Кузнецов – д.т.н., профессор.

Борис Викторович Мартемьянов – к.т.н., доцент.

Валерий Константинович Скирмунт – начальник НПП ИТ ДЗЗ

Владимир Иванович Семавин – к.т.н., доцент.

примерах изображения получены от МОЭП, расстояние между одноименными строками матриц которых (строками с одинаковыми номерами) составляло около 2,3 мм.



Рис. 1. Расположение матриц МОЭП в виде «коленвала»

Расположение матриц в соответствии с рис. 1 приводит к тому, что соседние по номеру матрицы в области смежности их боковых сторон сканируют одни и те же объекты снимаемой обстановки. Причем, из-за сдвига соседних матриц в направлении движения ИС, одни и те же объекты сканируются этими матрицами в разные моменты времени. В результате, формируемые этими матрицами полосы изображений содержат по своим краям изображения одних и тех же объектов (но снятых в разные моменты времени). По этому поводу будем говорить, что соседние полосы изображений имеют зоны перекрытия (по ширине).

Ширина w зоны перекрытия полос изображений от соседних матриц зависит от ориентации вектора скорости (вектора сканирования) \mathbf{V} по отношению к расположению строк ПЗС матриц. Назовем нормальным сканированием сканирование в направлении по нормали к ориентации строк ПЗС матриц. На рис.2 показано формирование областей перекрытия соседних полос изображений при нормальном сканировании сцены (вектор \mathbf{V}_1) и при отклонении от нормального сканирования (вектор \mathbf{V}_2). Ширина перекрытия полос изображений, формируемых при нормальном сканировании сцены ($w_i(\mathbf{V}_1)$ и $w_{i+1}(\mathbf{V}_1)$ на рис.2), обычно составляет 10-12 пикселей.

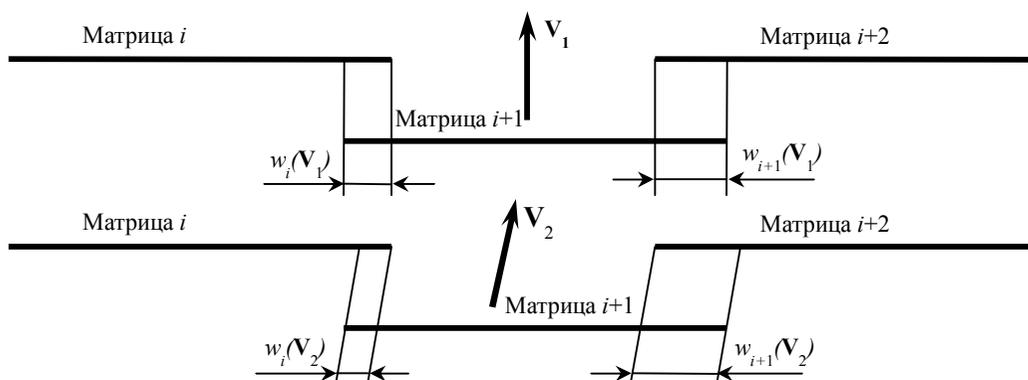


Рис. 2. Перекрытие полос изображений от соседних матриц в МОЭП

Одной из задач предварительной обработки изображений (снимков), полученных от МОЭП, является сборка (сшивка) полос изображений, получаемых от отдельных ПЗС матриц, в единый кадр. Эта задача состоит в устранении повторения в сшитом кадре изображений одних и тех же фрагментов сцены. Так, например, при сшивке полос изображений от матриц с номерами i и $i+1$ необходимо удалить все w_i пикселей на правой границе матрицы i , либо столько же пикселей на левой границе

матрицы $i+1$. Решение этой задачи требует обнаружения в области смежности сшиваемых полос фрагментов, изображающих одни и тех же объекты, и последующего совмещения (взаимного наложения) этих фрагментов изображений. Отметим, что в соседних полосах одинаковые фрагменты обычно оказываются расположенными в разных строках полос изображений. Это усложняет задачу сшивки полос. На рис.3 представлен пример фрагментов сшиваемых полос изображений.

Известные программные комплексы обработки аэрокосмических снимков, например, «ТАЛКА», «OrthoNormScan», «Envу» и другие включают в себя специализированное программное обеспечение (ПО) сшивки изображений, но оно не всегда удовлетворяет требованиям пользователя по точности и быстродействию. Точность совмещения полос изображений, требуемая для решения многих современных задач тематической обработки аэрокосмических снимков, достигает 0,1 - 0,2 пикселя. Эта точность превышает возможности большинства известных специализированных ПО. Кроме того, известные алгоритмы сшивки не могут удовлетворять требованиям по быстродействию без использования информации о параметрах внешней ориентации оптической оси ИС на маршруте съемки [1,2]. Последнее условие накладывает значительные ограничения, поскольку такая информация не всегда доступна.

Ключевой операцией при сшивке изображений, определяющей точность и быстродействие, является операция совмещения «похожих» фрагментов изображений в зонах перекрытия сшиваемых полос. Термин «похожие изображения» мы здесь не определяем, а используем его в интуитивно-бытовом смысле.

Недостатки известных методов совмещения похожих фрагментов проистекают из особенностей корреляционного метода, который в подавляющем большинстве случаев применяют для выполнения этой операции [3]. Корреляционный метод основан на поиске значений параметров взаимного смещения изображений, при которых достигается глобальный экстремум взаимной корреляционной функции (ВКФ) совмещаемых фрагментов изображений. При численном поиске глобального экстремума ВКФ используют различные алгоритмы, но их сложность в любом случае экспоненциально растет при увеличении размеров совмещаемых фрагментов. Кроме того, и, может быть, еще более важно, что в методе ВКФ принципиально невозможно вывести утверждение о том, что факт отыскания глобального экстремума ВКФ гарантирует морфологическую близость, «похожесть» объектов, изображения которых совмещаются. Для повышения достоверности отыскания похожих объектов необходимо увеличивать площадь поиска глобального экстремума. Но при ограничениях на вычислительные мощности, что характерно для бортовых систем, требования быстродействия удовлетворяют за счет уменьшения площади совмещаемых фрагментов. Возникает конфликт достоверности и быстродействия. Этот конфликт увеличивает вероятность «зависания» алгоритма на локальных экстремумах ВКФ и, соответственно, неверного совмещения изображений.

Выход из отмеченной конфликтной ситуации находят, например, [2] за счет предварительного поиска фрагментов изображений с уникальным или специфическим видом гистограмм яркости. Требование особенности гистограмм совмещаемых

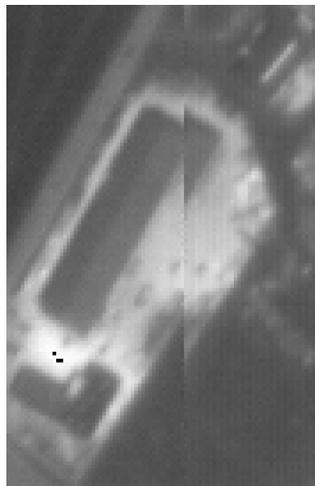


Рис. 3. Пример фрагментов сшиваемых полос

фрагментов при малости ширины зоны перекрытия изображений в значительной степени уменьшает вероятность появления фрагментов, которые могут быть совмещены методом ВКФ с достаточной достоверностью.

Для реальных снимков, полученных МОЭП типа «Сангур», ширина зоны перекрытия смежных полос изображений варьирует вдоль стыка полос в пределах от 2 до 16 пикселей. Вариации вызваны как условиями проведения съемки, так и неточностью отработки программного движения системой управления движением платформы–носителя ИС. Малость и вариативность ширины зоны перекрытия (ширины шва) дополнительно усложняет процедуру сшивки. В результате объективной сложности задачи сшивки и недостатков метода ВКФ, суммарная площадь правильно сведенных фрагментов может не покрывать и десятых долей процента общей площади зоны перекрытия сшиваемых изображений. Поэтому для большей части зоны перекрытия полос приходится применять аппроксимации. Точность аппроксимации существенно повышается при использовании данных об ориентации оптической оси ИС [3] на маршруте съемки. Поэтому в качестве исходных эти данные требуются всеми известными промышленными программами сшивки изображений, реализующими метод ВКФ.

В настоящей работе предлагается методика высокоточной и быстрой сшивки полос изображений, получаемых от МОЭП, которая не требует информации о параметрах внешней ориентации. Предлагаемая методика основана на использовании метода функционализации параметров изображений [4] (далее «метод функционализации») для совмещения фрагментов изображений. Метод функционализации, в отличие от корреляционного метода, не использует поисковых процедур и слабо чувствителен к виду ВКФ совмещаемых изображений. Как следствие, получаемые этим методом процедуры совмещения сходятся быстро и не застревают на локальных экстремумах, расположенных в окрестности глобального экстремума ВКФ. Другим важным достоинством метода функционализации является возможность получения на его основе вполне надежных критериев близости (похожести) совмещенных изображений. Именно благодаря отмеченным свойствам метода возможна реализация быстрой и высокоточной сшивки изображений.

2. Методика сшивки изображений

При обработке изображений используем «экрannую» систему координат OXY , начало которой совпадает с первым (с нулевым номером) пикселем первой строки сшиваемых изображений, ось OX направлена вдоль первой строки изображения в сторону увеличения номеров пикселей строки, а ось OY – по нормали к направлению строк в сторону увеличения их номера. В этой системе координат расположим сшиваемые изображения (полосы изображений) рядом друг с другом в направлении оси OX в соответствии с взаимным расположением матриц-источников этих полос изображений в МОЭП (рис. 1). Будем работать с каждой смежной парой полос отдельно. Фрагменты таких полос, скопированные с реального изображения, приведены на рис. 3.

Примем, что изображение задается функцией распределения его интенсивности $E(r)$. Эта функция обладает свойством:

$$(r = (x, y), r \in \mathbf{R}^2) \wedge (E(x, y) : \mathbf{R}^2 \Rightarrow [0, E_{\max}], E_{\max} < \infty).$$

Далее для краткости термин «функция распределения интенсивности» будем заменять термином «изображение».

Все величины, относящиеся к правому кадру, будем отличать от аналогичных величин левого кадра подчеркиванием символов. Изображение левой полосы будем обозначать как $E(x, y)$, а правой - как $\underline{E}(x, y)$. Будем полагать, что изображения дифференцируемы почти всюду.

В методе функционализации [4,5,6], который можно отнести к классу градиентных методов [7-11], все операции производятся не с изображением, а со специально задаваемым на изображении функционалом F (*основным функционалом* метода). Такой подход позволяет, во-первых, избежать применения операции дифференцирования изображения по пространственным координатам, на использовании которой основаны градиентные методы, и, во-вторых, подбирать функционал так, чтобы выделить, характерные признаки, которые имеют совмещаемые изображения, и отфильтровать помехи и случайные шумы. Функционал может быть как линейным, так и нелинейным.

При решении задачи сшивки изображений используем нелинейный функционал $F(\Phi_1, \Phi_2)$ вида:

$$F = \frac{N}{Z}, \quad (1)$$

где $N = (\Phi_1 - \Phi_2)$, $Z = (\Phi_1 + \Phi_2)$.

$$\Phi_i(t) = \int_{D_i} K_i(r) E(r, t) ds, \quad (2)$$

D_i – окно анализа, на котором определен функционал Φ_i , $i \in \{1, 2\}$;

$K_i(r)$ – функция веса функционала Φ_i , заданная на окне D_i и отвечающая условиям [4] равномерной ограниченности, непрерывности и равенства нулю на границе окна анализа.

Таким образом, основной функционал F представляет собой нелинейную комбинацию линейных функционалов Φ_i , которые далее будем называть *базисными*.

Как ясно из комментариев к (2), окно анализа – это фрагмент изображения. Будем использовать окна прямоугольной формы. Ширина (w) окон задается равной текущей оценке ширины перекрытия (размер по оси OX) полос. Параметрами функционала являются высота h (размер по оси OY) окон D_i и расстояние Δh между центрами окон. Во всех приведенных ниже примерах принято $\Delta h = h/2$.

На рис.4 показан пример расположения четырех окон анализа (D_1, \dots, D_4) на левой полосе. Правая граница этих окон всегда совпадает с правой границей левой полосы. Аналогично, левая граница окон на правой полосе всегда совпадает с левой границей правой полосы.

Вид основного функционала выбран по следующим соображениям. Сшиваемые полосы изображений получены различными ПЗС матрицами, характеристики которых не идентичны. Поэтому изображения одного и того же объекта, полученные даже при абсолютно одинаковых условиях съемки, оказываются различными, в том числе, по контрасту. Различие в контрастах – это мультипликативная помеха

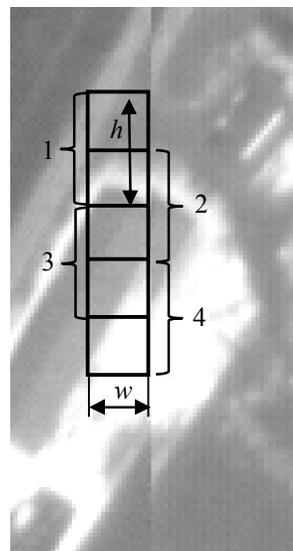


Рис. 4. Четыре окна на левой полосе

изображения. Она в значительной степени ослабляется использованием в основном функционале (1) отношения линейных комбинаций базисных функционалов.

Разность базисных функционалов, поставленная в числителе функционала F (1), уменьшает действие аддитивной низкочастотной помехи, которая всегда присутствует в полосах изображений [12] и доставляет значительные неприятности при выработке критерия качества совмещения изображений. Значение этой разности представляет собой оценку дифференциала функции интенсивности изображения по пространственной координате.

Поскольку сшиваемые фрагменты смежных полос формируются съемочной аппаратурой последовательно во времени с интервалом Δt , то изображения, попавшие в зону перекрытия смежных полос, можно рассматривать как два последовательных во времени кадра с кадровым периодом Δt . При этом первым кадром будем считать левую в паре полосу изображения, а вторым – правую. Тогда преобразование левого изображения в правое (и наоборот) осуществляется простым взаимным смещением кадров по двум координатам, определяемым вектором (s_x, s_y) . Будем полагать, что это смещение является результатом движения изображения со скоростью $\mathbf{v} = (v_x, v_y)$.

Метод функционализации позволяет вычислять оценку вектора \mathbf{v} скорости движения изображения. Для этого, в соответствии с общей методикой метода функционализации [4], необходимо вычислить полную производную по времени главного функционала F в силу уравнения движения изображения. В результате получается уравнение функциональной связи (ФС-уравнение), связывающее измеримые характеристики изображения и компоненты вектора скорости его движения (под измеримыми характеристиками понимаются интегральные значения интенсивности изображений, вычисленные на подобластях ненулевой меры).

В нашем случае ФС-уравнение принимает вид:

$$-\frac{dF}{dt} = F_x v_x + F_y v_y, \quad (3)$$

где $F_\alpha = \frac{N_\alpha - FZ_\alpha}{Z}$, $\alpha \in \{x, y\}$, $N_\alpha = (\Phi_{1\alpha} - \Phi_{2\alpha})$, $Z_\alpha = (\Phi_{1\alpha} + \Phi_{2\alpha})$,

$$\Phi_{i\alpha}(t) = \iint_{Di} K_{i\alpha}(r) E(r, t) ds, \quad i \in \{1, 2\}, \quad (4)$$

$$K_{i\alpha}(r) = dK_i(r) / d\alpha.$$

Переходя в левой части (3) к конечным разностям, получаем:

$$\Delta F = F_x \hat{s}_x + F_y \hat{s}_y, \quad (5)$$

где $\hat{s}_x = v_x \Delta t$, $\hat{s}_y = v_y \Delta t$ - оценки s_x, s_y соответственно,

$\Delta F = (F - \underline{F})$ «покадровая» разность функционалов вида (1), вычисленных на левом и правом кадрах, соответственно.

В качестве значений функционалов F_x, F_y , входящих в правую часть (3), естественно использовать их средние значения, вычисленные по двум кадрам. В результате, уравнение (5) преобразуется к виду:

$$\Delta F = F_x \hat{s}_x + F_y \hat{s}_y, \quad (6)$$

где $F_\alpha = 0,5(F_\alpha + \underline{F}_\alpha)$, $\alpha \in \{x, y\}$.

В уравнение (5) входят две неизвестные величины. Для их вычисления составим систему уравнений следующим образом. Выделим в предполагаемой зоне перекрытия идентичные по форме и размеру области анализа O на левой полосе и \underline{O} - на правой, примыкающие друг к другу как показано на рис.5а. Покроем эти области системами окон $\{D^k\}$, $D^k \in O$ для левой полосы и $\{\underline{D}^k\}$, $\underline{D}^k \in \underline{O}$ - для правой ($k = 1, 2, \dots, M$) (рис. 5б). Здесь M - количество окон анализа, выбор которого определяет порядок получаемой системы уравнений. На рис.5б пирамидальные функции веса $K_i(r)$, задаваемые на окнах анализа, для наглядности изображены с относительным сдвигом $\Delta h = h$ и только на левой полосе.

При вычислении функционалов вида (1), (2) и (4) используем окна с номерами k и $(k+1)$. Тогда эти функционалы приобретут индекс k ., например:

$$F^k = \frac{N^k}{Z^k}; N^k = (\Phi_k - \Phi_{k+1}); Z^k = (\Phi_k + \Phi_{k+1}).$$

В базисных функционалах (2) будем использовать функцию веса одного и того же вида - пирамидальную с высотой, равной единице (рис. 5б). Функции веса «привязаны» к своим окнам и различаются только местоположением на изображениях, поэтому для упрощения записи индекс, указывающий на принадлежность функции веса конкретному функционалу, будем опускать.

Построив для каждой пары (D^k, D^{k+1}) окон из O и соответствующей им пары $(\underline{D}^k, \underline{D}^{k+1})$ окон из \underline{O} уравнение вида (6), получим переопределенную систему ФС-уравнений:

$$\Delta F^k = F_x^k \hat{s}_x + F_y^k \hat{s}_y, \quad (7)$$

где $k \in \{1, 2, \dots, M - 1\}$.

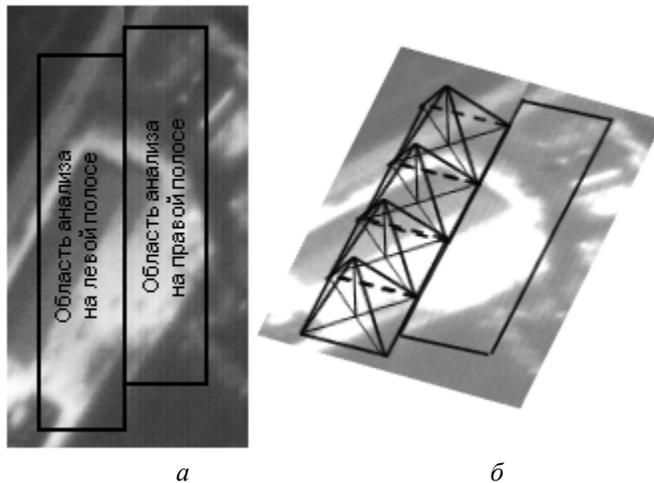


Рис. 5. Области анализа на сшиваемых полосах а – и перекрытие левой из них окнами анализа с заданными на окнах пирамидальными функциями веса – б

Систему (7) представим в матричной форме:

$$\Delta \mathbf{F} = \mathbf{C} \hat{\mathbf{S}}, \quad (8)$$

где $\Delta \mathbf{F} = \left\| \Delta F^1 \quad \Delta F^2 \quad \dots \quad \Delta F^m \right\|^T$, $\mathbf{C} = \left\| \begin{matrix} F_x^1 & F_x^2 & \dots & F_x^m \\ F_y^1 & F_y^2 & \dots & F_y^m \end{matrix} \right\|^T$,

$\hat{\mathbf{S}} = [\hat{s}_x \quad \hat{s}_y]^T$ - оценка вектора взаимного смещения фрагментов изображений,

T – символ операции транспонирования, $m=M-1$.

Одним из эффективных методов решения системы (7, 8) является метод квазиобращения [13]. Применим его, преобразовав (8) к виду:

$$\mathbf{C}^T \Delta \mathbf{F} = \mathbf{C}^T \mathbf{C} \hat{\mathbf{S}}$$

и перемножив матрицы, получим систему двух линейных уравнений с неизвестными \hat{s}_x и \hat{s}_y

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{S}}, \quad (9)$$

где $\mathbf{B} = \mathbf{C}^T \Delta \mathbf{F} = [b_x \quad b_y]^T$, $b_\alpha = \sum_k (F_\alpha^k \Delta F^k)$ и $\alpha, \beta \in \{x, y\}$,

$$\mathbf{A} = \mathbf{C}^T \mathbf{C} = \left\| \begin{matrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{xy} & a_{yy} \end{matrix} \right\|, \quad a_{\alpha\beta} = \sum_k (F_\alpha^k F_\beta^k) \text{ и } \alpha, \beta \in \{x, y\}.$$

Система (9), при отличии ее определителя от нуля, решается тривиально.

3. Итерационная процедура совмещения изображений

Процедура сшивки фрагментов полос начинается с задания на сшиваемых полосах областей анализа O и \underline{O} . От выбора положения этих областей зависит, насколько близки изображения в соответствующих фрагментах полос. Всякие отличия в этих фрагментах эквивалентны внесенному в изображения шуму. С такой точки зрения, в задаче сшивки шумы появляются на обрабатываемых фрагментах вследствие следующих факторов:

- не идентичности свойств ПЗС матриц, с помощью которых получены сшиваемые полосы изображений;
- наличия в каждой из областей анализа изображений объектов, не попавших в другую область анализа, вследствие ошибки взаимного сдвига областей анализа;
- не совпадения проекций сеток пикселей смежных матриц на пространство объектов.

Поскольку ФС-уравнения (3,6) справедливы только при достаточно малых взаимных смещениях фрагментов изображений, а реальные смещения могут достигать десятков и более пикселей, то маловероятно, что фрагменты будут совмещены при однократной реализации изложенной методики. Наличие случайных шумов в изображениях еще более осложняет задачу. Поэтому естественно применить итерационную процедуру совмещения фрагментов. Итерационные процедуры применяются при совмещении изображений и другими методами [7,8].

Используем здесь следующую итерационную процедуру вычисления параметров взаимного совмещения полос изображений:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{S}}(0) &= \hat{\mathbf{S}}_0, \\ \hat{\mathbf{S}}(I+1) &= \hat{\mathbf{S}}(I) + \Delta\hat{\mathbf{S}}(I), \\ I &= 0, 1, \dots, m;\end{aligned}\tag{10}$$

где $\hat{\mathbf{S}}_0$ - начальная оценка вектора параметров и в скобках указан номер I итерации.

На каждой итерации процедуры (10), как и во всех известных способах совмещения изображений, основанных на использовании «градиентного метода» [7-11], вычисляются поправки $\Delta\hat{\mathbf{S}}(I)$ к текущей оценке $\hat{\mathbf{S}}(I)$ вектора параметров сдвига изображений.

Здесь поправки вычисляются на основе формирования и решения системы ФСУравнений вида (6). На каждой итерации, прежде чем вычислять поправку $\Delta\hat{\mathbf{S}}(I)$, область анализа Q на правом изображении $\underline{E}(r)$ устанавливается в новое положение, определяемое значением оценки вектора $\hat{\mathbf{S}}(I)$, вычисленным на предыдущей итерации.

Итерационная процедура останавливается по достижении компонентами критерия «качества совмещения» [4] некоторых наперед заданных значений. Критерий качества совмещения изображений введен в [4].

Особенностью этой процедуры является то, что ширина w области анализа меняется на итерациях: $w(I) = \lfloor s_x(I) \rfloor$. Причем, используются области анализа с нецелочисленным (субпиксельным) значением ширины.

Погрешность получаемой сшивки анализировалась на искусственно разрезанных реальных изображениях исследовалась в [14]. Погрешность не превышала 0,1 пикселя.

Сходимость процедуры для простейшего вида изображения исследована в [15].

4. Результаты экспериментального исследования методики сшивки изображений

Для экспериментальных исследований использовались изображения подстилающей поверхности, полученные МОЭП типа «Сангур». Обработывались изображения с типовыми сюжетами: «город», «поля», «лес» (рис.6), «горы».

Анализ изображений показал, что в них содержатся фрагменты, трудно поддающиеся сшивке с помощью алгоритмов, основанных на «корреляционном» методе. Такие «плохие» фрагменты (артефакты) могут быть подразделены на две группы по виду их автокорреляционной функции (АКФ). Первая группа характеризуется тем, что АКФ изображений содержит несколько явно выраженных локальных экстремумов. К этой группе относятся, в частности, изображения с периодическими структурами без изломов, линейаменты. Периодическую линейную структуру имеет, например, изображение вида «скошенное поле» (рис.6 б). На рис.7 на фоне скошенного поля дано изображение АКФ этого изображения. Видно, что периодическая структура яркостного поля, изображающего АКФ, точно повторяет рисунок скошенного поля. Это наглядно демонстрирует причину периодичности АКФ и наличия в ней множества локальных экстремумов.

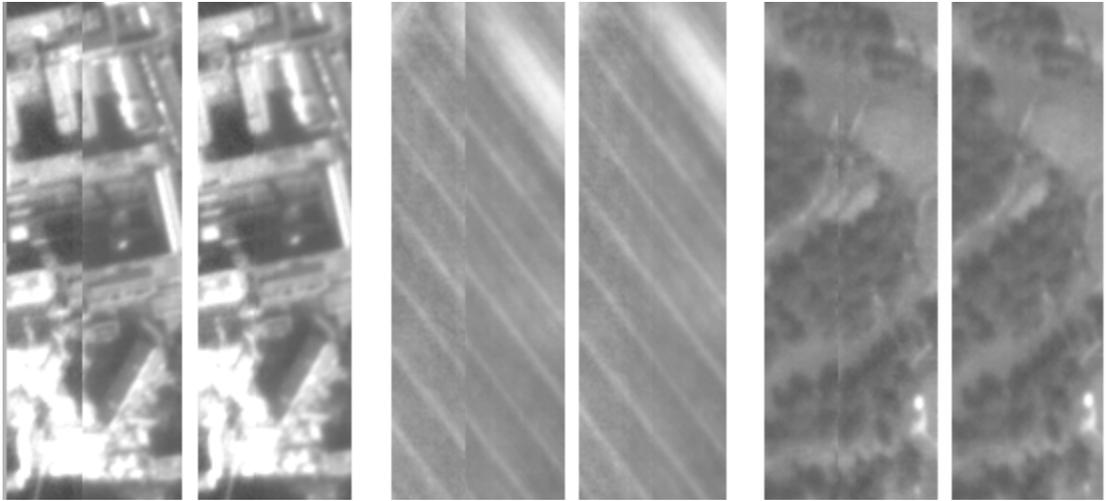


Рис. 6. Примеры изображений вида: *а* – «город»; *б* – «скошенное поле»; *в* – «лес» в исходном состоянии и после сшивки

Другой пример АКФ с множеством локальных экстремумов дают изображения лесных массивов. Пример АКФ для изображения вида «лес» (рис.6в) приведен на рис.8.

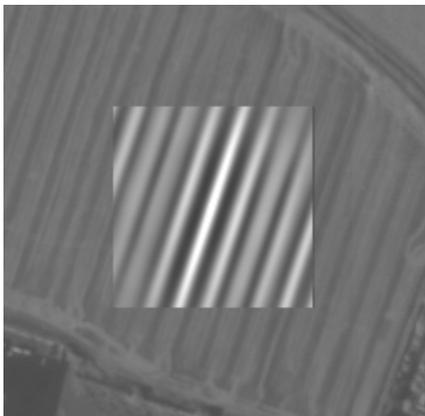


Рис. 7. Изображение вида «скошенное поле» и его АКФ

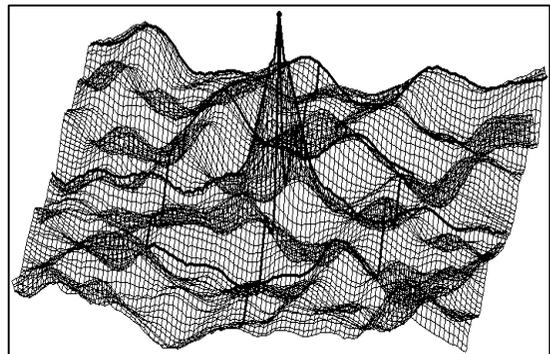


Рис. 8. Пример АКФ для изображения вида «лес»

Артефакты изображений второй группы характеризуются малой информативностью или наличием искажений в виде засветки изображения. Автокорреляционная функция таких изображений имеет слишком слабо выраженный или ложный глобальный экстремум, истинное положение которого не может быть надежно определено ни «корреляционным методом», ни предлагаемым методом. К этой группе относятся, в частности, изображения:

- водных пространств;
- многих видов облаков;
- ярких снежных и ледовых покровов.

Экспериментальное программное обеспечение (ЭПО), созданное на основе изложенной выше методики, реализует автоматический режим работы. Оно позволяет эффективно сшивать изображения, содержащие артефакты первой группы. В результате применения разработанного

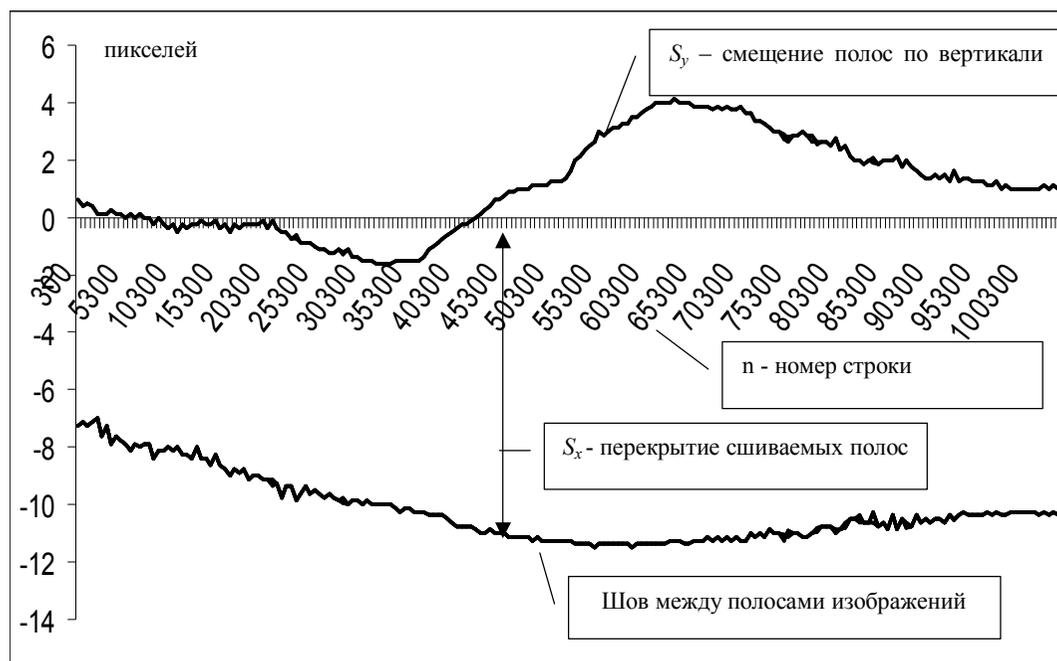


Рис. 9. Пример графика-протокола сшивки двух полос

ЭПО к перечисленным выше снимкам все полосы были сшиты полностью и с субпиксельной точностью. Примеры сшивки фрагментов таких изображений даны на рис. 6. На рис. 9 приведен пример протокола параметров сшивки ($s_x(n), s_y(n)$) двух полос в виде графиков в функции номера (n) строки левого изображения.

Сшивка изображений, относящихся ко второй группе артефактов, может быть проведена только либо по информации от приборов внешнего ориентирования носителя ИС, либо путем аппроксимации по значениям параметрам сшивки ближайших фрагментов.

Проведенные эксперименты выявили следующие свойства предложенной методики:

- мала чувствительность к наличию в изображении периодических структур типа «линементы»;
- мала чувствительность к аддитивным и мультипликативным помехам;
- характерный радиус области притяжения (область притяжения – это множество начальных смещений одного изображения относительно другого, для которого используемый метод приводит к совмещению изображений) существенно, часто в 5-10 раз, больше области притяжения, свойственной корреляционным методам;

- возможна сшивка изображений со слабо выраженной структурой (типа «облака»);
- погрешность сшивки менее 0,2 пикселя.

Следует подчеркнуть, что сшивка изображений не требует привлечения данных об ориентации носителя ИС в процессе съемки.

В работе [14] приведена оценка качества сшивки полос изображений с помощью ЭПО, разработанного на основе описанной методики. Для получения объективной базы для оценки качества сшивки данным методом проводились численные эксперименты с искусственно созданными швами. Швы генерировались вырезанием пар полос из реальных изображений. При этом ширина перекрытия искусственно создаваемых швов задавалась, при движении вдоль шва, осциллирующей в диапазоне от 4 до 16 пикселей, а темп ее изменения задавался выше, чем на всех наблюдавшихся реальных швах.

Было установлено, что в большинстве случаев ошибка вычисляемой оценки значения ширины перекрытия изображений (ширина шва) не превосходит по абсолютному значению 0,05 пикселя. Это типичный результат, полученный в экспериментах с искусственными швами. В редких, худших, случаях (менее 1%) абсолютное значение ошибки достигало 0,12 пикселя. Худшие случаи приходились на строки изображения, где темп изменения ширины шва был максимальным.

Перечисленные свойства методики позволили разработать алгоритмы совмещения изображений, которые работают при значительном начальном рассогласовании взаимного положения совмещаемых изображений. Допустимое начальное рассогласование сшиваемых изображений в долевом направлении (вдоль формируемого «шва») в экспериментах достигало 50 пикселей и более (в зависимости от сюжета), а в поперечном направлении (перекрытие изображений) – 2-16 пикселей.

Возможность проведения сшивки без привлечения данных внешней ориентации носителя ИС обеспечивается тем, что методика позволяет вычислять параметры сдвига фрагментов изображений, составляющих шов, располагая их плотно вдоль шва, с произвольным шагом. При этом методика не требует предварительного отыскания на изображениях благоприятных для сведения фрагментов. Неблагоприятные фрагменты отфильтровываются в процессе их сведения по значениям критерия качества сведения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еремеев В.В., Егوشкин Н.А., Козлов Е.П. Нормализация космических изображений Земли на основе их сопоставления с электронными картами // Цифровая обработка сигналов, 2009. №3. стр. 21-26.
2. Кузнецов А.Е., Пресняков О.А. Модели геометрического соответствия совмещаемых изображений // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка – 2002. №2. – С. 119 – 128.
3. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / Под. ред. М.Н.Красильщикова, Г.Г.Себрякова. – М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2009. – 556 с. – ISBN 978-5-9221-1168-3.
4. Кузнецов П.К., Мартемьянов Б.В., Семавин В.И., Чекотило Е.Ю. Метод определения вектора скорости движения подстилающей поверхности // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. – 2008 - №2. – Самара, с. 96-110.
5. А.с. №1742729 СССР : МКИ G 01 3 3/36. – № 4774743/10 ; заявл. 26.12.1989 ; опубл. 23.06.1992, Бюл. № 23.– 7 с. Устройство для определения составляющей вектора скорости движения объекта. В.Е.Агеев, В.Н.Войтенко, О.А.Анайкин, П.К.Кузнецов, В.И.Семавин.
6. Кузнецов П.К., Семавин В.И. Метод определения параметров движения яркостного поля. //Известия ВУЗов. Приборостроение, №6, 1990, с. 26 – 30
7. В. Horn and B. Schunck. Determining optical flow. Artificial Intelligence, 16:185–203, Aug. 1981.
8. В. Lucas and T. Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In IJCAI, pages 674–679, 1981.

9. *P. Anandan*, A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion, Internat. J. Comput. Vision 2, 1989, 283–310.
10. *H. Bulthoff, J. Little, and T. Poggio*, A parallel algorithm for real-time computation of optical flow, Nature, 337, 1989, 549–553.
11. *H.-H. Nagel*, Displacement vectors derived from second order intensity variations in image sequences, Comput. Vision Graphics Image Process. 21, 1983, 85–117.
12. *Злобин В.К., Еремеев В.В.* Обработка космических изображений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 288с. – ISBN 5-921-0739-9.
13. *Латтес Р., Лионс Ж.-Л.* Метод квазиобращения и его приложения. – М., Мир, 1970 г
14. *Мартемьянов, Б.В.* Оценка качества алгоритма сшивки изображений, основанного на методе функционализации// Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». – № 3 (25). – Самара, 2009. С.88-95.
15. *Кузнецов П.К., Чекотило Е.Ю., Мартемьянов Б.В.* Исследование сходимости итерационной процедуры определения параметров движения изображений методом функционализации// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки. – 2010. - №2(26). – С. 80 - 85.

Статья поступила в редакцию 4 мая 2011 г.

TECHNIQUE REGISTRATION OF IMAGES OBTAINED BY AN AIR-BORNE MULTIMATRIX SCANNING OPTICAL-ELECTRONIC CONVERTERS

P.K. Kuznetsov¹, B.V. Martemyanov¹, V.K. Skirmunt², V.I. Semavin¹

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

² Federal State Unitary Enterprise State Research and Production Space-Rocket Center «TsSKB-Progress»
«Progress» Design Bureau, Samara, Russia
18, Zemetsa st., Samara, 443009

This article discusses technique of stitching strips of images obtained by air-borne multimatrix scanning optical-electronic converters. The algorithms that implement the method, are characterized by high accuracy and fast-action. The algorithms based on the method of functionalization of image parameters.

Keywords: *opto-electronic converter, functionalization method, image stitching.*

*Pavel K. Kuznetsov – Doctor of Technical Sciences, Professor.
Boris .V. Martemyanov – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.
Valeriy K. Skirmunt – Head of Department of FSUP
Vladimir I. Semavin – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.*