

УДК 621.397.3: 536.3

СОВМЕЩЕНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С СУБПИКСЕЛЬНОЙ ТОЧНОСТЬЮ МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

© 2004 г. А. С. Потапов, И. А. Малышев, канд. техн. наук; В. Р. Луцив, канд. техн. наук

ВНЦ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

Предложен метод локальной корреляции, позволяющий совмещать с субпиксельной точностью предварительно грубо сопоставленные аэрокосмические изображения, трансформированные друг относительно друга равномерным проективным преобразованием и дополнительными взаимными локальными смещениями. Основой метода является установление соответствия между точками пары изображений посредством фазовой корреляции отдельных фрагментов изображений. Распространение информации об измеренных сдвигах от опорных точек, для которых было найдено соответствие на паре изображений, а также применение анализа с переменным пространственным разрешением обеспечивает работоспособность метода при ошибках предварительного совмещения, больших, чем размер окна корреляции. В работе приведены результаты экспериментальной проверки подхода на примере реальных пар аэрокосмических изображений.

Коды OCIS: 100.2980, 3000.3020.

Поступила в редакцию 30.09.2003.

Введение

Совмещение изображений является фундаментальной проблемой компьютерного видения, поскольку необходимость установления соответствия между точками различных изображений возникает при решении таких задач, как выявление изменений, анализ движения, объединение информации от различных сенсоров, стереозрение и текстурный анализ. Зачастую совмещение изображений требуется выполнять с субпиксельной точностью. Множество работ было посвящено проблеме совмещения, и для ее решения было предложено достаточно большое число методов [2–12], которые можно разделить [1] по типу используемых характерных признаков изображения и допустимого пространственного преобразования. Также немаловажной является и стратегия поиска оптимальных параметров преобразования, которая основывается на функции качества и оптимизационном алгоритме. По типу характерных признаков изображения различают два класса методов: методы, использующие сами пиксели с соответствующими им значениями яркости [3, 4], и методы, основанные на характерных признаках изображения [8, 9]. В последнем случае в качестве характерных признаков изображения могут выступать точки контуров или краевые точки [2, 12], различные структурные или геометрические элементы [9, 13], пятна текстур или конкретные физические объекты [6]. Второй важной характеристи-

кой метода совмещения является допустимое пространственное преобразование, которое описывается одним из следующих способов: глобальным преобразованием [11, 12], задающим общее отображение всей площади одного изображения на второе, и полем смещений [7, 10], определяющим сдвиг для каждой точки изображения. В качестве глобального преобразования могут выступать преобразование из группы движения, преобразование подобия, аффинное или проективное преобразования. Последнее естественным образом возникает при съемке плоской поверхности под различными углами и является общим случаем всех предыдущих, однако оно используется крайне редко из-за нелинейности по параметрам и сложности в установлении инвариантов. Поле смещений используется в тех случаях, когда глобальное преобразование отсутствует, а сами смещения не слишком велики. Это характерно для задач стереозрения [7] и некоторых биомедицинских приложений [3, 5].

Во всех вышеперечисленных методах используются слишком сильные ограничения на модель пространственного преобразования. В частности, практически отсутствуют методы, работающие с проективным преобразованием, а также методы, учитывающие одновременно как глобальное преобразование, так и поле смещений. При совмещении аэрокосмических изображений, полученных с различных ракурсов, такие ограничения становятся недопустимыми, так как дают существенную ошибку.

В настоящей работе описан метод, позволяющий получать точное совмещение изображений, подвергнутых взаимному проективному преобразованию с возможными дополнительными локальными смещениями, на основании грубого совмещения, полученного каким-либо другим методом при более сильных ограничениях на модель пространственного преобразования.

В предлагаемом методе в качестве характерных признаков изображения используются пикселы с соответствующими им значениями интенсивностей, объединенные во фрагменты изображения определенных размеров. Выбор метода, основанного на областях, обусловлен тем, что в случае использования в качестве характерных признаков изображений структурных элементов результирующие опорные точки (т. е. точки, идентифицированные на обоих изображениях) обладают заметными ошибками положения и недостаточно плотно покрывают изображение. Это приводит к недостаточной для последующих задач точности пространственного преобразования. Для определения взаимного смещения фрагментов используется корреляционный подход, а интерполяция кросскорреляционного поля вблизи максимума позволяет достичь субпиксельной точности.

Метод был применен для уточнения результатов совмещения, полученного с помощью структурного классификатора [13], что позволило совместить надежность методов, основанных на структурных элементах, и высокую точность методов, основанных на площадях. В результате удалось расширить класс пространственных преобразований до глобального проективного преобразования с локальными смещениями. В рамках работы была экспериментально исследована эффективность подхода.

Постановка задачи совмещения изображений

В задаче совмещения даны два изображения:

$$I_1: S \rightarrow \mathbb{R}, I_2: T \rightarrow \mathbb{R} \text{ и } S, T \subset \mathbb{R}^d, \quad (1)$$

где d – размерность изображений, для большинства случаев равная двум, однако в некоторых приложениях (например, биомедицинских) используются объемные изображения. Задача совмещения изображений заключается в нахождении такого пространственного преобразования $g: S \rightarrow T$, которое позволяет преобразовать одно изображение по отношению ко второму таким образом, чтобы соответствующие между собой точки на двух изображениях совпадали.

Для решения задачи совмещения изображений необходимо сделать некоторые предположения как о свойствах самих изображений, так и о виде пространственного преобразования между ними, по-

скольку для произвольного случая задача неразрешима. Пространственное преобразование задается в некоторой параметрической форме и, таким образом, указывается его принадлежность определенному классу преобразований (так называемое пространство поиска). Мы рассмотрим задачу совмещения на примере аэрокосмических изображений, полученных с различных типов сенсоров и подверженных сезонно-суточным изменениям, что вызывает присутствие неоднородного преобразования яркости и локальной смены знака контраста. Наиболее общим классом глобальных пространственных преобразований в случае аэрокосмических изображений является проективное преобразование

$$\left. \begin{aligned} g_x(x, y) &= \frac{a_0x + a_1y + a_2}{a_3x + a_4y + 1}, \\ g_y(x, y) &= \frac{a_5x + a_6y + a_7}{a_3x + a_4y + 1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Однако кроме глобального преобразования на аэрокосмических изображениях могут также присутствовать и локальные сдвиги.

Для метода локальной корреляции, как и для ряда других методов, важным является понятие опорной точки. Опорными точками называются такие точки, для которых соответствующие позиции были идентифицированы на обоих изображениях. Поскольку опорные точки должны точно отображаться пространственным преобразованием, они играют роль ограничений, которым пространственное преобразование должно удовлетворять. Пусть $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$ и $\{(x'_i, y'_i)\}_{i=1}^N$ – множество опорных точек на первом изображении и множество соответствующих им опорных точек на втором изображении. Тогда функцией стоимости пространственного преобразования будет являться функция

$$L(g) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[(x'_i - g_x(x_i, y_i))^2 + (y'_i - g_y(x_i, y_i))^2 \right], \quad (3)$$

задающая квадрат среднеквадратичного отклонения соответствующих друг другу опорных точек после применения данного пространственного преобразования.

Таким образом, задача совмещения аэрокосмических изображений методом локальной корреляции заключается в нахождении множества опорных точек и определении пространственного преобразования, наиболее точно соответствующего найденным опорным точкам,

$$g = \arg \min_{g \in G} \{L(g)\}, \quad (4)$$

где G – множество проективных преобразований. Основная идея предлагаемого подхода заключается в методе определения координат опорных точек, к рассмотрению которого мы теперь и перейдем.

Установление соответствия между опорными точками в методе локальной корреляции

Предлагаемый метод локальной корреляции позволяет установить для данной опорной точки первого изображения соответствующую ей опорную точку на втором изображении. Для этого на первом изображении берется фрагмент вокруг данной опорной точки размером $N \times N$ пикселей и ищется максимум корреляционного отклика данного фрагмента со вторым изображением. Положение корреляционного максимума и будет отвечать точке на втором изображении, соответствующей взятой опорной точке первого изображения.

Таким образом, взяв достаточное количество опорных точек на первом изображении и определив соответствующие им точки второго изображения, можно построить оптимальное проективное преобразование, удовлетворяющее уравнению (4). Метод решения этого уравнения в настоящей статье не приводится, а алгоритм выбора опорных точек на первом изображении будет рассмотрен ниже.

С целью оптимизации по времени кросскорреляционное поле вычислялось через применение прямого и обратного преобразований Фурье. Как известно, быстрое преобразование Фурье для двумерных массивов размера $N \times N$ имеет сложность $N^2 \log_2 N$, в то время как вычисление корреляции в пространстве изображения по определению корреляции имеет сложность N^4 .

Вычисление корреляции через умножение пространственных спектров имеет также и то преимущество, что позволяет использовать фазовую корреляцию, которая обладает гораздо более узким корреляционным максимумом, что позволяет получать лучшую точность в определении его положения.

В методе локальной корреляции предлагается использовать корреляцию фрагмента первого изображения, взятого вокруг опорной точки, не со всем вторым изображением, а также брать фрагмент вокруг точки, предположительно соответствующей данной опорной точке. Однако такое соответствие не может быть точным, и взятые фрагменты будут перекрываться лишь частично. Более того, в дополнение к несоответствию по сдвигу могут быть также не полностью скомпенсированы и другие компоненты пространственного преобразования. Эти вопросы мы планируем осветить в следующей ста-

тье. Здесь же мы перейдем к описанию алгоритма локальной корреляции.

Алгоритм локальной корреляции

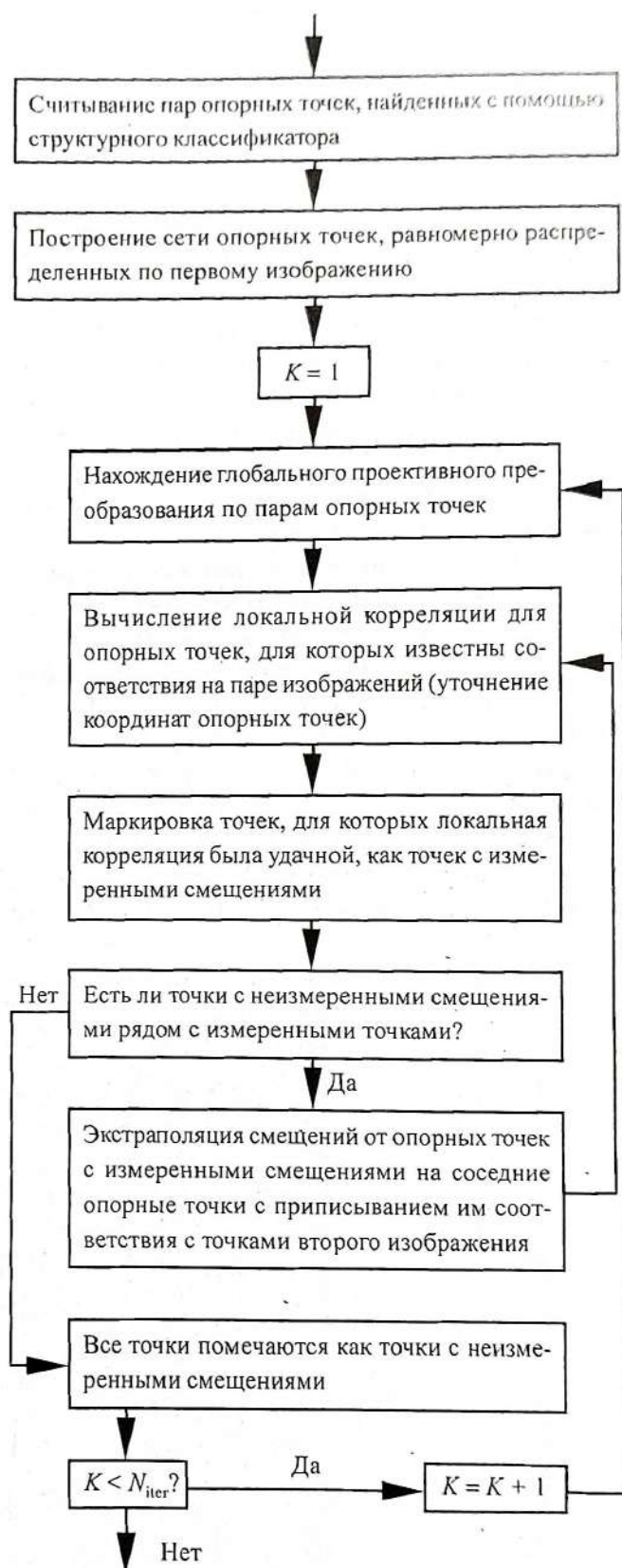


Рис. 1. Схема алгоритма локальной корреляции. K – номер текущей итерации, N_{iter} – общее число итераций.

Общая схема алгоритма локальной корреляции приведена на рис. 1. Как видно из схемы, для метода локальной корреляции требуется задание набора пар опорных точек, найденных некоторым другим методом, по которым можно было бы вычислить начальное грубое проективное преобразование. Далее эти опорные точки дополняются "сетью" опорных точек, равномерно распределенных по первому изображению. Затем производится уточнение положений всех опорных точек с помощью корреляции вырезанных вокруг них фрагментов, как это описано в предыдущем разделе. При этом если для данной опорной точки на первом изображении еще не установлена соответствующая ей опорная точка на втором изображении, то такое соответствие устанавливается с помощью экстраполяции смещений от соседних опорных точек, для которых известны координаты на обоих изображениях. Такое последовательное распространение измеренных смещений позволяет надежно выполнять корреляцию даже для тех фрагментов, для которых ошибка положения превышает размер фрагмента.

Можно показать, что ошибка положения корреляционного максимума пропорциональна ошибке коэффициентов глобального преобразования. Поскольку с помощью метода локальной корреляции эти коэффициенты уточняются, то в случае повторного применения этого метода результат оказывается точнее.

Такой итерационный метод локальной корреляции можно совмещать с подходом с переменным разрешением. Для этого на первых итерациях используются уменьшенные в определенное число раз изображения, а коэффициенты найденного гло-

бального преобразования и локальные смещения пересчитываются для следующей итерации с учетом масштабного фактора. Подход с переменной разрешающей способностью позволяет расширить применимость метода локальной корреляции на случай менее точных начальных пространственных преобразований (особенно это касается изображений больших размеров).

К сожалению, в данной работе нет места для подробного анализа вопросов выбора оптимального размера фрагментов изображений, скорости сходимости итерационного метода локальной корреляции, а также интерполяции положения кросскорреляционного максимума на субпиксельный уровень. Заметим лишь, что был взят размер фрагмента в 64 пиксела, а для достижения предельной точности оказалось достаточно трех итераций.

Экспериментальная проверка

Разработанный алгоритм улучшения совмещения изображений на основе использования их локальной корреляции был практически испытан на множестве пар реальных авиационных и космических снимков. Эксперименты показали, что применение этого алгоритма обеспечивает значительное улучшение качества совмещения как для изображений, отличающихся в основном общим взаимным проективным преобразованием, так и в более сложных случаях, связанных с локальными отклонениями взаимного преобразования координат от глобальной проективной модели. Проиллюстрируем характерные преимущества и недостатки разрабо-



Рис. 2. Пара изображений (приведены уменьшенные в два раза изображения) для совмещения методом локальной корреляции. На левом рисунке белой линией отмечен овраг, разделяющий области, требующие применения разного проективного преобразования.

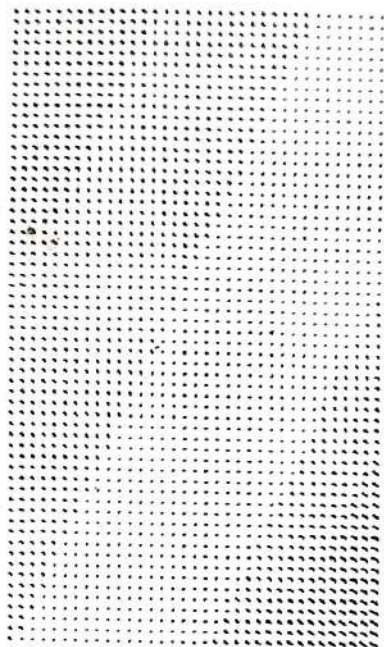


Рис. 3. Поле локальных смещений, найденных методом локальной корреляции и не компенсирующихся глобальным проективным преобразованием (длина и направление штрихов указывают вектор смещения в данной точке).

танного алгоритма на основе двух приведенных ниже примеров.

На паре изображений, представленных на рис. 2, земная поверхность с разных сторон реки наклонена под различными углами, поэтому переход от одного изображения к другому для каждого из склонов описывается своим проективным преобразованием. После применения общего глобального преобразования координат остаются ошибки, возрастающие к краям изображений по мере удаления от реки (рис. 3) и достигающие 10 пикселей. Эти ошибки исправляются методом локальной корреляции. Без компенсации локальных сдвигов данные изображения затруднительно использовать для последующего анализа, например для выявления изменений.

На рис. 4 приведены изображения, связанные достаточно сильным взаимным глобальным проективным преобразованием. При выполнении грубого предварительного совмещения опорные точки были построены исходя из аффинной модели их взаимного преобразования (именно по такой модели работает примененный структурный классифи-

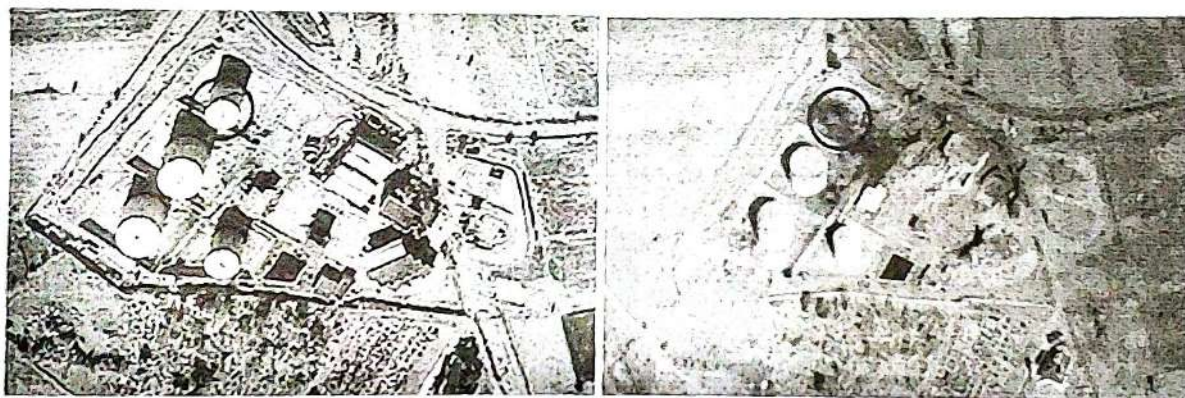


Рис. 4. Пара изображений (приведены уменьшенные в два раза изображения) для совмещения методом локальной корреляции преобразованных друг относительно друга проективным преобразованием с разрывами на поле смещений.

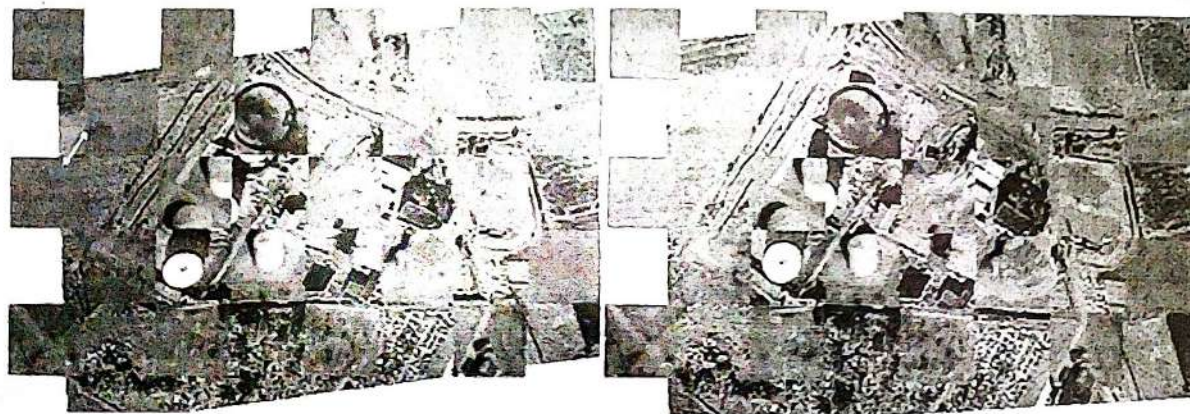


Рис. 5. Результаты совмещения изображений, представленных на рис. 4. Слева – совмещение структурным классификатором (стрелкой указана несовмещенная деталь на паре изображений), справа – уточненное совмещение методом локальной корреляции с компенсацией ошибок, превосходящих 30 пикселей.

катор), поэтому рассчитанное начальное грубое преобразование обладает существенными ошибками, которые достигают 37 пикселей (рис. 5). На рис. 5 также приведены результаты улучшенного совмещения. Видно, что улучшенное проективное преобразование достаточно хорошо в целом описывает переход от одного изображения к другому, т. е. методом локальной корреляции были исправлены ошибки совмещения, составлявшие несколько десятков пикселей. Однако на исходных изображениях присутствуют высокие сооружения, снятые с разных ракурсов, что вызвало разрывы в измеренном поле локальных смещений. Подобные отклонения от глобального преобразования не могут быть исправлены методом локальной корреляции, что хорошо заметно на рис. 5. Это является основным ограничением ее применимости.

Процедура локальной корреляционной коррекции совмещения показала ее работоспособность для изображений, полученных в разных спектральных полосах и в разные сезоны. Однако совмещение радиолокационных изображений с оптическими ненадежно, и качество результата сильно зависит от точности исходно заданных опорных точек.

Заключение

В настоящей статье описан алгоритм улучшения совмещения аэрокосмических изображений с применением локальной корреляции. Предварительное совмещение выполнялось разработанным ранее методом структурного совмещения, использующим аффинную модель пространственного преобразования [13]. Разработанный метод позволяет:

исправлять ошибки совмещения, достигающие 30–40 пикселей,

определять параметры глобального проективного преобразования,

находить поле локальных смещений,

выполнять совмещение с субпиксельной точностью,

совмещать изображения, полученные в разные сезоны и с помощью сенсоров различного типа.

Основным недостатком метода является его неспособность полностью исправлять пространствен-

ные искажения в случае разрыва поля локальных смещений или его быстрых изменений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brown L.G. A survey of image registration techniques // ACM Computing surveys. 1992. V. 24. P. 325–376.
2. Olson C.F. A probabilistic formulation for Hausdorff matching // Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 1998. P. 150–156.
3. Christensen G.E. Consistent linear-elastic transformations for image matching // Proc. Information Processing in Medical Imaging. 1999. P. 224–237.
4. Thevenaz et al. A pyramid approach to subpixel registration based on intensity // IEEE Transactions on Image Processing. 1998. V. 7. № 1. P. 27–41.
5. Gabrani M., Tretiak O.J. Surface-based matching using elastic transformations // Pattern Recognition. 1999. V. 32. P. 87–97.
6. Grove S., Tonjes R. A knowledge based approach to automatic image registration // Proc. Int. Conf. on Image Processing. 1997. V. 3. P. 228–231.
7. Lan Z-D., Mohr R., Remagnino P. Robust matching by partial correlation // Proc. of sixth British Machine Vision Conf. 1995. P. 651–660.
8. Baumberg A. Reliable feature matching across widely separated views // Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2000. P. 774–781.
9. Efrat A., Gotsman C. Subpixel image registration using circular fiducials // Int. Journal of Comp. Geom. and Appl. 1994. V. 4. № 4. P. 403–422.
10. Rohr K. Image registration based on thin-plate splines and local estimation of anisotropic landmark uncertainties // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. 1998. Vol. 1496. P. 1174–1183.
11. Thevenaz P., Ruttimann U.E., Unser M. Iterative multi-scale registration without landmarks // Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing. 1995. V. 3. P. 228–231.
12. Pinz A., Prantl M., Ganster H. A robust affine matching algorithm using an exponentially decreasing distance function // J. Universal Computer Sci. 1995. V. 1. № 8. P. 614–631.
13. Lutsiv V.R., Malyshev I.A., Pepelka V., Potapov A.S. Target independent algorithms for description and structural matching of aerospace photographs // Proc. SPIE. 2002. V. 4741. P. 351–362.