

УДК 528.854/87(15)

Л. А. Белозерский

Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси,
220012, Беларусь, г. Минск, ул. Сурганова, 6, blzrsk@newman.bas-net.by

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И КОРРЕКЦИЯ ПОЛОЖЕНИЙ АВТОМАТИЧЕСКИ РАССТАВЛЕННЫХ ТОЧЕК ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО СОГЛАСОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАЗНОВРЕМЕННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ

L. A. Belozersky

United Institute of Informatics Problems of the NAS of Belarus, Minsk
22012, Belarus, Minsk, Surganova st., 6

AUTOMATIC CONTROL AND CORRECTION OF AUTOMATICALLY PLACED POINTS POSITION FOR GEOMETRIC MATCHING OF SATELLITE SURVEY IMAGES TAKEN AT DIFFERENT TIMES

Предлагаемый подход в поиске сопутствующих ошибок основывается на выполнении ко-регистрации в два этапа. В конце выполнения первого этапа вводятся разностные матрицы взаимных расстояний реперных точек, обнаруживаются и циклически устраняются ошибки по превышению порога их существенности. Решение этой задачи основывается на принципе полного соответствия геометрических пропорций изображения текущей съемки, прошедшего ко-регистрацию, опорному изображению, только при отсутствии ошибок расстановки реперных точек. Приводится схема автоматического обнаружения отклонений от указанного соответствия и их ликвидации. Демонстрируется пример ее практического применения.

Ключевые слова: изображения разновременной съемки, ко-регистрация, коррекция, преобразование, разностная матрица взаимных расстояний, расстановка, растровые координаты, опорные (согласующие) точки, топографические координаты, участок пространственной идентификации.

Concomitant errors search based on implementation of co-registration in two phases is proposed. At the end of the first stage the difference matrices for mutual distances of control points are introduced. Then errors exceeding the threshold of significance are detected and cyclically removed. The solution of this problem is based on complete matching principle for geometric proportions of the current survey image (under co-registration) and the reference image only in the absence of placement errors of the ground control points. A scheme of automatic detection and elimination of deviations from this correspondence is given. An example of its practical application is demonstrated.

Keywords: images taken at different times, co-registration, correction, transformation, difference matrix of mutual distances, placement, raster coordinates, control (matching) points, topographic coordinates, area of spatial identification.

Введение

Одной из операций, входящих в арсенал средств обработки изображений разновременной космической съемки контролируемого объекта, является выравнивание отражаемых ими пропорций местности. Наиболее привычным из применяемых для этого способов является ко-регистрация. В ее реализации изображение предварительной съемки (ИПС) этого объекта рассматривается как опорное, а любое изображение последующей съемки, подлежащее согласованию с ним, – как текущее (ИТС).

Представляя по существу геометрическую коррекцию «снимка к снимку», называемой еще совмещением, привязкой изображений [1] или ко-регистрацией, она является давно известным и широко применяемым решением, которое в основе своей детализации предполагает [2]:

- равномерную или иную расстановку на ИПС точек, играющих роль в согласовании с ним изображений последующей съемки, состоящую в фиксации топографической привязки к местности каждой из них $x_i^{ИПС}, y_i^{ИПС}$ по обычно известной привязке рассматриваемого изображения ($x_{00}^{ИТС}, y_{00}^{ИТС}$);

- выделение «изображенческого» окружения опорных точек ИПС, то есть участков их последующей пространственной идентификации (УПИ) на ИТС;

- автоматический поиск мест установки тех же опорных точек на любом ИТС того же объекта (определение растровых координат в пикселях $n_{xi}^{ИТС}, n_{yi}^{ИТС}$ относительно его северо-западного угла), состоящий в последовательных поисковых перемещениях и корреляционно-экстремальной проверке соответствия покрытий этого изображения участкам пространственной идентификации;

- решение задачи геометрической коррекции изображения текущей съемки по известным растровым координатам автоматически расставленных на нем опорных точек опорного изображения с установленной топографической привязкой.

Несмотря на всю очевидность рассмотренного процесса давно известно (например [1]), что упомянутый поиск и идентификация участков могут завершаться ложным определением мест установки опорных точек, а, следовательно, ошибками геометрического согласования изображений. Причины этого известны:

- существенно отличающиеся геометрические искажения ИТС по сравнению с ИПС, чувствительность применяемых методов к растровым искажениям;

- отсутствие явно выраженных особенностей отображаемой местности ИТС (преимущественно в другой части спектра по отношению к ИПС);

- чрезмерное ограничение области поиска места совпадения с ним УПИ в условиях негарантированной точности начальной топопривязки ИТС, а также другие особенности применения метода идентификации.

При этом ни известные процедуры повышения работоспособности корреляционных алгоритмов, ни автоматический отказ от использования отдельных опорных точек, ни даже интерактивное участие оператора в контроле и коррекции больших ошибок, достаточно часто не приводят к желаемому результату.

В то же время избавиться от возникающих проблем позволяет предлагаемая ниже методология, ориентирующаяся на автоматическое обнаружение ошибок и коррекцию положений расставленных опорных точек. Основопологающий принцип построения такой методологии, который можно назвать принципом соответствия, – геометрические пропорции опорного и текущего изображения, прошедшего идеальную ко-регистрацию с ним, должны полностью соответствовать друг другу.

1 Носители информации о соответствии геометрических пропорций изображений разновременной съемки

Полному соответствию геометрических пропорций изображений разновременной спутниковой съемки после их ко-регистрации сопутствует равенство координат объектов, отображаемых ИПС и ИТС. Указанное равенство должно характеризовать и места идеально выполненной установки опорных точек, являющихся инструментом в достижении соответствия изображений. Если исключить маловероятный случай равного ошибочного смещения по знакам и величинам всех таких точек при автоматической расстановке на изображениях текущей съемки, то постоянство взаимных расстояний между разновременными изображениями окажется индикатором интересующего соответствия. Отсюда следует, что неравенство тех же расстояний на ИПС и ИТС – очевидное свидетельство отсутствия геометрического соответствия изображений, а следовательно, ошибочной расстановки части опорных точек, ориентированных на осуществление ко-регистрации.

В качестве характеристики того и другого случаев могут использоваться матрицы взаимных растровых расстояний (МВР) по каждой из координат между согласующимися точками одного и другого изображений. При этом очевидно, что для одной из растровых координат ИПС ($n_x^{ПС}$) матрица 6-и опорных точек в общем виде выглядит так:

$$\Omega_x^{ПС} = \begin{pmatrix} \Delta n_{x11}^{ПС} & \Delta n_{x12}^{ПС} & \Delta n_{x13}^{ПС} & \Delta n_{x14}^{ПС} & \Delta n_{x15}^{ПС} & \Delta n_{x16}^{ПС} \\ \Delta n_{x21}^{ПС} & \Delta n_{x22}^{ПС} & \Delta n_{x23}^{ПС} & \Delta n_{x24}^{ПС} & \Delta n_{x25}^{ПС} & \Delta n_{x26}^{ПС} \\ \Delta n_{x31}^{ПС} & \Delta n_{x32}^{ПС} & \Delta n_{x33}^{ПС} & \Delta n_{x34}^{ПС} & \Delta n_{x35}^{ПС} & \Delta n_{x36}^{ПС} \\ \Delta n_{x41}^{ПС} & \Delta n_{x42}^{ПС} & \Delta n_{x43}^{ПС} & \Delta n_{x44}^{ПС} & \Delta n_{x45}^{ПС} & \Delta n_{x46}^{ПС} \\ \Delta n_{x51}^{ПС} & \Delta n_{x52}^{ПС} & \Delta n_{x53}^{ПС} & \Delta n_{x54}^{ПС} & \Delta n_{x55}^{ПС} & \Delta n_{x56}^{ПС} \\ \Delta n_{x61}^{ПС} & \Delta n_{x62}^{ПС} & \Delta n_{x63}^{ПС} & \Delta n_{x64}^{ПС} & \Delta n_{x65}^{ПС} & \Delta n_{x66}^{ПС} \end{pmatrix}.$$

Здесь элементы МВР по координате $n_x^{ПС}$ взаимных растровых расстояний ИПС определяются как следующие разности:

$$\Delta n_{xij}^{ПС} = n_{xi}^{ПС} - n_{xj}^{ПС} \quad \text{при } i, j = \overline{1,6}. \quad (1)$$

Аналогично они вычисляются и по его координате $n_y^{ПС}$:

$$\Delta n_{yij}^{ПС} = n_{yi}^{ПС} - n_{yj}^{ПС} \quad \text{при } i, j = \overline{1,6}.$$

Количественно представить возможную МВР и обнаружить ее особенности легко, рассмотрев, например, ситуацию для шести опорных точек опорного изображения, имеющих значения координаты $n_{x1}^{ПС} = 2$; $n_{x2}^{ПС} = 6$; $n_{x3}^{ПС} = 10$; $n_{x4}^{ПС} = 14$; $n_{x5}^{ПС} = 18$; $n_{x6}^{ПС} = 22$:

$$\Omega_x^{ПС} = \begin{pmatrix} 0 & -4 & -8 & -12 & -16 & -20 \\ 4 & 0 & -4 & -8 & -12 & -16 \\ 8 & 4 & 0 & -4 & -8 & -12 \\ 12 & 8 & 4 & 0 & -4 & -8 \\ 16 & 12 & 8 & 4 & 0 & -4 \\ 20 & 16 & 12 & 8 & 4 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Являясь вещественной кососимметрической матрицей, аналогично выглядит МВР и по второй координате опорного изображения n_y^{PC} . Кроме того, внешне не отличаются от них матрицы взаимных расстояний тех же точек, но на прошедшем ко-регистрацию изображении текущей съемки по одной и другой его растровым координатам¹ n_x^{*TC}, n_y^{*TC} .

Вполне очевидно, что только при полном соответствии в отображении пропорций местности изображениями опорной и текущей съемок можно ожидать, что матрицы окажутся равными. Если же этого соответствия нет, то МВР будут отличаться значениями одноименных элементов. Однако, являясь характеристикой интересующего соответствия или несоответствия, разновременные МВР сами по себе еще не содержат непосредственных оценок. И только сравнение их, представляемое в виде разностей МВР между собой, демонстрируют более наглядные и удобные для последующего автоматического анализа разностные матрицы взаимных расстояний (РМВР):

$$\begin{aligned}\Delta\Omega_x &:= \Omega_x^{*TC} - \Omega_x^{PC}; \\ \Delta\Omega_y &:= \Omega_y^{*TC} - \Omega_y^{PC}.\end{aligned}\quad (3)$$

При этом каждый элемент таких матриц определяется следующим образом:

$$\Delta\omega_{xi} = \Delta n_{xi}^{*TC} - \Delta n_{xi}^{PC}, \Delta\omega_{yi} = \Delta n_{yi}^{*TC} - \Delta n_{yi}^{PC}.\quad (4)$$

Вполне очевидно, что элементы РМВР, отличные от нуля, представляют собой величины, равные искомому растровому несоответствию. Так, в качестве примера, можно представить МВР ИТС по одной из координат, отличающейся от МВР ИПС (2) ошибками в 2 и 6 пикселей для 3-й и 6-й опорных точек ($n_{x1}^{*TC} = 2$; $n_{x2}^{*TC} = 6$; $n_{x3}^{OC} = 12$; $n_{x4}^{*TC} = 14$; $n_{x5}^{*TC} = 18$; $n_{x6}^{*TC} = 28$). Тогда согласно выражению (4) РМВР этой пары принимает следующий вид:

$$\Delta\Omega_x = \begin{vmatrix} 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & -6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6 \\ 2 & 2 & 0 & 2 & 2 & -4 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & -6 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & -6 \\ 6 & 6 & 4 & 6 & 6 & 0 \end{vmatrix}$$

Здесь уже несложно обнаружить, что большинство элементов третьей строки и третьего столбца РМВР, характеризующих смещение третьей реперной точки относительно положения, заданного опорным изображением, имеют одинаковую величину при отличающихся знаках. Они характеризуют ошибку в ее установке, равную двум пикселям. Аналогично строка и столбец шестой реперной точки отражают величину ее ошибки в 6 пикселей. То есть знаки элементов РМВР в строках и столбцах отражают направления смещений в установке опорных точек на ИТС относительно желаемых положений, заданных ИПС, а повторяющиеся величины элементов – значения смещений. Исключение составляют элементы пересечения строк и столбцов одного номера ошибочно установленной реперной точки (в приведенном примере 3-я строка и 3-й столбец РМВР и соответственно 6-я строка и 6-й

¹ Растровые координаты ИТС выделены звездочкой для обозначения принадлежности их изображению, прошедшему ко-регистрацию с ИПС.

столбец). В местах таких пересечений равные величины ошибок суммируются с разными знаками, образуя нулевые значения. По-своему реагируют на пересечения строк одного номера со столбцами разных номеров других ошибочно установленных опорных точек (в приведенном примере 3-й столбец и 6-я строка РМВР). В каждом таком случае пересечение характеризуется своей суммой определяемых ими отличающихся номеров ошибок и знаков.

Наряду с этим в реальных условиях большинство автоматически расставленных опорных точек могут содержать хотя и незначительные, но ошибки установки их на ИТС, прошедшем ко-регистрацию. Это происходит за счет влияния существенных ошибок автоматической установки отдельных из указанных точек на геометрическое преобразование всех остальных. Тем самым значения упомянутых при этом существенных ошибок, безусловно требующих автоматического обнаружения, оказываются случайно искаженными (табл. 1).

Таблица 1 – Реальная РМВР

№№	1	2	3	4	5	6
1	0	3	21	2	1	3
2	-3	0	18	-1	-2	0
3	-21	-18	0	-19	-20	-18
4	-2	1	19	0	-1	1
5	-1	2	20	1	0	2
6	-3	0	18	-1	-2	0

Таблица 2 – Реальная РМВР после пороговой обработки

№№	1	2	3	4	5	6
1	0	0	21	0	0	0
2	0	0	18	0	0	0
3	-21	-18	0	-19	-20	-18
4	0	0	19	0	0	0
5	0	0	20	0	0	0
6	0	0	18	0	0	0

Влияние такой случайности, затрудняющей в ряде случаев процесс обнаружения номеров ошибочно установленных опорных точек, соответствующих обнаруживаемым номерам столбцов и строк, может быть устранено. Так, располагая уровнем значимости интересующих ошибок, можно предварительно исключить из состава РМВР элементы, относимые к несущественным. Назначить такой уровень можно, например, из представлений о предельно допустимой ошибке в отношении влияния ее на результат геометрической коррекции [3]. Примером интересующего упрощения РМВР при пороге значимости 15, выше которого ошибки расстановки можно считать заслуживающими внимания, для модулей ее элементов, представленных в табл. 1, демонстрирует табл. 2.

В результате проведенного удаления мешающих столбцов и строк сама величина смещения неверно установленной согласующей точки (в табл. 2 – это точка 3) может быть найдена как среднее значение элементов обнаруженных столбцов по одной и другой координатам :

$$\Delta\bar{\omega}_{xi} := \frac{1}{C_{xi}} \sum_{i=1}^{i=m} \Delta\omega_{xi} ; \quad \Delta\bar{\omega}_{yi} := \frac{1}{C_{yi}} \sum_{i=1}^{i=m} \Delta\omega_{yi} , \quad (5)$$

где $\Delta\omega_{xi}, \Delta\omega_{yi}$ – значения относительной ошибки рассматриваемой согласующей точки в i -м столбце каждой РМВР;

C_{xi}, C_{yi} – число значений относительной ошибки i -го столбца РМВР.

При этом полученное среднее, конечно, не окажется равным фактической ошибке, но, как показывает практика, представляет величину, незначительно отличающуюся от нее, не влияющую на результаты ко-регистрации. Кроме того, чем меньше ошибочно расставленных опорных точек, тем меньше и указанное отличие.

Обращаясь теперь к реализации рассмотренной возможности оценки качества расстановки опорных точек, следует еще раз обратить внимание на то, что она была рассчитана на выполнение ко-регистрации изображения текущей съемки. Только соответствующее ей преобразование ИТС обеспечивает построение МВР, сопоставимой с такой же матрицей ИПС, а следовательно, и непосредственное определение РМВР. Однако для этого интересующая информация должна быть получена не апостериорно, а до проведения ко-регистрации. В противном случае после предполагаемого устранения обнаруженных ошибок установки отдельных опорных точек придется ко-регистрацию выполнять еще раз, повторяя при этом большой объем операций, не относящихся непосредственно к решаемой задаче. Конечно, такое повторение не исключает получения интересующих оценок, но нежелательно по ряду очевидных причин.

2 Аппарат ко-регистрации и его применение для априорного обнаружения ошибочно расставленных опорных точек

Для того чтобы в процессе извлечения априорной информации по качеству расстановки опорных точек отказаться от необходимости решения задач, не относящихся к достижению поставленной цели, следует обратить внимание на то, что ко-регистрация текущего изображения, как и любая геометрическая коррекция, всегда осуществляется в два этапа [2]:

- преобразование координат ИТС;
- преобразование яркостей (интерполяция) исходного изображения для формирования яркостей подготавливаемой сетки пикселей.

Первый этап основывается на установлении полиномиальной связи растровых координат элементов текущего изображения $(n_{xi}^{TC}, n_{yi}^{TC})$ и их топографических поло-

жений (x_i, y_i) в виде прямого $(\left\| \begin{matrix} n_{xi}^{TC} \\ n_{yi}^{TC} \end{matrix} \right\| \rightarrow \left\| \begin{matrix} x_i^* \\ y_i^* \end{matrix} \right\|)$ преобразования, обеспечивающего расчет топографической привязки нового скорректированного изображения $(x_{00}^{TC}, y_{00}^{TC})$, его размеров и ориентации относительно сторон света.

Аналогично на тех же данных основывается и определение обратного преобразования:

$$\left(\left\| \begin{matrix} x_i \\ y_i \end{matrix} \right\| \rightarrow \left\| \begin{matrix} \tilde{n}_{xi}^{TC} \\ \tilde{n}_{yi}^{TC} \end{matrix} \right\| \right).$$

При этом общие выражения коэффициентов прямого и обратного полиномиальных преобразований, в основе формирования которых лежит метод наименьших квадратов, в векторном представлении по каждой из координат выглядят так [2], [4]:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{V}^T \cdot \mathbf{N}_x; \quad \mathbf{W} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{V}^T \cdot \mathbf{N}_y; \quad (6)$$

$$\mathbf{Q}^{OB} = \mathbf{C}_{OB}^{-1} \mathbf{V}_{OB}^T \cdot \mathbf{X}; \quad \mathbf{W}^{OB} = \mathbf{C}_{OB}^{-1} \mathbf{V}_{OB}^T \cdot \mathbf{Y}, \quad (7)$$

где $\mathbf{C} = \mathbf{V}^T \mathbf{V}$; $\mathbf{C}_{OB} = \mathbf{V}_{OB}^T \mathbf{V}_{OB}$.

Векторы и матрицы преобразований (6), (7) строятся на уже упомянутых растровых и топографических координатах опорных точек, где

$\mathbf{X} = \|x_1, x_2, x_3, \dots, x_m\|^T$ – вектор топографических координат x для m опорных точек;

$\mathbf{Y} = \|y_1, y_2, y_3, \dots, y_m\|^T$ – вектор топографических координат y для m опорных точек;

$\mathbf{N}_x = \|n_{x1}, n_{x2}, n_{x3}, \dots, n_{xm}\|^T$ – вектор растровых (пиксельных) координат n_x опорных точек;

$\mathbf{N}_y = \|n_{y1}, n_{y2}, n_{y3}, \dots, n_{ym}\|^T$ – вектор растровых (пиксельных) координат n_y опорных точек;

$\mathbf{V}, \mathbf{V}_{OB}$ – матрицы предикторов [4] преобразования, построенные соответственно на известных топографических и автоматически определенных растровых координатах m опорных точек текущего изображения. Для произвольного порядка преобразования¹ они выглядят следующим образом:

$$\|\mathbf{V}\| = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & y_1^2 & x_1 \cdot y_1 & \dots \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & y_2^2 & x_2 \cdot y_2 & \dots \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3^2 & y_3^2 & x_3 \cdot y_3 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_m & y_m & x_m^2 & y_m^2 & x_m \cdot y_m & \dots \end{vmatrix}; \quad \|\mathbf{V}_{OB}\| = \begin{vmatrix} 1 & n_{x1}^{TC} & n_{y1}^{TC} & (n_{x1}^{TC})^2 & (n_{y1}^{TC})^2 & n_{x1}^{TC} \cdot n_{y1}^{TC} & \dots \\ 1 & n_{x2}^{TC} & n_{y2}^{TC} & (n_{x2}^{TC})^2 & (n_{y2}^{TC})^2 & n_{x2}^{TC} \cdot n_{y2}^{TC} & \dots \\ 1 & n_{x3}^{TC} & n_{y3}^{TC} & (n_{x3}^{TC})^2 & (n_{y3}^{TC})^2 & n_{x3}^{TC} \cdot n_{y3}^{TC} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & n_{xm}^{TC} & n_{ym}^{TC} & (n_{xm}^{TC})^2 & (n_{ym}^{TC})^2 & n_{xm}^{TC} \cdot n_{ym}^{TC} & \dots \end{vmatrix}.$$

В отличие от первого второй этап геометрической коррекции, завершающий ко-регистрацию, является самым ресурсоемким в связи с необходимостью формирования сетки нового изображений и многократного применения обратных преобразований для определения яркостей каждого ее пикселя [2].

Наблюдаемая здесь самостоятельность первого этапа позволяет одновременно обнаружить достаточность применяемого аппарата для представления опорных точек в составе скорректированного ИТС до выполнения второго этапа ко-регистрации. Иными словами, на этой основе необходимая информация по качеству расстановки опорных точек может быть получена априорно по отношению к полному объему ко-регистрации ИТС. Соответствующие действия с согласующими точками можно считать априорным геометрическим преобразованием ИТС.

В частности, применение прямого преобразования координат к каждой согласующей точке, автоматически установленной на исходном ИТС, обеспечивает определение ее топографической привязки (как и любой другой точки) в составе условно формируемого нового геометрически скорректированного ИТС:

$$\begin{vmatrix} x_i^* \\ y_i^* \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{v}_{TC} \\ \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{v}_{TC} \end{vmatrix}, \tag{8}$$

где $\mathbf{v}_{TC} = \|1 \ n_{xi}^{TC} \ n_{yi}^{TC} \ (n_{xi}^{TC})^2 \ (n_{yi}^{TC})^2 \ n_{xi}^{TC} \cdot n_{yi}^{TC} \ \dots\|^T$;

n_{xi}^{TC}, n_{yi}^{TC} – автоматически определенные растровые координаты i -ой согласующей точки ($i = \overline{1, m}$).

¹ Порядок рассматриваемого преобразования выбирается в зависимости от степени геометрических искажений съемки.

Одновременно то же преобразование определяет априорно привязку преобразованного изображения текущей съемки, то есть топографические координаты его северо-западного угла, и обуславливает приобретение этим изображением ориентации относительно сторон света:

$$\begin{aligned} x_{00}^{*TC} &= \mathbf{Q}^T \cdot \|1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots\|^T; \\ y_{00}^{*TC} &= \mathbf{W}^T \cdot \|1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots\|^T. \end{aligned} \quad (9)$$

И уже на основе этих данных (8), (9) оказывается возможным расчет растровых координат каждой автоматически установленной согласующей точки в составе априорно преобразованного ИТС:

$$n_{xi}^* := E \left[\frac{x_i^* - x_{00}^{*TC}}{\delta} \right]; \quad n_{yi}^* := E \left[\frac{y_{00}^{*TC} - y_i^*}{\delta} \right], \quad (10)$$

где δ – пространственная разрешающая способность съемки (размер пикселя) в метрах.

E – операция вычисления целой части.

Отсюда известность растровых координат n_{xi}^* , n_{yi}^* опорных точек априорно (без определения яркостных данных) скорректированного ИТС в соответствии с принятым принципом соответствия создает условия для определения МВР Ω_x^{TC} , Ω_y^{TC} , а затем согласно (3) – РМВР по каждой из этих координат $\Delta\Omega_x$, $\Delta\Omega_y$.

В итоге, с учетом методологии, изложенной в разделе 1, задачи обнаружения номеров опорных точек, установленных с ошибками, и определения величин имеющих место их растровых смещений ($\Delta\bar{w}_{xi}$, $\Delta\bar{w}_{yi}$) решаются до проведения ко-регистрации. Наряду с этим, как следует из дальнейшего рассмотрения, примененный аппарат априорной обработки обеспечивает и достижение главной цели – коррекцию ошибочной расстановки опорных точек.

3 Автоматически реализуемая коррекция ошибок расстановки опорных точек ко-регистрации

Обнаружение и оценка смещений ошибочной установки заданного числа (q) опорных точек (5), учитывая их знаки в столбцах РМВР, определяют скорректированные значения растровых положений этих точек в составе априорно преобразованного ИТС:

$$\begin{aligned} n_{xk}^* &:= n_{xk}^* + \Delta\bar{w}_{xk}; \\ n_{yk}^* &:= n_{yk}^* + \Delta\bar{w}_{yk} \quad k = \overline{1, q}. \end{aligned} \quad (11)$$

При известной пространственной разрешающей способности спутниковой съемки (δ) оцененным растровым координатам каждой (k -й) из q скорректированных опорных точек соответствует своя топографическая привязка, определяемая без осложнений в результате действий, обратных применяемым до этого (10):

$$x_k^* := n_{xk}^* \cdot \delta + x_{00}^{*TC}; \quad y_k^* := y_{00}^{*TC} - n_{yk}^* \cdot \delta. \quad (12)$$

Эти координаты q опорных точек, представляют однородные данные с координатами топографической привязки всех $m-q$ опорных точек ($i = \overline{1, m-q}$), заданных согласно прямому преобразованию (8).

То есть в двух новых массивах m опорных точек $m-q$ из них являются прежними значениями растровых и топографических координат соответственно, а q – подлежат замене на скорректированные в соответствии с выражениями (11) и (12).

Эти новые данные соответствуют априорно скорректированному ИТС. В то же выполнение ко-регистрации в полном объеме (первый и второй этапы) требует знания положений опорных точек до этого преобразования. Для этого остается к координатам массивов, полученных выше, применить переход от координат ИТС, прошедшего априорное преобразование, к ИТС исходной съемки. Такой переход уже предопределен в виде обратного преобразования (7):

$$\begin{pmatrix} n_{xi} \\ n_{yi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_{OB}^T \\ \mathbf{W}_{OB}^T \end{pmatrix} \cdot \mathbf{v}_{xy}^*, \quad (12)$$

где $\mathbf{v}_{xy}^* = \left\| 1 \quad x_i^* \quad y_i^* \quad (x_i^*)^2 \quad (y_i^*)^2 \quad x_i^* \cdot y_i^* \quad \dots \right\|^T$.

На этом решение поставленной задачи можно считать завершенным, что открывает возможность выполнения второго этапа ко-регистрации, то есть его проведения, но с гарантией более высокого качества, чем это обуславливали ошибочно расставленные до этого согласующие точки. При этом даже нет необходимости повторения операций определения преобразований и топопривязки скорректированного ИТС. В то же время следовало бы обратить внимание на то, что предшествующий этому процесс поиска смещений, оценок их величин и коррекции положений опорных точек рассмотрен выше (раздел 1) только для случая наиболее значимых ошибок. Однако к этому следовало бы отнестись, с одной стороны, как к примеру достижения максимальной прозрачности изложения принципов реализации предлагаемой последовательности действий. С другой стороны – как к способу удаления мешающих столбцов и строк для обнаружений ошибок и определения их значений. В связи с этим, легко обнаружить, что приведенная методология не содержит никаких противопоказаний для циклического проведения процесса устранения ошибок разного уровня. Это может потребоваться для последовательной многоуровневой коррекции. Для этого достаточно, начиная с обнаружения высокого уровня ошибок, использовать дискретное уменьшение порога в очередных циклах выполняемой коррекции до значимого. В итоге процесс обнаружения и коррекции ошибок автоматической расстановки опорных точек может быть представлен схемой, обеспечивающей переход ко второму этапу ко-регистрации только после выполнения назначаемого числа циклов устранения ошибок (рис. 1).

Приведенная схема демонстрирует взаимодействие основных этапов автоматического обнаружения и коррекции результатов автоматической расстановки опорных точек с возможностью их циклического выполнения. При этом переключатель П1 находится в положении 1, и только после необходимого числа циклов коррекции должен быть переведен в положение 2 для выполнения полного объема ко-регистрации. Программно-алгоритмическая реализация приведенных действий обеспечивает автоматический характер их программного выполнения.

Результаты практической реализации рассмотренной схемы в обработке изображений разновременной съемки, позволяют зрительно оценить, как изменяется положение установленной реперной точки после коррекции координат места ее ошибочной установки на изображении текущей съемки (рис. 2).

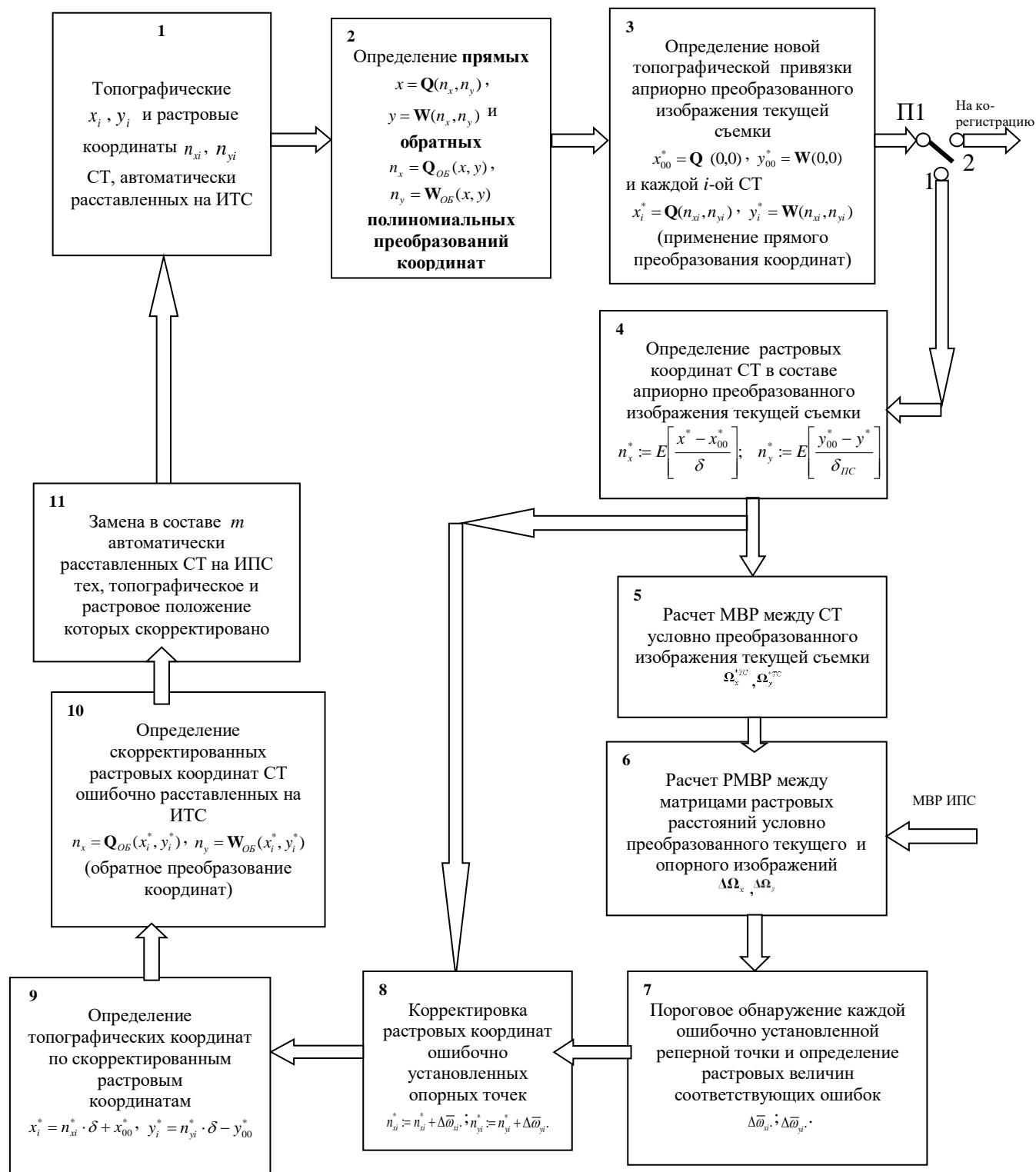
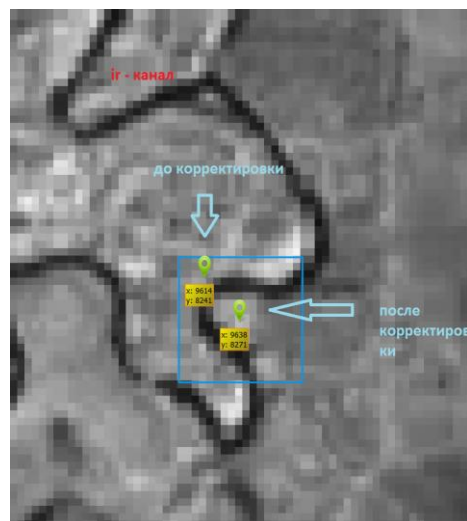


Рисунок 1 – Схема коррекции автоматической расстановки опорных точек



а) Положение реперной точки на панхроматическом изображении опорной съемки



б) Положения автоматически установленной реперной точки на изображении текущей ИК-съемки (до и после коррекции)

Рисунок 2 – Демонстрация ошибочной установки согласующей точки на изображении текущей съемки и результат автоматической коррекции ее положения

Так, на рис. 2а можно наблюдать исходное (опорное) положение рассматриваемой точки, а на рис. 2б – ошибочно найденное место ее автоматической установки на ИТС и положение после автоматической коррекции.

Заключение

Проведенное изложение предлагаемого подхода автоматического контроля и коррекции координат опорных точек изображений разновременной съемки для повышения качества их ко-регистрации позволяет сформулировать основные положения соответствующей методологии.

1. основополагающим принципом построения методологии обнаружения и коррекции ошибок является принцип соответствия геометрических пропорций земной поверхности, отражаемых опорным изображением и изображением текущей съемки, прошедшим с ним ко-регистрацию (геометрическую коррекцию «снимок к снимку»).

2. Индикатором качества автоматической расстановки опорных точек на изображении текущей съемки (выполнения принципа соответствия) и инструментом для определения значений соответствующих ошибок является разностная матрица взаимных расстояний между одноименными точками сопоставляемых изображений.

3. Алгоритмический аппарат первого этапа ко-регистрации (определение геометрических параметров преобразованного изображения) является достаточным для формирования разностной матрицы, отвечающей реализации принципа соответствия геометрических пропорций изображений разновременной съемки, и проведения коррекции возможных ошибок.

4. С целью облегчения условий обнаружения и оценки ошибок предлагается введение порога для выделения в составе разностной матрицы координатных смещений, превышающих предельно допустимый уровень в части их влияния на результат ко-регистрации.

5. Обнаружение ошибок расстановки, оценка их значений и коррекция осуществляются по данным разностной матрицы взаимных расстояний на уровне растровых координат опорных точек опорного и априорно преобразованного (прямое преобразование) изображения разновременной съемки, а завершаются заменой скорректированными (обратное преобразование) растровых координат в составе массивов их начальной автоматической расстановки.

6. Предлагаемая схема автоматической коррекции ошибок опорных точек отражает возможность циклического ее выполнения, начиная с более высоких уровней для достижения предельно допустимой ошибки, после чего осуществляется переключение на выполнение ко-регистрации в полном объеме второго этапа (интерполяция яркостей).

Список литературы

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: пер.с английского [Текст] / У. Прэтт. – М. : Мир, 1982. – Кн. 2 – 480 с.
2. Разностные представления в обнаружении изменений внешнего облика наземных объектов разновременной космической съемки оптического диапазона [Текст] / Л. А. Белозерский, Н. И. Мурашко, Л. В. Орешкина и др. ; под ред. А. И. Шевченко. – Донецк : Наука и образование», 2013. – 436 с.
3. Белозерский Л. А. Закономерности поведения оценок точности полиномиального преобразования геометрической коррекции изображений космической съемки. [Текст] / Л. А. Белозерский, Н. И. Мурашко // Искусственный интеллект. – 2011. – № 3. – С. 207-219.
4. Норманн Драйпер. Прикладной регрессионный анализ. [Текст] / Норманн Драйпер, Гарри Смит. – 3-е изд. Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2007. – 912 с.

References

1. Prett W. K. *Digital image processing*, Vol. 2, Rus.ed., Moscow, Mir, 1982. 480 p.
2. Belozersky L. A., Murashko N. I., Oreshkina L. V. *Raznostnye predstavleniya v obnaruzhenii izmenenij vneshnego oblika nazemnykh ob'ektov raznovremennoj kosmicheskoy syemki opticheskogo diapazona*, edited by cor. member of NAN Ukraine Shevchenko A.I., Donetsk, Nauka i obrazovanie, 2013. 436 p.
3. Belozersky L. A., Murashko N. I. Regularity of Behavior of Accuracy Estimation at Polynomial Transformation of Image Space Survey Geographic Correlation, *Iskusstvennyj intellekt* [Artificial Intelligence], 2011, no. 3, pp. 207-219.
4. Norman Draper, Harry Smith *Applied Regression Analysis*, 3rd ed., New York, Wiley, 1998. 736 p.

RESUME

L. A. Belozersky

Automatic Control and Correction of Automatically Placed Points Position for Geometric Matching of Satellite Survey Images Taken at Different Times

Background: Co-registration as a geometric correction of current survey image matches the reflected proportions of the earth's surface for proportions of the reference image taken by the prior survey, and includes a sequence of specific actions. One of these actions is an automatic placement of ground control (matching) points on the current survey image. In many cases it presupposes errors. The reason lies in the extremal image correlation method's certain instability to distortions, especially when spatial resolutions and spectral ranges of images taken at different times are dissimilar.

Materials and methods: Complete matching of geometric proportions of the current survey image under co-registration and reference image is possible only in the absence of placement errors. Such idealization corresponds to equality of mutual distances between defining points of both geometrically matched images. This implies placement

characteristics of selected points on both images; they are matrices of their mutual distances. The introduction of this pair of matrices involves determination of a direct carrier of information about inaccurate control points, where the carrier is the difference of these matrices for geometrically matched images taken at different times. When there are no errors, the difference matrix is equal to zero. In practice there is no such equality, thereof the matrix shows both the number of inaccurate point and the value of its displacement. Direct determination of such information carrier requires co-registration of the matching pair of images with initially inaccurate control points. Further, when the errors are detected and corrected, the same actions should be repeated for eliminating the inconsistency.

Results: The constraint consists in such resource-intensive operation of co-registration as interpolation of brightness. Solution lying in division of co-registration into two stages is proposed. The first stage requires insignificant period of time and it is algorithmically sufficient to determine automatically the differential matrix as well as to correct the initial placement of control points.

Conclusion: The significance threshold of the errors to be eliminated and its variations in possible elaboration cycles determine the proposed scheme of correction. Characteristic of achieved quality is visually demonstrated through experimental data. The completed first stage, after the required placement accuracy being reached, is compatible with the second stage of co-registration. Hence the solution for detection and correction of occurring errors is a new and urgent one for improvement of satellite survey thematic processing.

Статья поступила в редакцию 16.01.2017.