

МЕТОДИКА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ЦИФРОВЫМИ АЭРОКАМЕРАМИ

А.С. Василейский, М.М. Железнов, И.В. Полянский

*Институт космических исследований РАН, АНО "Космос-НТ"
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mail: asvas@wildcat.iki.rssi.ru*

При съемке земной поверхности цифровыми аэрокамерами на линейных ПЗС-детекторах в целях последующей геометрической коррекции и фотограмметрической обработки изображений используется навигационная информация, получаемая с приборов спутниковой навигации и гироскопических датчиков ориентации, по которой определяются элементы внешнего ориентирования (ЭВО) аэрокамеры в моменты регистрации отдельных строк.

Для отработки алгоритмов геометрической коррекции и оценки геометрической точности восстановленных изображений, получаемых цифровыми аэрокамерами - топографической стереокамерой ЦТК-140 и универсальной многозональной камерой ЦМК-70, разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее численно моделировать процесс съемки. Исходными данными при этом служит геометрическая модель съемочной аппаратуры и информация об угловых и линейных ЭВО камеры в моменты времени, соответствующие регистрации отдельных строк изображения. ЭВО могут задаваться как реальными навигационными измерениями, так и в виде математической модели углового и линейного перемещения самолета. В качестве модели земной поверхности используется любое тестовое изображение соответствующего пространственного разрешения. Моделирующая программа генерирует изображения, которые могли бы быть получены съемочной системой при реальной съемке. Методика отработки алгоритмов геометрической коррекции предусматривает использование разработанного моделирующего программного обеспечения, реализующего представленные алгоритмы.

Использование получаемых модельных снимков в процессе отработки алгоритмов геометрической коррекции не только позволяет существенно сократить объем натурных экспериментов, но и обеспечивает возможность прямой оценки точности геометрически скорректированных изображений.

Введение

При съемке земной поверхности цифровыми камерами на линейных ПЗС-детекторах последующая фотограмметрическая обработка изображений является значительно более сложной задачей по сравнению с обработкой снимков в центральной проекции, получаемых кадровыми съемочными системами [1, 2]. Съемочная аппаратура на линейных ПЗС-детекторах формирует изображения путем построчного сканирования за счет собственного движения ее носителя. При этом отраженное солнечное излучение регистрируется в моменты времени, разделенные заданным интервалом, и каждая строка изображения характеризуется своими элементами внешнего ориентирования (ЭВО). В отличие от космических съемочных систем, в случае аэросъемки передающиеся съемочной системе неизбежные возмущения движения самолета, приводят к существенным геометрическим искажениям формируемых изображений (пример изображения, полученного при аэросъемке цифровой камерой приведен на рис.1).

Для обеспечения автоматической геометрической коррекции получаемых изображений в состав аэросъемочных систем обычно включают прецизионную навигационную аппаратуру [3, 4]. Аппаратура автономной спутниковой навигации (АСН), обеспечивает измерение линейных ЭВО в дискретные моменты времени, а гироскопические датчики, входящие в состав инерциальной навигационной системы (ИНС), обеспечивают измерение угловых и уточнение линейных ЭВО на моменты времени, соответствующие регистрации отдельных строк изображения.

Прямые методы геометрической коррекции позволяют, используя навигационные измерения и результаты геометрической калибровки съемочной аппаратуры, определять координаты проекции каждого пиксела получаемых изображений на земную поверхность и осуществлять коррекцию геометрических искажений [1, 2, 5]. Зачастую недостаточная точность навигационных измерений приводит к необходимости их уточнения в процессе фотограмметрической обработки изображений [1, 4, 5].

В разрабатываемой АНО "Космос-НТ" цифровой топографической аэрокамере ЦТК-140 [6] используются девять линейных ПЗС-детекторов, объединенных в триады. Это позволяет проводить стереосъемку и обеспечивает сочетание широкой полосы обзора и высокого пространственного разрешения. Сложная

геометрия размещения детекторов в фокальной плоскости камеры ЦТК-140 усложняет разработку алгоритмов геометрической коррекции получаемых изображений.



Рис.1. Изображение окрестностей Берлина, полученное цифровой аэрокамерой ADS40 (LH Systems). Геометрические искажения изображения вызваны изменением угловых и линейных ЭВО в процессе съемки.

Отработка алгоритмов геометрической коррекции и оценка точности скорректированных изображений может проводиться на основе аэро съемок земной поверхности [4, 7]. При этом для оценки точности проводят идентификацию опорных точек (ОТ) на скорректированных изображениях и сравнение их координат с результатами наземных измерений, полученных с использованием аппаратуры GPS [4]. Альтернативный метод оценки точности заключается в идентификации и сравнении координат ОТ на скорректированном изображении и имеющемся фотоплане или крупномасштабной карте [8]. Объем аэро съемок можно сократить, если при отработке алгоритмов коррекции использовать результаты численного моделирования процесса аэро съемки [2].

Методика отработки программного обеспечения геометрической коррекции

Для отработки алгоритмов геометрической коррекции и оценки геометрической точности восстановленных изображений в рамках работ по созданию в АНО "Космос-НТ" семейства цифровых аэро камер предлагается использовать методику, основанную на численном моделировании процесс съемки. Схема предлагаемой методики показана на рис. 2.

В верхней части схемы темными блоками и стрелками показан процесс геометрической коррекции получаемых при аэро съемке изображений с помощью подлежащего отработке алгоритма с использованием навигационных измерений ЭВО и данных геометрической калибровки съёмочной системы.

Операции, проводимые при отработке алгоритма, показаны в нижней части схемы светлыми блоками и стрелками. Численное моделирование процесса съемки позволяет получать модельное изображение с привнесенными геометрическими искажениями. При этом используется геометрическая модель съёмочной системы и информация об изменении ЭВО, задаваемая результатами реальных навигационных измерений или в виде аналитической модели. Получаемое модельное изображение подвергается коррекции вместо реальных результатов аэро съемки. Для оценки точности алгоритма коррекции скорректированное изображение сравнивается с использовав-

шимся при моделировании съемки эталонным изображением. При этом производится идентификация и сравнение координат ОТ на скорректированном и эталонном изображениях.

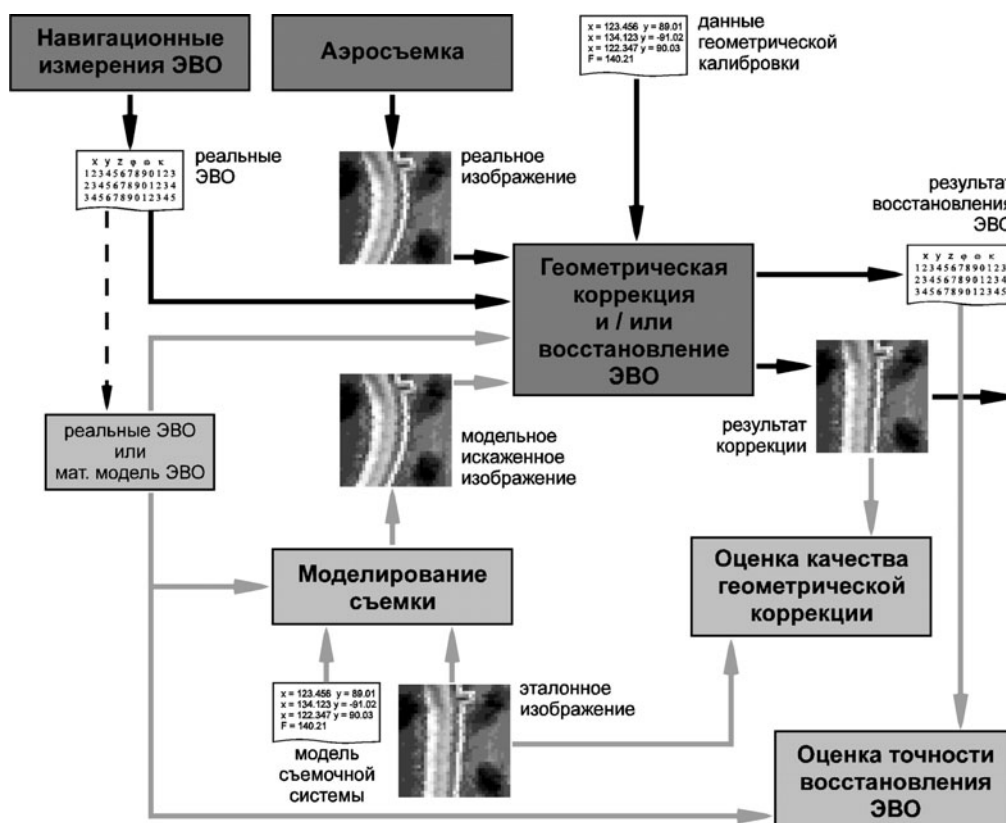


Рис. 2. Схема предлагаемой методики отработки алгоритмов геометрической коррекции.

Предлагаемая методика может также использоваться при отработке алгоритмов, обеспечивающих кроме геометрической коррекции оценку или уточнение ЭВО по самим изображениям без привлечения навигационных измерений [9]. В этом случае оценка точности восстановления ЭВО проводится путем сравнения с исходными ЭВО, использовавшимися при моделировании.

Алгоритм моделирования аэросъемки

Алгоритм моделирования аэросъемки предусматривает определение значения яркости, зафиксированного каждым чувствительным элементом съемочной системы в момент регистрации каждой из строк изображения. Для этого вычисляются координаты точки на модели земной поверхности, в которую при данных ЭВО проецируется луч, проходящий через заднюю узловую точку объектива и данный чувствительный элемент.

Модель съемочного устройства (см. рис.3) подразумевает расположение нескольких линейных N -элементных детекторов в фокальной плоскости камеры. При моделировании съемки для каждого чувствительного элемента каждой из линеек определяются координаты его центра в системе координат (СК) съемочного устройства. Начало O' этой СК находится в задней узловой точке объектива, а направление ее осей задается перпендикуляром, опущенным из задней узловой точки объектива на фокальную плоскость (ось $O'Z'$) и конструктивными осями камеры (ось $O'Y'$, ось $O'X'$ дополняет систему до правой). Затем определяются параметры прямой (луча проецирования), проходящей через центр чувствительного элемента и начало координат O' .

В соответствии с заданными линейными и угловыми ЭВО в момент съемки очередной строки изображения вычисляются параметры преобразования СК съемочного устройства в СК модели земли. Это условная СК, в которой задаются линейные и угловые ЭВО съемочного устройства. Земная поверхность считается плоской (плоскость $O''X''Y''$), а распределение яркости поверхности моделируется эталонным изображением (см. рис.3). В качестве эталонного изображения может использоваться любое изображение земной соответствующего пространственного разрешения, например оцифрованный аэрофотоснимок.

Затем вычисляются координаты точки пересечения луча проецирования и плоскости $O''X''Y''$, преобразуемые в номера строки и столбца пиксела эталонного изображения (в общем случае не целочисленные). Значение яркости данной точки на плоской модели земной поверхности, которое будет присвоено текущему пикселу (соот-

ветствующему данному чувствительному элементу) результирующего изображения, определяется путем линейной интерполяции.

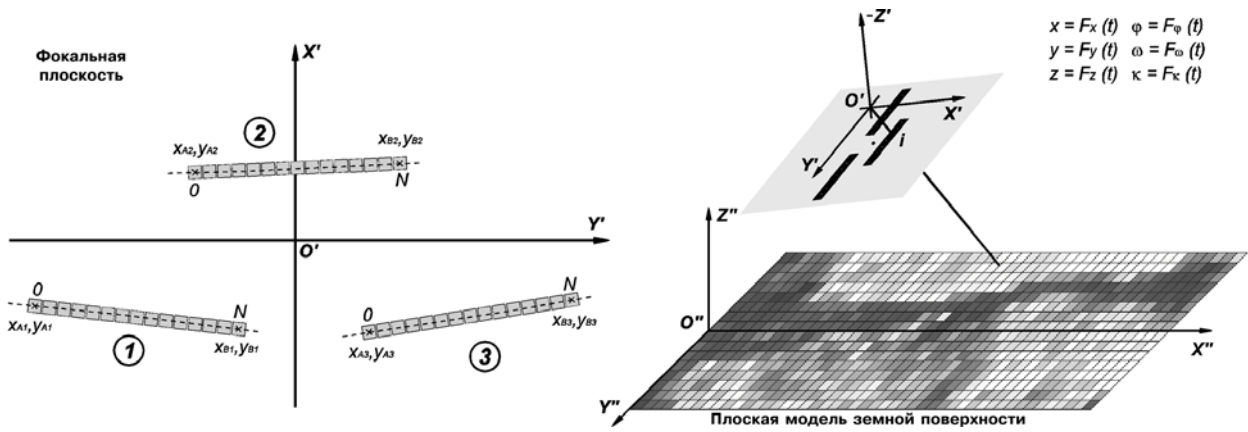


Рис.3. Схема расположения линейных детекторов триады камеры ЦТК-140 в фокальной плоскости съемочного устройства и схема моделирования процесса аэросъемки.

Программное обеспечение моделирования съемки

Предложенный алгоритм реализован в виде специализированного программного обеспечения (ПО), позволяющего численно моделировать процесс аэросъемки цифровыми камерами на линейных ПЗС детекторах и генерировать изображения, которые могли бы быть получены съемочной системой при реальной съемке. ПО реализовано в виде консольного приложения, управление которым осуществляется параметрами командной строки. Исходными данными для ПО являются следующие параметры, задаваемые в отдельных текстовых файлах специального формата:

- геометрическая модель съемочного устройства;
- угловые и линейные ЭВО на моменты съемки каждой из строк.

В качестве модели земной поверхности может использоваться любое изображение необходимого размера в формате BMP. Геометрическая модель съемочного устройства задается фокусным расстоянием и координатами в СК съемочного устройства крайних чувствительных элементов линейных ПЗС детекторов. В качестве угловых ЭВО могут использоваться заданные в табличном виде реальные навигационные измерения или амплитудные и частотные параметры (A_{ij} , \square_{ij}) аналитических зависимостей углов $\square(t)$, $\square(t)$, $\square(t)$ (крена, тангажа и рысканья соответственно) следующего вида:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= A_{11} \cdot \sin(\omega_{11}t) + A_{12} \cdot \sin(\omega_{12}t) \cdot \sin(\omega_{13}t) \\ \omega(t) &= A_{21} \cdot \sin(\omega_{21}t) + A_{22} \cdot \sin(\omega_{22}t) \cdot \sin(\omega_{23}t) \\ \kappa(t) &= A_{31} \cdot \sin(\omega_{31}t) + A_{32} \cdot \sin(\omega_{32}t) \cdot \sin(\omega_{33}t) \end{aligned}$$

Такая математическая модель достаточно адекватно описывает характер реальных изменений угловых ЭВО в процессе аэросъемки. Первый член суммы имитирует низкочастотные (\square_{i1}) колебания с большими амплитудами (A_{i1}). Второй член суммы имитирует высокочастотные (\square_{i2}) колебания с относительно малой амплитудой (A_{i2}), дополнительно модулированные по гармоническому закону с низкой частотой (\square_{i3}). Для сравнения на рис.4 представлены типичные графики изменения угловых ЭВО при аэросъемке.

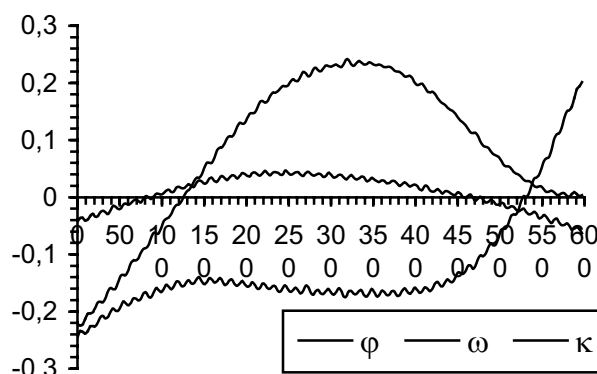


Рис.4. Реальные навигационные измерения угловых ЭВО, полученные при съемке окрестностей г.Дисбург 9.08.97 камерой HRSC-A¹.

Результаты моделирования

Для иллюстрации работы разработанного ПО рассмотрим пример численного моделирования процесса аэросъемки цифровой камерой ЦТК-140. В качестве угловых ЭВО при моделировании использовались результаты реальных навигационных измерений, проводившихся при съемке аэрокамерой HRSC-A (см. рис.4). Эталонным изображением служил снимок с аппаратуры SPOT-XS. Фрагменты двух изображений, полученных при моделировании съемки соседними ПЗС-линейками центральной триады камеры ЦТК-140 представлены на рис.5. Программное обеспечение обеспечило наложение на исходный снимок равномерной сетки, что позволяет визуально оценить геометрические искажения, привнесенные собственным движением самолета при съемке. Характер привнесенных искажений аналогичен искажениям, получаемым при реальной аэросъемке (см. например рис.1.). Полученные изображения использовались при отработке алгоритмов объединения в единую полосу изображений, получаемых тремя линейными детекторами одной триады камеры ЦТК-140.

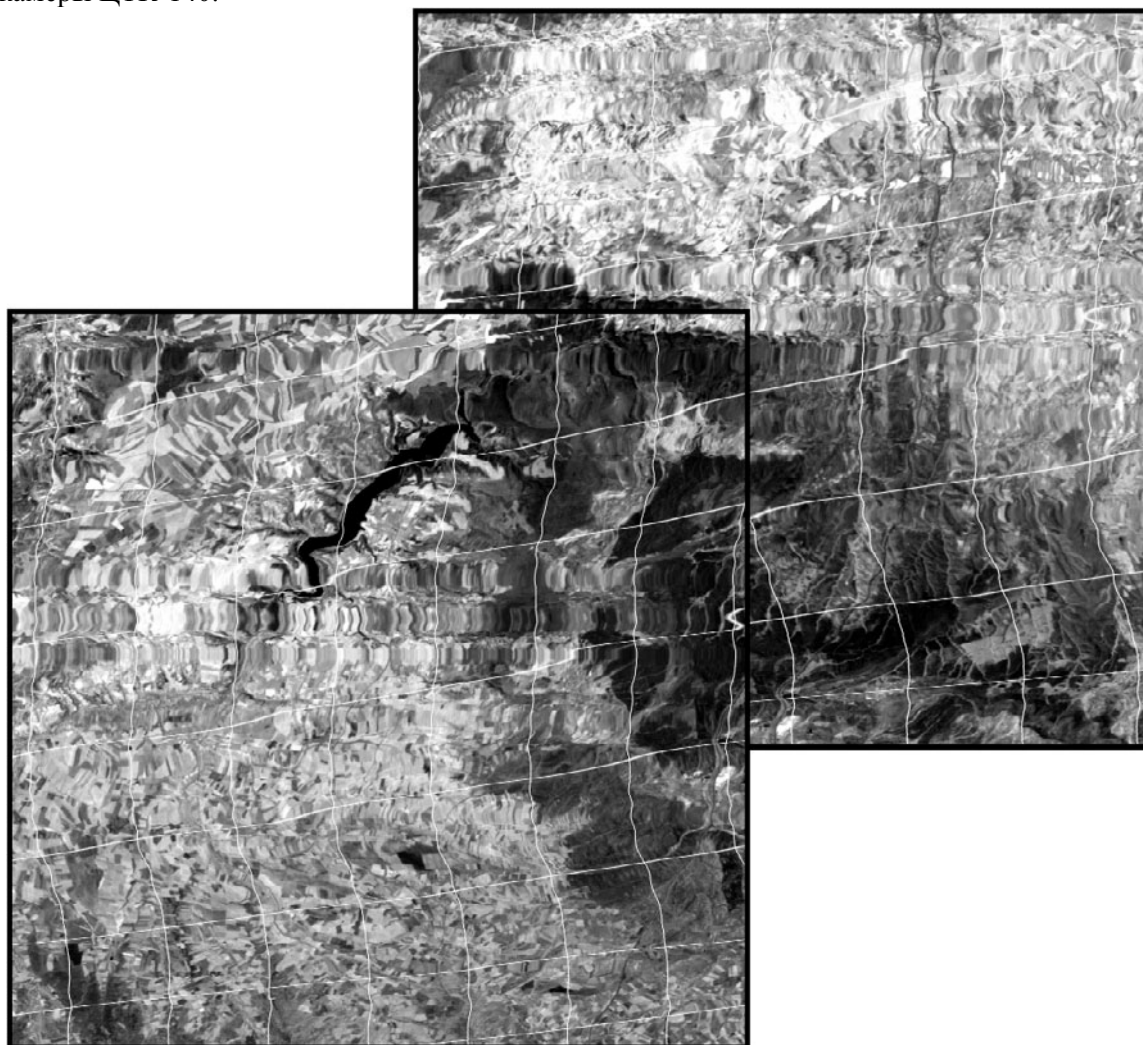


Рис.5. Фрагменты двух изображений, полученных при численном моделировании съемки соседними ПЗС-линейками центральной триады цифровой аэрокамеры ЦТК-140.

Для отработки алгоритма автоматической коррекции геометрических искажений изображений, вызываемых угловыми колебаниями носителя по крену, в результате численного моделирования процесса съемки был сгенерирован набор тестовых изображений. При этом закон изменения угла крена задавался амплитудными и частотными параметрами (A_{11} , A_{12} , ω_{11} , ω_{12} , ω_{13}) аналитической зависимости вида:

$$\varphi(t) = A_{11} \cdot \sin(\omega_{11}t) + A_{12} \cdot \sin(\omega_{12}t) \cdot \sin(\omega_{13}t)$$

Предполагалось прямолинейное равномерное перемещение самолета по траектории, задаваемое зависимостью $X(t) = V \cdot t$, а остальные линейные и угловые ЭВО предполагались неизменными. Использование модельных изображений позволило отработать алгоритмы и ПО коррекции и провести оценку точности получаемых результатов².

² См. статью "Коррекция геометрических искажений видеоданных с цифровых авиационных камер, вызываемых угловыми колебаниями носителя по крену", опубликованную в настоящем сборнике.

Выводы

Предлагаемая методика обработки алгоритмов геометрической коррекции с использованием численного моделирования процесса съемки позволяет существенно сократить объем натурных экспериментов и тестировать поведение подлежащих обработке алгоритмов в разнообразных, зачастую труднодостижимых, условиях. Кроме того, использование предлагаемой методики позволят выполнять оценку точности скорректированных изображений. Это приводит к сокращению времени и затрат на обработку алгоритмов геометрической коррекции и позволяет повысить их надежность и точность.

Литература

1. *Hinsken L., Miller S., Tempelmann U., Uebbing R., Walker S.* Triangulation of LH Systems' ADS40 imagery using ORIMA GPS/IMU / International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, Vol.34, Part 3A, Graz, Austria, P.156-162.
2. *Poli D.* Indirect georeferencing of airborne multi-line array sensors: a simulated case study / International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, Vol.34, Part 3A, Graz, Austria, P.246-251.
3. *Sandau R., Braunecker B., Driescher H., Eckardt A., Hilbert S., Hutton J., Kirchhofer W., Lithopoulos E., Reulke R., Wicki S.* Design principles of the LH Systems ADS40 airborne digital sensor / International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, Vol.33, Part B1, Amsterdam, P.258-265.
4. *Gruen A., Zhang L.* Sensor modeling for aerial mobile mapping with Three-Line-Scanner (TLS) imagery / International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and SIS, 2002, Vol.34, Part 2, P.139-146.
5. *Tempelmann U., Borner A., Chaplin B., Hinsken L., Mykhalevych B., Miller S., Recke U., Reulke R., Uebbing R.* Photogrammetric software for the LH Systems ADS40 airborne digital sensor / International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, Vol.33, Part B1, Amsterdam, P.552-559.
6. *Аванесов Г.А., Зарецкая Е.В., Зиман Я.Л., Куделин М.И., Полянский И.В., Фори А.А.* Внедрение цифровых космических технологий дистанционного зондирования в практику аэросъемки / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сборник научных статей. М.: Полиграф сервис, 2004. С.228-234.
7. *Chen L.C., Rau J.Y.* Geometric correction of airborne scanner imagery using orthophotos and triangulated feature point matching // Int. J. Remote Sensing, 1993, Vol. 14, № 16, P.3041-3059.
8. *Borner A., Kirchhofer W., Michalevich B., Reulke R., Scheele M., Scheibe K., Tempelmann U.* Test results obtained with the LH Systems ADS40 airborne digital sensor // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, Vol.33, Part B1, Amsterdam, P.560-567.
9. *Василейский А.С., Железнов М.М., Зиман Я.Л., Полянский И.В.* Определение элементов фотограмметрической реконструкции изображений, получаемых цифровой аэрокамерой на линейных ПЗС // Материалы 2-й открытой всероссийской конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва 16-18 ноября 2004 г., ИКИ. С.85.