

Метод геометрической коррекции гиперспектральных изображений земной поверхности

А.А. Ильин¹, А.Н. Виноградов², В.В. Егоров³,
А.П. Калинин⁴, А.И. Родионов¹

¹ ЗАО НТЦ «Реагент»
119991 Москва, Косыгина, 4
E-mail: ilyinandrey@mail.ru

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, Москва Ленинские горы, МГУ им. М.В.Ломоносова, Физический факультет
E-mail: alexey@magn.ru

³ Институт космических исследований РАН Москва
117997 Москва, Профсоюзная, 84/32
E-mail: victor_egorov@mail.ru

⁴ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН
19526 Москва проспект Вернадского 101, корп. 1
E-mails: kalinin@ipmnet.ru,
arodionov@reagent-rdc.ru

Описан метод коррекции геометрических искажений гиперспектральных изображений земной поверхности, связанных с влиянием угловых эволюций авиационного носителя. Он был разработан применительно к щелевым гиперспектрометрам (типа pushbroom), осуществляющим сканирование узкой полосой области обзора. Коррекция изображений основана на использовании дополнительных данных, получаемых видеокамерой, работа которой синхронизирована с гиперспектральной съемкой. Разработан алгоритм коррекции изображений, предусматривающий определение смещения и поворота каждого последующего относительно предыдущего кадра изображения; построение траектории движения авианосителя; попиксельное исправление гиперспектральных изображений.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, алгоритм, гиперспектрометр, авианоситель, изображение, искажение, видеокамера, эволюция авианосителя, мозаика кадров, синхронизация.

Введение

Изображения, получаемые с помощью авиационных гиперспектрометров типа (pushbroom) подвержены искажающему влиянию угловых эволюций носителя. Из-за сложной траектории движения авианосителя возникают геометрические искажения получаемых гиперспектральных изображений. Для их устранения в задачах дистанционного зондирования Земли часто используется так называемая физическая стабилизация, которая предусматривает установку на борт летательного аппарата дорогостоящей навигационной аппаратуры и гироплатформы, предназначенной для удержания оптической оси зондирующего устройства в строго вертикальном положении. Однако применение такой стабилизации имеет известные ограничения – высокая стоимость, большой вес и энергопотребление, что затрудняет ее использование в легкомоторной авиации: дельтапланы, беспилотные летательные аппараты и др. Поэтому актуальной становится разработка альтернативного подхода, основанного на методах математической коррекции гиперспектральных изображений с привлечением дополнительной измерительной аппаратуры. Такой подход, по нашему мнению, является менее дорогостоящим и более подходящим для применения на легких летательных аппаратах.

Цель настоящей работы состоит в разработке и апробации метода математической коррекции геометрических искажений гиперспектральных изображений, базирующийся на привлечении данных синхронной видеосъемки.

Алгоритм геометрической коррекции

Опишем процесс обработки совместных измерений гиперспектрометра и видеокамеры, алгоритм, которого показан на рис. 1.

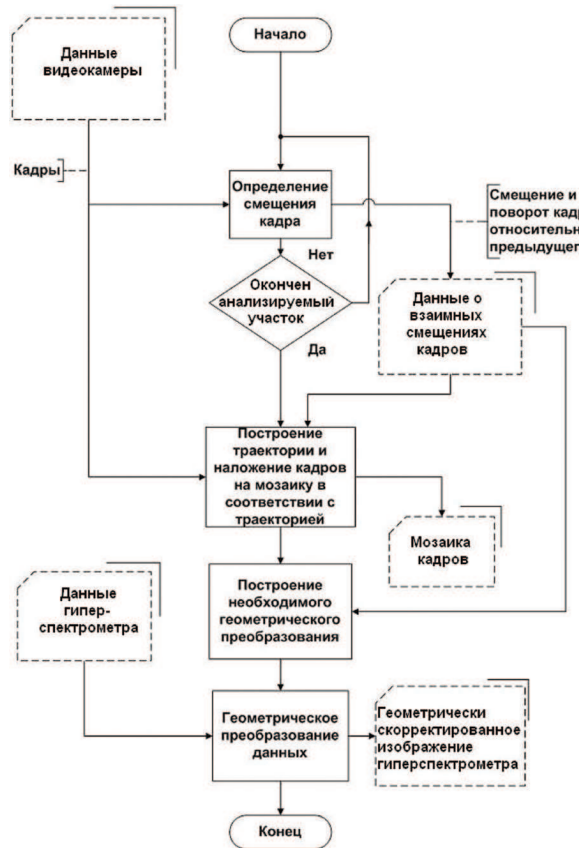


Рис. 1. Алгоритм коррекции геометрических искажений гиперспектральных изображений

На основе результатов «Данные видеокамеры» производится определение смещения и поворота каждого последующего кадра относительно предыдущего, которые помещаются в файл «Данные о взаимных смещениях кадров».

Перемещение одного кадра относительно другого имеет три степени свободы и, соответственно, определяется тремя параметрами. В качестве таких параметров в настоящей работе выбраны величины сдвигов по двум ортогональным направлениям и угол поворота относительно центра кадра. Определение этих параметров можно проводить с помощью поиска экстремума некоторого выражения (*функционала*), которое тем или иным способом вычисляет отличие изображения одного кадра относительно другого. Функционал должен зависеть от параметров, описывающих смещение одного из кадров относительно другого. При правильном совмещении изображений двух кадров функционал должен быть минимален (или максимален в зависимости от выбора функционала). При использовании настоящего подхода разработчику необходимо решить две задачи: непосредственно выбор самого функционала и выбор алгоритма его минимизации, который будет давать результат за приемлемое время счета.

Сначала остановимся на решении первой из поставленных задач – выборе функционала, вычисляющего «сходство» изображений двух кадров. Сходство изображений двух кадров формализуется в рамках задачи распознавания образов. Здесь можно использовать два метода, основанных на корреляционном анализе изображений [1].

Основные положения корреляционного метода распознавания, в котором в качестве критерия используются коэффициенты корреляции, изложены в работах [2, 3]. Метод исходит из предположения о том, что каждый образ может быть задан с помощью одного эталона так, что любое изображение, принадлежащее данному образу, получается из эталона в результате искажений, описываемых определенными статистическими закономерностями. Другими словами, при отсутствии шума все возможные изображения представляются как определенные допустимые преобразования некоторого одного стандартного изображения, называемого *эталон*. В нашем случае эталон – это изображение одного кадра, а образ – изображение другого кадра. Искажение изображения – это перемещение изображения одного кадра относительно другого и возможное изменение яркости и контраста двух соседних кадров.

Предположим, что всякое изображение можно представить функцией $I(x,y)$, характеризующей состояние чувствительных элементов (пикселей) приемной матрицы. Аргументами являются переменные x, y , определяющие положение пикселя,

$$I(x,y) = F(x,y,a_1,a_2,\dots,a_k) + r(x,y),$$

где a_1, a_2, \dots, a_k – параметры, характеризующие искажения, $r(x,y)$ – случайная функция, описывающая шум.

В нашем случае эталон всего один (первый из двух кадров), и наша задача, отыскивая максимум вероятности, определить параметры, характеризующие искажения, а именно параметры перемещения изображения. В работе [3] показано, что если плотность вероятности

шума является функцией от $\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n r^2(x,y)$, где m, n – размеры изображения, то условная

плотность вероятности появления данного изображения в результате искажения определенного эталона и вероятности соответствующих гипотез монотонно убывают по мере удаления представляющей точки от *области эталона* – множества изображений при всевозможных параметрах a_1, a_2, \dots, a_k . Все дальнейшие рассуждения справедливы только при этом условии. Для распознавания изображения $I(x,y)$ достаточно вычислить кратчайшие расстояния от этого изображения до каждой из областей эталонов и выбрать наименьшее, т. е. в нашем случае определить «ближайшее» изображение области эталона к изображению $I(x,y)$, которое называем образом:

$$d^2 = \min_i \min_{a_1, a_2, \dots, a_k} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (I(x,y) - F_i(x,y,a_1,a_2,\dots,a_k))^2.$$

В нашем случае необходимо решить задачу:

$$d^2 = \min_{\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha} \min_{a_1, a_2} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (I(x,y) - F(x,y,\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha, a_1, a_2))^2, \quad (1)$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha$ – параметры сдвига и поворота одного кадра относительно другого, a_1, a_2 – параметры, описывающие яркость и контраст изображения.

Физика изменения яркости и контраста двух последующих кадров в основном определяется работой электроники цифровой видеокамеры. Это изменение можно описать формулой:

$$\tilde{I}(x,y) = a_1 I(x,y) + a_2.$$

Здесь $I(x,y)$ – исходное изображение, $\tilde{I}(x,y)$ – то же изображение, но с другими яркостью и контрастом. В соответствие с этой моделью

$$F(x,y,\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha, a_1, a_2) = a_1 F(x,y,\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha) + a_2,$$

и задача на минимум (1) переходит в более простую задачу на максимум

$$\max_{\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha} \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (I(x, y) - \bar{I}) \cdot (F(x, y, \Delta x, \Delta y, \Delta \alpha) - \bar{F}(\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha))}{\sqrt{\left(\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (I(x, y) - \bar{I})^2 \right) \cdot \left(\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (F(x, y, \Delta x, \Delta y, \Delta \alpha) - \bar{F}(\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha))^2 \right)}} \quad (2)$$

где $\bar{F}(\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha) = \frac{1}{nm} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y, \Delta x, \Delta y, \Delta \alpha)$, $\bar{I} = \frac{1}{nm} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n I(x, y)$

Задача (2) является задачей поиска максимума корреляции двух соседних кадров и решается численно.

Теперь остановимся проблеме вычисления экстремума выражения (2). В данном случае необходимо определить глобальный экстремум функции трех переменных. Использование для этой цели метода полного перебора дискретных значений переменных приводит к неприемлемо большим временам машинного счета. Использование градиентных методов поиска экстремума [4] также затруднительно вследствие возможного наличия локальных экстремумов. Для отыскания эффективного решения поставленной задачи следует учесть, что в данном случае идет поиск параметров движения в плоскости. Причем, это движение малое, поскольку анализируются два соседних кадра. При малых смещениях Δx , Δy и малом повороте $\Delta \alpha$ одного кадра относительно другого изображение можно разбить на четыре области (рис. 2) и определять только их сдвиги Δx_k , Δy_k . Эти величины находятся с помощью численного решения задачи (2) методом полного перебора различных значений Δx_k , Δy_k .

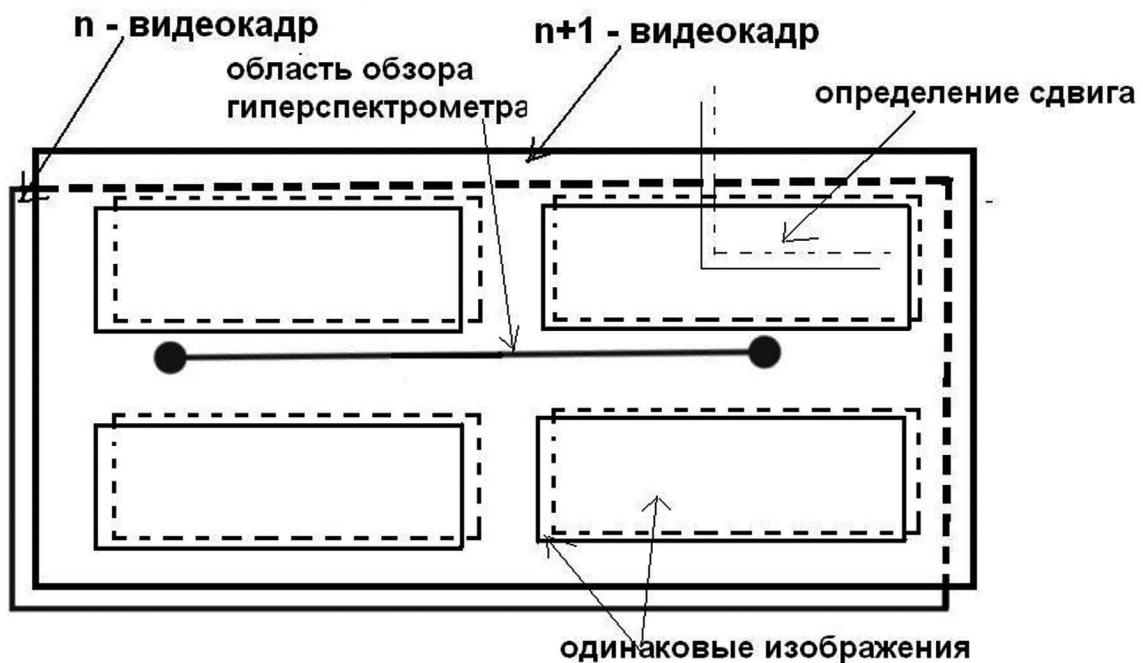


Рис. 2. Рисунок, поясняющий определение сдвига и поворота видеокадров

Эта задача решается на современных ПК за вполне приемлемое время, поскольку отыскивается несколько экстремумов функции только двух переменных. После этого, анализируя распределение таких сдвигов на изображении, вычисляется угол поворота $\Delta \alpha$ и окончательные величины сдвигов Δx , Δy .

Вышеописанным способом попарно анализируются все кадры цифровой видеосъемки. Для каждой пары вычисляются описанные выше величины Δx_i , Δy_i , $\Delta \alpha_i$, i – номер кадра. Далее вычисляется положение и ориентация кадра относительно заданной системы координат с помощью рекуррентных соотношений:

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x'_i, \quad y_{i+1} = y_i + \Delta y'_i, \quad \alpha_{i+1} = \alpha_i + \Delta \alpha_i,$$

где

$$\begin{pmatrix} \Delta x'_i \\ \Delta y'_i \end{pmatrix} = \mathbf{A}_i \begin{pmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_i = \begin{pmatrix} \cos \alpha_i & \sin \alpha_i \\ -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{pmatrix}.$$

Величины x_0 , y_0 , α_0 задают систему координат. В простейшем случае ее можно задавать относительно первого кадра видеокамеры для выбранного участка зондируемой поверхности. После определения смещений соседних кадров видеокамеры необходимо осуществить «Построение траектории и наложение кадров на мозаику в соответствии с траекторией». Последовательность положений кадров (их центров) и является искомой траекторией движения области обзора видеокамеры (рис.3).

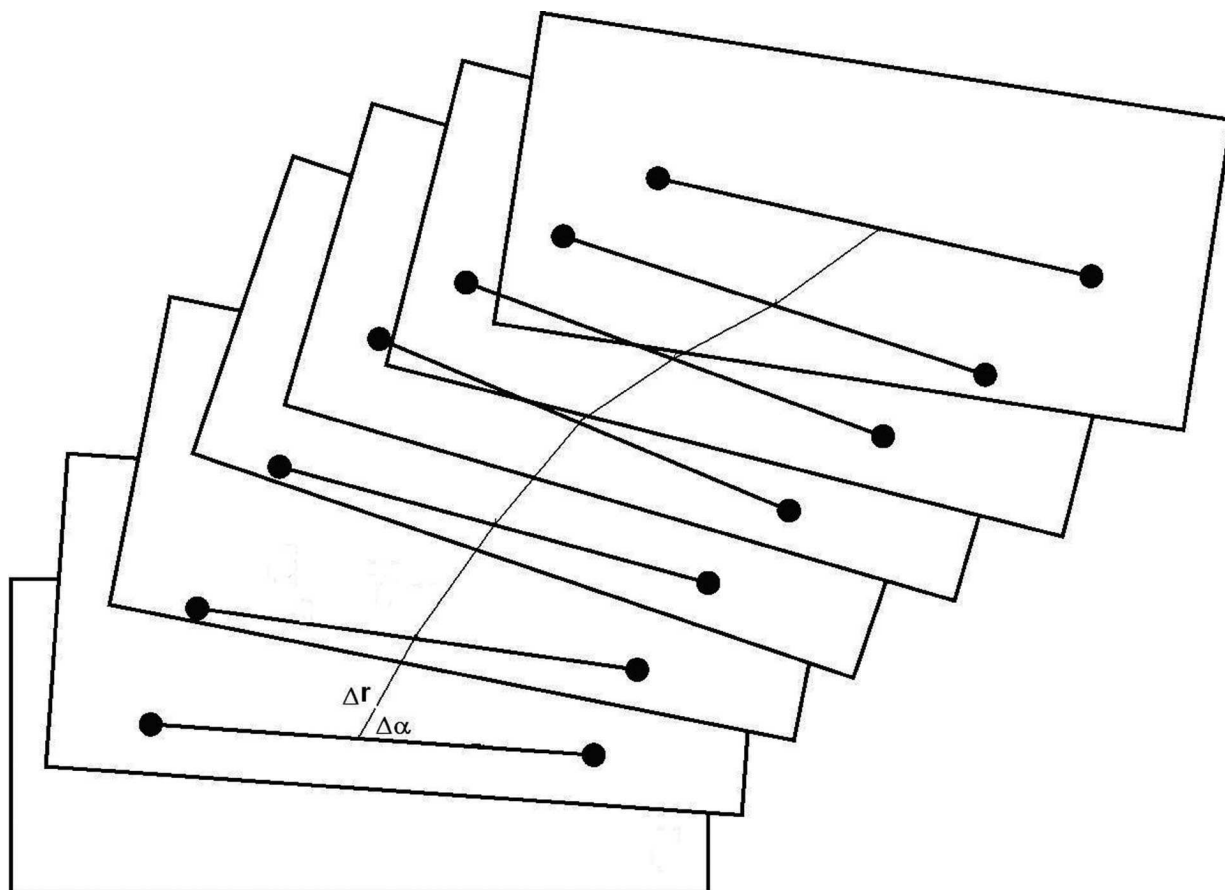


Рис. 3. Рисунок, поясняющий построение траектории полета авианосителя

После того как вычислены положение и ориентация каждого кадра относительно заданной системы координат, можно последовательно «положить» эти кадры на одно большое изображение зондируемой поверхности с учетом их положения – построить так называемую мозаику зондируемой поверхности. Матрица \mathbf{A}_i в этом случае используется для расчета поворота i -го кадра, относительно системы координат.

Построенную мозаику удобно использовать для контроля правильности полученной траектории области обзора вдоль зондируемой поверхности. Если одно взаимное смещение двух кадров определено неправильно, то сформированная карта будет иметь дефект, который сразу «бросается в глаза». Если же мозаика построена правильно, тогда мы полагаем, что траектория движения области обзора вычислена верно.

Положение щели гиперспектрометра относительно области обзора видеокамеры известно. Это позволяет вычислить положение линии обзора гиперспектрометра на мозаике снимков для каждого кадра. Последовательность точек положения двух концов щели гиперспектрометра задает траекторию движения области обзора гиперспектрометра.

Зная траекторию щели гиперспектрометра, можно провести геометрическую коррекцию гиперспектральных данных. Эта коррекция заключается в том, что измерения гиперспектрометра также укладываются в гиперкуб, пространственные координаты которого задаются в той же системе координат, что и координаты мозаики снимков. Данные сканирующего сенсора преобразуются с помощью найденного геометрического преобразования данных, в результате чего создается «Геометрически скорректированное изображение сканирующего сенсора». Рис.4 поясняет процедуру перестроения исходного гиперспектрального изображения в исправленное.

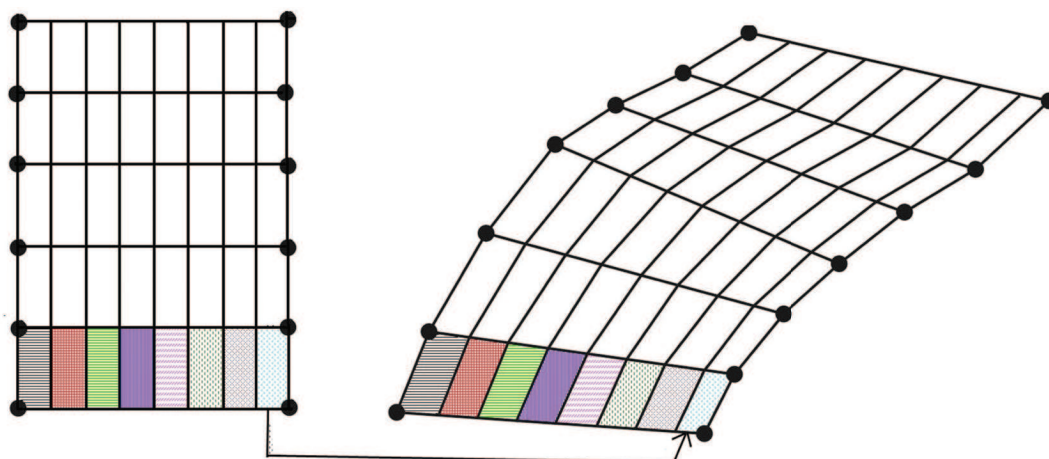


Рис. 4. Перестроение исходного гиперспектрального изображения в исправленное

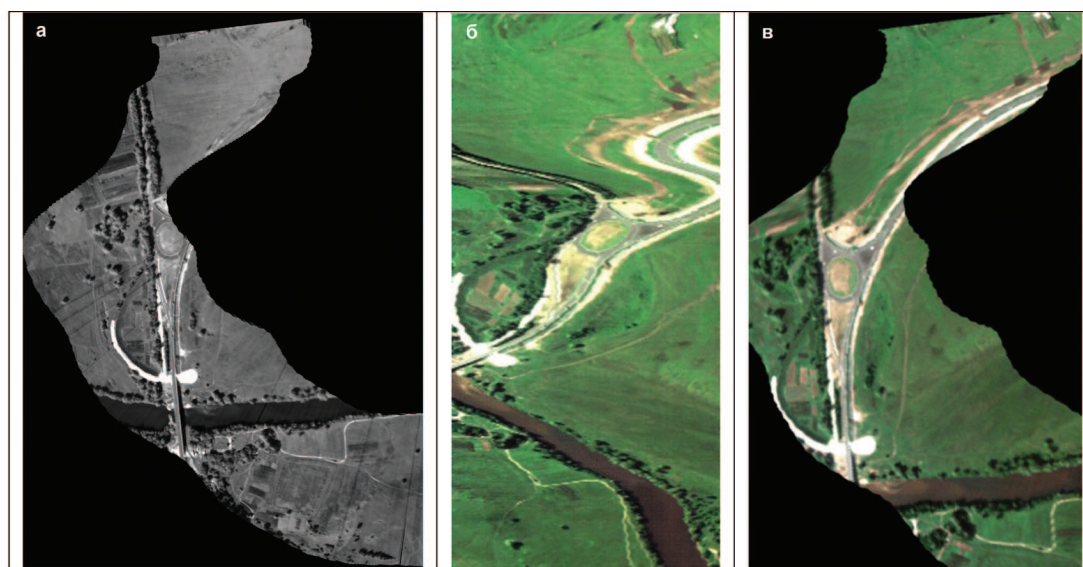


Рис. 5. Демонстрация исправления гиперспектрального изображения: а – мозаика, полученная видеокамерой; б – исходное гиперспектральное изображение; в – исправленное гиперспектральное изображение

В результате такого перестроения создается «Геометрически скорректированное гиперспектральное изображение».

Демонстрация результатов коррекции гиперспектрального изображения

Рис. 5 иллюстрирует работу метода устранения геометрических искажений изображений, получаемых гиперспектрометром дистанционного зондирования, связанных со сложной траекторией движения носителя сенсора. На рис. 5а показан пример мозаики, полученный видеокамерой. На рис. 5б приводится изображение, полученное путем обработки первичных данных со гиперспектрометра, искаженное вследствие маневров летательного аппарата. Результаты устранения геометрических искажений целевого сенсора представлены на рис. 5в.

Выводы

1. Угловые эволюции летательного аппарата могут приводить к значительным геометрическим искажениям гиперспектральных изображений, получаемых приборами типа pushbroom.
2. Использование синхронной с гиперспектрометром съемки видеокамерой и разработанного в данной работе алгоритма коррекции позволяют исправить исходное гиперспектральное изображение.
3. Натурные эксперименты продемонстрировали эффективность разработанного метода коррекции.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям.

Литература

1. *Васильев В.И.* Распознающие системы. Справочник. Киев: Наукова думка. 1969. 292 с.
2. *Ковалевский В.А.* О корреляционном методе распознавания. В сб. «Читающие автоматы». Киев. «Наукова думка». 1965.
3. *Ковалевский В.А.* Корреляционный метод распознавания изображений. ЖВМиМФ, 1962.
4. *Васильев Ф.П.* Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980.

Geometrical correction method of terrain surface for hyperspectral images

A.A. Ilyin¹, A.N. Vinogradov², V.V. Egorov³, A.P. Kalinin⁴, A.I. Rodionov¹

¹ *Stock Company, Reagent Scientific Engineering Centre
119991 Moscow, 4 Kosygin
E-mail: ilyinandrey@mail.ru*

² *M.V. Lomonosov Moscow state university
119991 Moscow, Leninskie Gory
E-mail: alexey@magn.ru*

³ *Space Research Institute of Russian Academy of Sciences,
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.
E-mail: victor_egorov@mail.ru*

⁴ *Ishlinsky Institute of Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences,
119526 Moscow, 100-1 Vernadskogo Pr.
E-mails: kalinin@ipmnet.ru;
arodionov@reagent-rdc.ru*

The technique for removal of aircraft dynamic influence on the terrain images obtained by means of pushbroom hyperspectrometer. The image correction is based on the additional data using that is obtained by video camera synchronous with the hyperspectral survey. The algorithm of image correction anticipates determination of bias and angular rotation for each subsequent frame respectively previous image; composition of aircraft trajectory; pixel by pixel correction of hyperspectral image.

Keywords: remote sensing, algorithm, hyperspectrometer, aviacarrier, image, distortion, video camera, correlation, synchronization.