

НОРМАЛИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТ ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

Гектин Ю.М., к.т.н., ОАО «Российские космические системы», г. Москва
Еремеев В.В., д.т.н., директор НИИ «Фотон» РГРТУ, г. Рязань, e-mail: foton@rsreu.ru
Егошкин Н.А., к.т.н., с.н.с. НИИ «Фотон», РГРТУ, г. Рязань, e-mail: foton@rsreu.ru
Зенин В.А., м.н.с. НИИ «Фотон», РГРТУ, г. Рязань
Москатинов И.В., начальник центра ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», г. Москва

Ключевые слова: радиометрическая коррекция, нормализация изображений, геодезическая привязка.

Введение

Геостационарные спутники ориентированы на периодическое (через каждые 5-30 минут) получение изображений всего диска Земли на фоне окружающего космоса, они «зависают» в плоскости экватора над фиксированной точкой Земли и наблюдают один и тот же участок земного диска. В настоящее время требования к детальности изображений (пространственное разрешение порядка 1 км) могут быть достигнуты только с помощью видеодатчиков, которые формируют изображения отдельными частями (сканами). Последние формируются либо одновременно несколькими приборами с зарядовой связью (ПЗС-линейками), либо последовательно одной ПЗС-линейкой. Изображения от «скановых» датчиков в непосредственном виде не пригодны для использования, им свойственны специфические искажения изображений, связанные с различными геометрическими и радиометрическими характеристиками сканов. Необходимо выполнить нормализацию изображений, геодезическую привязку и трансформирование в принятую во всём мире нормализованную геостационарную проекцию. Ниже рассматривается решение этих задач.

Геометрическая нормализация

Геометрическая нормализация состоит в формировании из исходного изображения нового с известными геометрическими характеристиками и представленного в заданной картографической проекции. Основу геометрической нормализации составляют математические модели процесса съёмки. Сканирующие датчики типа МСУ-ГС (разработчик – ОАО «Российские космические системы») включают несколько ПЗС-линеек и подвижное зеркало, осуществляющее развертку изображений.

Рассмотрим произвольную ПЗС-линейку датчика. Введем приборную систему координат (ПСК) так, чтобы её центр совпадал с фокусом O объектива, а ось Z – с оптической осью. Тогда направляющий вектор визирующего луча, падающего на зеркало, для n -го элемента линейки определится как

$$\mathbf{p}_n = -\left(x_0 + n\Delta_x, y_0 + n\Delta_y, f\right)^T, \quad (1)$$

где f – фокусное расстояние объектива, x_0, y_0 – координаты центрального элемента ПЗС-линейки, (Δ_x, Δ_y) – вектор, направленный в фокальной плоскости вдоль ПЗС-линейки.

Рассматриваются модели и алгоритмы геометрической и радиометрической нормализации изображений от геостационарных космических систем. Исследованы алгоритмы уточнения геодезической привязки изображений с использованием контурных точек диска Земли и электронных карт. Выполнена практическая апробация алгоритмов на снимках от космического аппарата «Электро-Л».

Направляющий вектор \mathbf{r} отраженного от зеркала визирующего луча определяется из векторного уравнения как

$$\mathbf{r} = \mathbf{p} - 2(\mathbf{p}, \mathbf{n}) \mathbf{n}, \quad (2)$$

где $\mathbf{n} = (\cos \alpha, -\sin \beta \sin \alpha, \cos \beta \sin \alpha)^T$ – единичный вектор нормали к плоскости сканирующего зеркала в ПСК, определенный парой углов α, β . Углы α, β являются функциями номера строки m , которые либо задаются при проектировании привода развертки, либо непосредственно измеряются для каждой строки специальными датчиками.

Найдём координаты визирующего луча в гринвичской системе координат (ГСК):

$$\mathbf{r}_g = \mathbf{M}_g(t_m) \mathbf{M}_y \mathbf{r}, \quad t_m = t_0 + \Delta t m, \quad (3)$$

где \mathbf{M}_y – матрица установочных углов датчика; $\mathbf{M}_g(t)$ – зависящая от времени матрица ориентации КА относительно ГСК, измеряемая навигационными средствами; t_0, t_m – соответственно время формирования первой и m -й строк; Δt – период опроса ПЗС-линейки.

После этого решается задача пересечения параметрически заданной прямой $\mathbf{P}(l) = \mathbf{R} + l \mathbf{r}_g$ с земным эллипсоидом $X^2/a_3^2 + Y^2/a_3^2 + Z^2/b_3^2 = 1$,

$$\text{где } \mathbf{R} = (X_0, Y_0, Z_0) \text{ – вектор положения спутника в}$$

момент времени t_m по данным навигационных средств, a_3 и b_3 – экваториальный и полярный радиусы земного эллипсоида. В результате находятся координаты точки земной поверхности $\mathbf{P}_3 = (X_3, Y_3, Z_3)^T$.

Далее для точки с гринвичскими координатами (X_3, Y_3, Z_3) определяются географические координаты (λ, φ) :

$$\lambda = \arctg(Y_3 / X_3), \quad \varphi = \arctg(Z_3 \frac{a_3^2}{b_3^2} / \sqrt{X_3^2 + Y_3^2}). \quad (5)$$

После этого по формулам, описывающим нормализованную геостационарную проекцию, находятся соответствующие (λ, φ) координаты (x, y) точки нормализованного изображения.

С использованием (1)-(5) осуществляется синтез из исходного изображения $B(m, n)$, полученного от съёмочной системы, нового изображения $D(x, y)$, представленного в

нормализованной геостационарной проекции с заданным размером пикселя. Обозначим полученные в (1)-(5) математические соотношения между (x, y) и (m, n) как $x = F(m, n)$, $y = G(m, n)$.

Тогда формирование изображения $D(x, y)$ может осуществляться по обратному закону [1] с использованием скоростных процедур численного обращения функций F, G . Соответствующие алгоритмы универсальны, однако они не учитывают ряд особенностей изображений, имеющих скановую структуру.

Во-первых, изображение $B(m, n)$ состоит из нескольких частей (сканов), имеющих небольшие перекрытия. Математически это выражается в том, что F, G не имеют однозначных обратных функций, т.е. некоторым (x, y) могут соответствовать несколько пар (m_i, n_i) . В этом случае наилучшее качество коррекции обеспечивается при взвешенном суммировании информации от нескольких сканов:

$$D(x, y) = \sum_{i, w_i > 0} w_i B(m_i, n_i) / \sum_{i, w_i > 0} w_i, \quad w_i = 1 - 2|n_i / N|, \quad (7)$$

где веса w_i убывают до нуля по мере приближения n_i к краям ПЗС-линейки, состоящей из N элементов.

Во-вторых, если ПЗС-линейка составная (включает несколько отдельных субпиксельно сдвинутых на μ ПЗС-линеек), то необходимо выполнить объединение информации с тем, чтобы повысить радиометрическое качество и пространственное разрешение. Для этого достаточно при расчёте весов учитывать расстояния пикселей до ближайших узлов дискретизации:

$$D(x, y) = \sum_{i, v_i > 0, w_i > 0} v_i w_i B(m_i, n_i^*) / \sum_{i, v_i > 0, w_i > 0} v_i w_i, \quad n_i^* = \text{ent}(n_i + 0,5), \quad v_i = 1 - |n_i - n_i^*| / \mu. \quad (8)$$

Основная сложность здесь состоит в определении для точки (x, y) нескольких прообразов (m_i, n_i) . Алгоритмы из [1] позволяют это сделать, однако требуют значительного количества памяти. Предложенные в [2] алгоритмы позволяют находить взвешенные суммы (8) более эффективно.

Геодезическая привязка снимков по диску Земли и электронным картам

В работе [3] рассмотрена технология геодезической привязки изображений от геостационарных спутников по контурным точкам диска Земли. Она основана на сегментации земного диска, контрастно отображающегося на фоне космоса. В процессе летных испытаний КА «Электро-Л» ряд положений, положенных в основу этих алгоритмов, пришлось пересмотреть. Так, из-за низкого радиометрического качества изображений пришлось отказаться от обработки исходных изображений. Обработка выполняется после трансформации изображения в специальную плоскость, при этом за счёт комплексирования информации от нескольких ПЗС-линеек радиометрическое качество изображений повышается. Однако даже после этого сегментация изображений на диск и космос оказалась затруднительной. Поэтому для поиска контурных точек диска Земли предложено использовать корреляционно-экстремальный алгоритм с использованием так называемых бинарных масок.

Вначале выполняется трансформация изображения в плоскость, в которой краевые точки диска Земли образуют эллипс. Чтобы найти такую плоскость, запишем условие прохождения визирующего луча датчика по

касательной к поверхности земного эллипсоида (4):

$$(\mathbf{N}, \mathbf{L}) = 0, \quad \mathbf{L} = (X - X_0, Y - Y_0, Z - Z_0)^T,$$

$$\mathbf{N} = (X / a_3^2, Y / a_3^2, Z / b_3^2)^T, \quad (9)$$

где \mathbf{L} – направляющий вектор визирующего луча, \mathbf{N} – вектор нормали к эллипсоиду (4), (X, Y, Z) – координаты точки Земли. После преобразований (9) получим

$$XX_0 / a_3^2 + YY_0 / a_3^2 + ZZ_0 / b_3^2 - 1 = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) определяет плоскость с задающим вектором

$$\mathbf{S} = (X_0, Y_0, Z_0 a_3^2 / b_3^2) / \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2 a_3^4 / b_3^4}.$$

Поскольку эллипсоид и любая плоскость пересекаются по эллипсу, то контурные точки изображения диска Земли находятся на эллипсе в плоскости (10).

Введём в рассмотрение вспомогательную плоскость, проходящую через точку $(0, 0, 0)$ параллельно плоскости (10):

$$XX_0 + YY_0 + ZZ_0 a_3^2 / b_3^2 = 0. \quad (11)$$

Перенесём эллипс из плоскости (10) в плоскость (11) путём проецирования из центра (X_0, Y_0, Z_0) . Анализируя (9)-(11), можно установить, что образ эллипса в плоскости (11) – также эллипс с центром $(0, 0, 0)$ и полуосями

$$a = a_3 \sqrt{\frac{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2}{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2 - a_3^2 b_3^2}}, \quad b = \sqrt{\frac{X_0^2 b_3^4 + Y_0^2 b_3^4 + Z_0^2 a_3^4}{X_0^2 b_3^2 + Y_0^2 b_3^2 + Z_0^2 a_3^2 - a_3^2 b_3^2}}. \quad (12)$$

Из соображений симметрии можно показать, что большая полуось этого эллипса направлена по вектору $\mathbf{A} = (-Y_0, X_0, 0) / \sqrt{X_0^2 + Y_0^2}$, а малая полуось перпендикулярна к ней и направлена по вектору $\mathbf{B} = \mathbf{S} \times \mathbf{A}$.

Введём систему координат X', Y', Z' так, чтобы её оси были направлены вдоль векторов \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{S} соответственно, а центр располагался в плоскости (11) в центре эллипса. В этой системе эллипс описывается уравнением $(X')^2 / a^2 + (Y')^2 / b^2 = 1$.

Таким образом, в идеальном случае (при отсутствии искажений) краевые точки диска Земли в системе координат X', Y' образуют эллипс (13) с известными параметрами (12). На основе анализа отклонения от эллипса (12) реальной геометрической фигуры контура диска оцениваются параметры геодезической привязки.

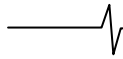
Необходимые для трансформации функции координатного соответствия между (m, n) и (X', Y') определим следующим образом. Вначале для точки (m, n) по (1)-(3) найдём вектор \mathbf{r}_e . Затем \mathbf{r}_e и \mathbf{R} пересчитываются в систему координат X', Y', Z' :

$$\mathbf{r}' = \mathbf{M}' \mathbf{r}_e, \quad \mathbf{R}' = \mathbf{M}' \mathbf{R}, \quad \mathbf{M} = [A|B|C]^T. \quad (14)$$

После этого искомые плоскостные координаты (X', Y') образа краевой точки во вспомогательной плоскости определяются как

$$X' = R'_x - R'_z r'_x / r'_z, \quad Y' = R'_y - R'_z r'_y / r'_z. \quad (15)$$

За счёт трансформации изображения во вспомогательную плоскость устраняются разрывы изображения из-за его



скановой структуры и повышается качество благодаря комплексированию данных от нескольких ПЗС-линеек. Это приводит к повышению точности и надёжности определения координат контурных точек диска Земли по сравнению с использованием исходных изображений [3].

Далее определяется набор контурных точек диска Земли. Вначале эталонный эллипс (13) разделяется на K секторов, для которых формируются эталонные фрагменты E_i , $i=1, K$, в которых -1 и $+1$ соответствует частям космоса и Земли, примыкающих к границе эллипса (13):

$$E_i(x, y) = \begin{cases} +1, & (x, y) \in \Theta(a - \Delta, a) \cap S_i, \\ -1, & (x, y) \in \Theta(a, a + \Delta) \cap S_i, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{где } \Theta(\theta_n, \theta_s) = \left\{ (x, y) : \theta_n^2 < x^2 + y^2 \frac{a^2}{b^2} \leq \theta_s^2 \right\},$$

$$S_i = \left\{ (x, y) : \frac{2\pi i}{K} < \arctg \frac{y}{x} < 2\pi \frac{i+1}{K} \right\}.$$

Далее осуществляется корреляционно-экстремальный поиск эталонных фрагментов E_i , при этом центры зон поиска имеют координаты

$$P_i = \left(-a \cos 2\pi \frac{i+0.5}{K}, -b \sin 2\pi \frac{i+0.5}{K} \right), \quad i = \overline{1, K}. \text{ Поскольку}$$

эталонные фрагменты бинарные, то вычисление коэффициента корреляции (КК) требует только операций сложения и вычитания. Кроме того, изменение КК при смещениях E_i по зоне поиска связано только с граничными точками области нулей и единиц на E_i , что также кардинально сокращает объём вычислений. В результате формируется набор фактических координат Q_i , $i = \overline{1, K}$.

По координатам P_i и Q_i , $i = \overline{1, K}$, рассчитывается смещение центра наблюдаемого эллипса по отношению к эталону как взвешенная сумма поправок:

$$\Delta x = \sum_i (P_{ix} - Q_{ix}) P_{ix}^2 / \sum_i P_{ix}^2, \quad \Delta y = \sum_i (P_{iy} - Q_{iy}) P_{iy}^2 / \sum_i P_{iy}^2. \quad (17)$$

При этом веса учитывают, что точность корреляционного поиска наибольшая в направлении, перпендикулярном к границе диска.

Поскольку плоскость (12) перпендикулярна прямой, соединяющей спутник и центр Земли, с использованием простых геометрических преобразований находятся поправки к углам ориентации спутника α и ω :

$$\Delta \alpha = \arctg \Delta x / |R|, \quad \Delta \omega = \arctg \Delta y / |R|. \quad (18)$$

Эти поправки вводятся в матрицу установочных углов M_y при последующей геометрической нормализации.

В ходе лётных испытаний спутника «Электро-Л» показано, что рассмотренный подход обеспечивает точность геопривязки изображений инфракрасного (ИК) диапазона порядка 2 км (при пространственном разрешении съёмки 4 км). В видимом диапазоне (ВД) использование диска Земли нецелесообразно, так как большую часть суток отображается только часть диска. В этом случае геопривязка осуществляется с использованием электронных карт [3], при этом достигается точность привязки 0,15 км. Технологи геопривязки по электронным картам не претерпели принципиальных изменений по сравнению с [3], поскольку они инвариантны к типу датчика.

Радиометрическая нормализация

В работе [4] предложены алгоритмы статистиче-

ской яркостной нормализации космических изображений, получаемых с помощью видеодатчиков, построенных на основе ПЗС. В основе алгоритмов лежит сопоставление статистических характеристик корректируемых видеоданных (корректируемого столбца) от определенного ПЗС-элемента с эталонными характеристиками. Особенностью таких алгоритмов коррекции является то, что параметры искажений в каждом столбце изображения считаются постоянными в течение всего времени съёмки.

Во время лётных испытаний космических систем «Ме-теор-М» и «Электро-Л» установлено, что параметры ПЗС-элементов могут изменяться непосредственно во время формирования изображения. Это явление аналогично изменению чувствительности человеческого глаза при изменении яркости наблюдаемой сцены. Так как изображение поверхности Земли представляет собой случайный сигнал, то описать изменения искажений во времени аналитически не представляется возможным. Ниже представлено развитие алгоритмов, изложенных в работах [4, 5].

Проведён анализ нескольких полиномиальных моделей времязависимых структурных искажений.

Мультипликативная модель. Определение параметров искажений выполняется по МНК из условия

$$R_n = \sum_{m=1}^M \sum_{i=-S}^S [B_{mn} P_n(m) - B_{m,n+i}]^2 = \min, \quad \text{где } B_{mn} - \text{элементы}$$

изображения, $P_n(m)$ – искомый полином, отражающий изменение чувствительности вдоль строки. В данном случае коррекция времязависимых структурных искажений выполняется по формуле

$$D_{mn} = P_n(m) B_{mn}, \quad m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}.$$

Аддитивная модель.

Оценка параметров искажений осуществляет по МНК:

$$R_n = \sum_{m=1}^M \sum_{i=-S}^S [B_{mn} + P_n(m) - B_{m,n+i}]^2 = \min.$$

Найденные коэффициенты полинома позволяют корректировать изображение по формуле

$$D_{mn} = P_n(m) + B_{mn}, \quad m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}.$$

Полиномиальные модели обладают математической строгостью. Экспериментально подтверждено, что реальные искажения можно описать только полиномами высоких степеней. Это неизбежно приводит к нарастающему числу ошибок. Более высокую точность имеют кусочно-линейные модели, согласно которым корректируемый элемент изображения сопоставляется с данными от окружающей апертуры из $2S+1$ столбцов и $2V+1$ строк.

Кусочно-линейная мультипликативная модель.

Корректирующий коэффициент для каждого элемента изображения определяется как

$$k_{nm} = \frac{1}{2S+1} \sum_{q=-S}^S \sqrt{\mu_q / \mu_0}, \quad (19)$$

где μ_q – значение автоковариационной функции (АКФ), найденное по столбцу с номером q .

Кусочно-линейная аддитивная модель. Для корректируемого столбца апертуры и для всей апертуры, состоящей из $2S+1$ соседних столбцов, формируются эмпирические функции распределения кодов яркости $F_0(b)$ и $F(b)$. Для них в табличной форме вычисляются обратные функции

$F_{0p}(b) \rightarrow b_{0p}$ и $F_p(b) \rightarrow b_p$, где $F_{0p}(b) = F_p(b) = p / (P+1)$, $p = \overline{1, P}$. После чего формируется корректирующая добавка для центрального пикселя апертуры $\Delta_{nm} = \text{med}_{p \in \{1, P\}}(b_p - b_{0p})$. В

результате коррекция яркости выполняется как:

$$B_{nm}^* = \text{ent}(B_{nm} + \Delta_{nm} + 0,5), \quad m = \overline{1, M}, \quad n = \overline{1, N}.$$

Анализ изображений со спутника «Электро-Л» показал, что на снимках присутствуют времязависимые изменения характеристик не только отдельных фотоприемников, но и групповые искажения, относящиеся к группе столбцов. Для устранения подобных искажений предлагается адаптивный алгоритм, который корректирует исходное изображение $B(m, n)$ следующим образом:

– с использованием кусочно-линейной аддитивной модели формируется матрица поправок $H(m, n)$ при малом количестве строк в апертуре;

– по кусочно-линейной аддитивной модели находится матрица поправок $L(m, n)$ при числе строк в апертуре, в разы превышающие ширину групповых искажений;

– для каждого пикселя изображения $B(m, n)$ вычисляется значение дисперсии кодов яркости окружающих его пикселей $\sigma^2(m, n)$, а также определяется максимальная дисперсия

$$\sigma_{\max}^2 = \max(\sigma^2(m, n), m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N});$$

– окончательная коррекция изображения выполняется согласно формуле:

$$d_{nm} = b_{nm} + \frac{\sigma^2(m, n)}{\sigma_{\max}^2} H(m, n) + \left(1 - \frac{\sigma^2(m, n)}{\sigma_{\max}^2}\right) L(m, n),$$

$$m = \overline{1, M}, \quad n = \overline{1, N}.$$

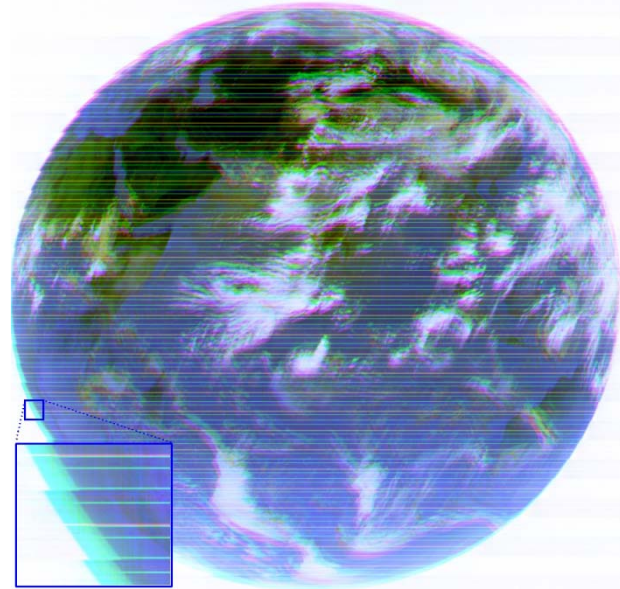
Заключение

Разработаны алгоритмы геометрической и радиометрической нормализации информации от геостационарных систем наблюдения Земли. Они прошли экспериментальную апробацию в ходе лётно-космических испытаний отечественного геостационарного спутника «Электро-Л». В результате удалось добиться выполнения высоких требований к качеству нормализованной информации при существенных искажениях в исходной. Выполненные оценки точности нормализации показали, что геометрическая нормализация выполняется с точностью до долей пикселя, а относительная радиометрическая точность составляет 0,2%.

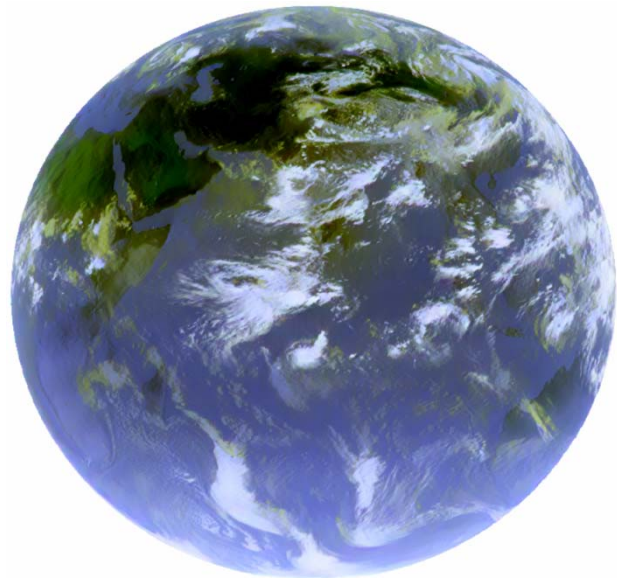
На рис. 1 показан пример радиометрической и геометрической нормализации изображения со спутника «Электро-Л» в трёх инфракрасных каналах. Сверху исходный снимок, на котором можно видеть структурный радиометрический шум в виде горизонтальной «полосатости», цветные муары из-за геометрических рассогласований между спектральными каналами и скановую структуру изображения. Снизу результат нормализации. На обработку данных одного сеанса съёмки поверхности Земли спутником «Электро-Л» в 10 спектральных каналах с общим объёмом видеoinформации 1,5 Гб затрачивается не более 5 минут при использовании сервера IBM x3850 с 4-я двудерными процессорами Intel Xeon 7120N 4x3.0GHz / 667 MHz.

Литература

1. Злобин В.К., Еремеев В.В., Обработка аэрокосмических изображений. М. Физматлит, 2006. С. 288.
2. Воронин А.А., Егоскин Н.А., Еремеев В.В., Москатиньев И.В. Геометрическая обработка данных от космических систем глобального наблюдения Земли // Вестник РГРТУ. Вып. 27, Рязань, 2010. №1. 2009. – С. 12-17.
3. Егоскин Н.А., Еремеев В.В., Козлов Е.П. Нормализация космических изображений Земли на основе их сопоставления с электронными картами // Цифровая обработка сигналов №3. 2009. – С. 21-26.



а)



б)

Рис. 1. Изображения со спутника «Электро-Л» до и после нормализации

4. Еремеев В.В., Зенин В.А. Статистические модели коррекции структурных искажений на спутниковых изображениях земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. Вып. 3. 2010. – С. 30-36.
5. Еремеев В.В., Зенин В.А. Модели коррекции динамических структурных искажений на космических изображениях // Вестник РГРТУ. Вып. 33, Рязань, 2010. С. 3-7.

NORMALIZATION OF IMAGES FROM GEOSTATIONARY SPACE EARTH OBSERVATION SYSTEM

Gektin U.M., Eremeev V.V., Egoshkin N.A., Zenin V.A., Moskatinyev I.V.

The models and algorithms for geometric and radiometric normalization of images from geostationary space systems. Investigated algorithms refine geodetic reference image with the use of contour points on the disk of the Earth and electronic cards. Carried out practical testing of the algorithms on images from the spacecraft, «Electro-L».