

УДК 004.932.2

**А.А. Воронин, Н.А. Егошкин, В.В. Еремеев, И.В. Москатиньев**

## ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОТ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГЛОБАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

*Представлены универсальные математические модели формирования и геометрической коррекции изображений от систем глобального наблюдения Земли, использующих две различные конструкции видеодатчиков: с линейной и круговой разверткой наблюдаемой сцены. Рассмотрены вопросы уточнения геодезической привязки изображений и их представление в картографических проекциях.*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, обработка изображений, геометрическая коррекция, модель съемки, геодезическая привязка, распараллеливание вычислений.

**Введение.** Глобальные системы наблюдения Земли ориентированы на периодическое (через каждые 5 – 30 минут) получение изображений всего диска Земли на фоне окружающего космоса. Существуют два вида подобных систем: геостационарные и полярно-орбитальные [1]. Геостационарные космические аппараты (КА) неподвижно «зависают» в плоскости экватора над фиксированной точкой Земли, они наблюдают один и тот же участок земного диска. Полярно-орбитальные КА движутся по орбите, что приводит к постоянному изменению наблюдаемого района.

При глобальном наблюдении съемочная аппаратура за сравнительно короткие интервалы времени должна формировать кадры целого земного диска. Поэтому развертка изображений не может осуществляться за счет движения КА даже в случае полярно-орбитальных спутников, так как их перемещение в пространстве за время формирования кадра оказывается недостаточным. Поэтому системы глобального наблюдения Земли должны иметь двухкоординатный механизм сканирования сцены.

При детальности (разрешающей способности) съемки порядка 1 км, что требуют большинство потребителей, необходимо формировать изображения в различных зонах видимого и инфракрасного спектра с размерностью 12500 × 12500 пикселей. Такие параметры в настоящее время могут быть достигнуты только с помощью датчиков сканового принципа действия, обеспечивающих развертку по двум координатам. В подобных датчиках изображения образуются по частям, называемым сканами. Последние формируются

либо одновременно несколькими приборами с зарядовой связью (ПЗС-линейками), либо последовательно одной ПЗС-линейкой с использованием двухкоординатного привода.

По характеру развертки скановые датчики можно разделить на два типа [1, 2, 3]. В датчиках первого типа реализуются два направления развертки - кадровое и строчное. Во втором случае используется круговая развертка, например за счет вращения КА или сложного движения сканирующего зеркала. В настоящей работе рассматриваются универсальные геометрические модели формирования и коррекции изображений от подобных типов датчиков.

**Геометрические модели датчиков.** Рассмотрим произвольную ПЗС-линейку. Геометрическая модель датчика ставит в соответствие каждой точке формируемого линейкой изображения с координатами  $(m, n)$  вектор визирующего луча  $\mathbf{r}(m, n)$ , соединяющий КА и сканируемую точку Земли. Введем приборную систему координат (ПСК) так, чтобы ее центр совпадал с фокусом  $O$  объектива, а ось  $Z$  с оптической осью (рисунок 1).

В ПСК положение координаты  $n$ -го чувствительного элемента ПЗС-линейки определяются как

$$x_n = x_0 + n\Delta_x, \quad y_n = y_0 + n\Delta_y, \quad z_n = f_{об}, \quad (1)$$

где  $f_{об}$  – фокусное расстояние объектива,  $x_0, y_0$  – координаты центрального элемента ПЗС - линейки,  $(\Delta_x, \Delta_y)$  – вектор, направленный в фокальной плоскости вдоль ПЗС - линейки.

Направляющий вектор луча, падающего на

зеркало (см. рисунок 1), определим как

$$\mathbf{p}_n = -(x_n, y_n, z_n)^T, \quad (2)$$

а единичный вектор  $\mathbf{n}$  нормали к плоскости сканирующего зеркала в ПСК как

$$\mathbf{n} = (\cos \alpha_m, -\sin \beta_m \sin \alpha_m, \cos \beta_m \sin \alpha_m)^T, \quad (3)$$

где  $\alpha_m, \beta_m$  – углы поворота сканирующего зеркала по двум направлениям развертки, зависящие от номера  $m$  формируемой строки.

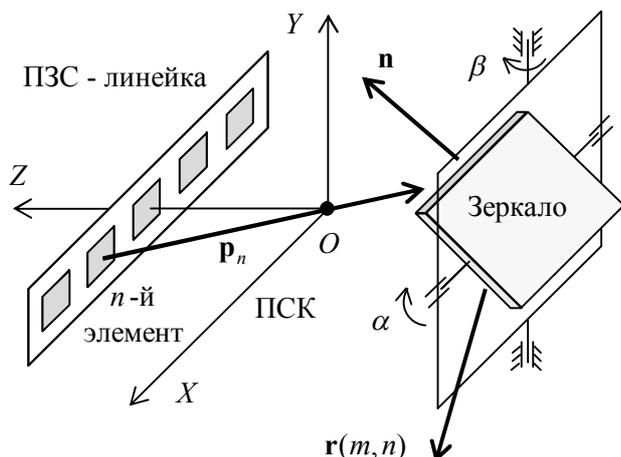


Рисунок 1 – Геометрия сканирования датчика

Для датчиков первого типа  $\alpha_m = \pi/2 + \Delta_\alpha m$ ,  $\beta_m = \Delta_\beta k$ , где  $k$  – номер скана,  $\Delta_\alpha$  и  $\Delta_\beta$  – приращения угла зеркала при переходе от строки к строке и от скана к скану. Если привод однокоординатный, то  $\Delta_\beta = 0$ .

В современных датчиках обоих типов выполняются высокоточные измерения углов  $\alpha_m$  и  $\beta_m$  в каждой строке с целью коррекции нелинейности и нестабильности развертки.

В датчиках второго типа круговая развертка может быть обеспечена за счет сложного движения сканирующего зеркала. Для его описания определим сначала координаты вектора нормали  $\mathbf{n}'$  в промежуточной системе координат:

$$\mathbf{n}' = (1, -\operatorname{tg} a \cos \omega t, \operatorname{tg} b \sin \omega t)^T, \quad (4)$$

где  $a = \gamma/2$ ,  $b = \arcsin \frac{\sin(\gamma/2)}{\cos \delta}$ ,  $\omega$  – угловая частота вращения ПЗС - линеек,  $\gamma$  – угловой радиус круга сканирования,  $\delta = \pi/4$ . После этого искомый вектор  $\mathbf{n}$  в ПСК определится как

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}'' / |\mathbf{n}''|, \quad \mathbf{n}'' = \begin{pmatrix} \mathbf{n}'_x \cos \delta - \mathbf{n}'_y \sin \delta \\ \mathbf{n}'_z \\ \mathbf{n}'_x \sin \delta + \mathbf{n}'_y \cos \delta \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Наконец, искомый направляющий вектор  $\mathbf{r}$

визирующего луча определяется из векторного уравнения, описывающего закон отражения от сканирующего зеркала:

$$\mathbf{r} = \mathbf{p} - 2(\mathbf{p} \mathbf{n}) \mathbf{n}. \quad (6)$$

Таким образом, каждой точке  $(m, n)$  формулы (1) - (6) ставят в соответствие направляющий вектор визирующего луча  $\mathbf{r}(m, n)$ .

**Модель съемки Земли.** Определим по данным измерений положения и ориентации КА координаты сканируемой точки поверхности Земли. Вначале найдем момент времени  $t$  формирования точки изображения  $(m, n)$ :

$$t = t_0 + \Delta_t m, \quad (7)$$

где  $t_0$  – время формирования первой троки,  $\Delta_t$  – период опроса линейки.

После этого для точки  $(m, n)$  определим координаты визирующего луча в визирной (ВСК)  $\mathbf{r}_e$ , а затем в абсолютной инерциальной гринвичской системе координат (ИГСК)  $\mathbf{r}_a$ :

$$\mathbf{r}_e = \mathbf{M}_y \mathbf{r}, \quad \mathbf{r}_a = \mathbf{M}_o(t) \mathbf{r}_e, \quad (8)$$

где  $\mathbf{M}_y$  – матрица установочных углов датчика, описывающая ориентацию ПСК по отношению к ВСК;  $\mathbf{M}_o(t)$  – матрица ориентации ВСК относительно ИГСК на момент времени (7). Функция времени  $\mathbf{M}_o(t)$  строится в результате фильтрации данных измерений углов ориентации ВСК от бортовых систем КА. Вращение КА вокруг оси представляется в виде изменения матрицы  $\mathbf{M}_o(t)$ .

Наземными средствами периодически измеряются координаты КА в ИГСК. В результате фильтрации определяются соответствующие временные зависимости  $\mathbf{R}_a(t) = (X_a(t), Y_a(t), Z_a(t))^T$ .

Для нахождения координат точки на поверхности Земли перейдем к гринвичской системе координат:

$$\mathbf{R}_z = \mathbf{M}_z \mathbf{R}_a(t), \quad \mathbf{r}_z = \mathbf{M}_z \mathbf{r}_a, \quad (9)$$

где

$$\mathbf{M}_z = \begin{pmatrix} \cos \xi & \sin \xi & 0 \\ -\sin \xi & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \xi = S_0 + \omega_3 (t - t_c),$$

$S_0$  – звездное время в среднюю гринвичскую полночь,  $\omega_3$  – угловая скорость вращения Земли,  $t_c$  – поправка на часовой пояс,  $t$  определяется по (7).

После этого найдем координаты пересечения луча, проходящего через конец вектора  $\mathbf{R}_z$  в направлении  $\mathbf{r}_z$ , с земным эллипсоидом из уравне-

ния

$$X^2/a_3^2 + Y^2/a_3^2 + Z^2/b_3^2 = 1, \quad (10)$$

где  $a_3$ ,  $b_3$  – экваториальный радиус и малая полуось земного эллипсоида. Для этого запишем параметрическое относительно  $l$  уравнение визирующего луча:

$$\mathbf{P}(l) = \mathbf{R}_c + l \mathbf{r}_c. \quad (11)$$

При подстановке координат (11) в (10) получим квадратное уравнение относительно  $l$ . Подставляя его наименьшее положительное решение в (11), определяем координаты точки земной поверхности  $\mathbf{P}_3 = (X_3, Y_3, Z_3)^T$ .

**Преобразование в картографическую проекцию.** Точке на поверхности Земли с гринвичскими координатами  $(X_3, Y_3, Z_3)$  соответствуют географические координаты  $(\lambda, \varphi)$ :

$$\lambda = \text{arctg}(Y_3/X_3), \quad (12)$$

$$\varphi = \text{arctg}(Z_3 \frac{a_3^2}{b_3^2} / \sqrt{X_3^2 + Y_3^2}). \quad (13)$$

В формуле (13) необходимо учитывать знаки  $X_3$  и  $Y_3$  для корректного получения значения  $\lambda$  в пределах от  $-\pi$  до  $\pi$ .

Окончательный переход от географических координат  $(\lambda, \varphi)$  к координатам плоскости скорректированного изображения осуществляется в соответствии с формулами требуемой картографической проекции.

Для представления изображений от геостационарных КА в международной практике используется нормализованная геостационарная проекция [4], которая описывает вид с виртуального спутника на идеальную Землю. Поскольку само определение проекции соответствует реальным условиям формирования изображений, то такая проекция является почти оптимальной в плане сохранения пространственного разрешения съемки при минимальной избыточности. Для полярно орбитальных систем глобального наблюдения, ориентированных на съемку арктического региона, в принципе можно использовать полярную стереографическую проекцию [4]. Однако в этом случае сохранение реального разрешения съемки требует значительной избыточности. Поэтому обобщим нормализованную геостационарную проекцию так, чтобы её можно было использовать для представления информации от любых систем глобального наблюдения Земли, а не только от геостационарных КА.

Предлагаемая «проекция виртуального спутника» описывает взаимосвязь картографических  $(x, y)$  и географических координат  $(\lambda, \varphi)$

как функцию двух параметров: координат  $\mathbf{R}_c = (X_c, Y_c, Z_c)^T$  и матрицы ориентации  $\mathbf{M}_c$  виртуального спутника относительно Земли. Координаты  $\mathbf{R}_c$  задаются близкими к реальному положению КА на момент формирования кадра  $\mathbf{R}_c \approx \mathbf{R}_c$ , что позволяет свести к минимуму потери пространственного разрешения при преобразовании изображений в картографическую проекцию.

Определим систему координат виртуального спутника как  $X'Y'Z'$ , а её ориентацию относительно гринвичской системы матрицей  $\mathbf{M}_c$ . При номинальной ориентации спутник «смотрит» на центр Земли. Ось  $X'$  направлена в центр Земли, а соответствующий орт оси  $\mathbf{X}' = -\mathbf{R}_c / |\mathbf{R}_c|$ . Ось  $Z'$  лежит в плоскости, проходящей через ось  $Z$  и виртуальный спутник. Ось  $Y'$  дополняет систему до правой. Следовательно, орты  $\mathbf{Y}' = -(\mathbf{X}' \times \mathbf{Z}) / |\mathbf{X}' \times \mathbf{Z}|$ ,  $\mathbf{Z}' = \mathbf{X}' \times \mathbf{Y}'$ . В результате  $\mathbf{X}' = -(X_c, Y_c, Z_c)^T / |\mathbf{R}_c|$ ,  $\mathbf{Y}' = (Y_c, -X_c, 0)^T / S$ ,  $\mathbf{Z}' = (-X_c Z_c, -Y_c Z_c, X_c^2 + Y_c^2)^T / (|\mathbf{R}_c| S)$ , (14) где  $S = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2}$ .

Поскольку  $\mathbf{M}_c$  переводит ортогональные векторы  $(1,0,0)^T$ ,  $(0,1,0)^T$ ,  $(0,0,1)^T$  соответственно в ортогональные векторы  $\mathbf{X}', \mathbf{Y}', \mathbf{Z}'$ , то  $\mathbf{M}_c$  ортогональна и имеет вид

$$\mathbf{M}_c = \begin{pmatrix} \mathbf{X}'_X & \mathbf{Y}'_X & \mathbf{Z}'_X \\ \mathbf{X}'_Y & \mathbf{Y}'_Y & \mathbf{Z}'_Y \\ \mathbf{X}'_Z & \mathbf{Y}'_Z & \mathbf{Z}'_Z \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Номинальная матрица ориентации (15) является функцией  $\mathbf{R}_c$  положения КА, она используется при геометрической нормализации изображений.

Переход от географических координат  $(\lambda, \varphi)$  к координатам проекции  $(x, y)$  при известных параметрах  $\mathbf{R}_c$  и  $\mathbf{M}_c$  выполняется в виде последовательности следующих действий.

1. Находятся координаты соответствующей точки  $\mathbf{P}_3$  на земной поверхности в гринвичской системе координат:

$$X_3 = \frac{a_3 \cos \varphi \cos \lambda}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}, \quad Y_3 = \frac{a_3 \cos \varphi \sin \lambda}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}},$$

$$Z_3 = \frac{a_3 (1 - e^2) \sin \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}, \quad e = \sqrt{1 - (b_3/a_3)^2}. \quad (16)$$

Эти преобразования являются обратными к (12) и (13), поэтому на практике при нормализации изображений можно опустить (12), (13) и (16).

2. Выполняется переход к системе координат виртуального спутника:

$$(X', Y', Z')^T = \mathbf{M}_c^{-1} (\mathbf{P}_3 - \mathbf{R}_c), \quad \mathbf{M}_c^{-1} = \mathbf{M}_c^T. \quad (17)$$

Последнее равенство учитывает факт ортогональности  $\mathbf{M}_c$ .

3. Осуществляется переход к углам визирования виртуального спутника:

$$x = \arctg(Y'/X'), \quad y = -\arctg(Z'/X' \cos x). \quad (18)$$

Координаты  $(x, y)$  являются искомым образом географических координат  $(\lambda, \varphi)$ .

Для перехода от координат проекции  $(x, y)$  к географическим координатам  $(\lambda, \varphi)$  сначала определяется направляющий вектор визирующего луча виртуального спутника в системе координат  $X'Y'Z'$ :

$$\mathbf{r}' = (1, \operatorname{tg} x, -\operatorname{tg} y / \cos(\operatorname{tg} x))^T, \quad (19)$$

а затем в гринвичской системе:

$$\mathbf{r} = \mathbf{M}_c \mathbf{r}'. \quad (20)$$

Дальнейший расчет выполняется по формулам (10) – (13), в которых  $\mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_c$ .

**Геометрическая обработка.** Процедура геометрической обработки связана с синтезом из исходного изображения  $B(m, n)$  от съемочной системы нового изображения  $D(x, y)$ , представленного в требуемой картографической проекции с заданным размером пикселя. Выше были получены математические соотношения, устанавливающие координатную зависимость между пикселями этих изображений, которые в общем случае можно записать как

$$x = F(m, n), \quad y = G(m, n), \quad (21)$$

где  $F, G$  – функции, определяемые соотношениями (1) – (18).

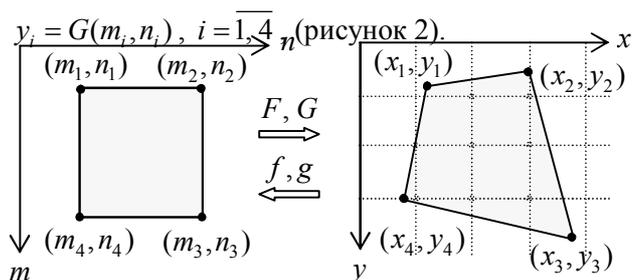
Организация геометрической обработки изображений по выражениям (1) – (18) затруднительна в силу трех причин. Во-первых, полученные соотношения достаточно сложны в вычислительном плане, что приводит к существенным временным затратам при синтезе результирующего изображения. Во-вторых, эти зависимости определяют так называемый «прямой» метод геометрических преобразований, использование которого порождает трудности, связанные с устранением появляющихся на изображении  $D$  «пустот». В третьих, изображения имеют скановую структуру; математически это выражается в том, что функции  $F$  и  $G$  в общем случае могут не иметь однозначных обратных функций.

Рассмотрим алгоритм, свободный от указанных недостатков. Он основан на идее «обратно-

го» метода геометрических преобразований [5].

Вначале исходное изображение  $B(m, n)$  разбивается на прямоугольные достаточно малые не перекрывающиеся фрагменты  $P_{ij}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j = \overline{1, J}$ , в пределах которых координатные соответствия могут быть с достаточной точностью описаны билинейными функциями. Далее, все эти фрагменты обрабатываются единообразно. Рассмотрим обработку произвольного прямоугольного фрагмента с узлами  $(m_i, n_i)$ ,  $i = \overline{1, 4}$ .

*Шаг 1.* Вычисляются  $x_i = F(m_i, n_i)$ ,



**Рисунок 2 – Геометрическая обработка фрагмента**

*Шаг 2.* В виде билинейных полиномов строятся функции  $f, g$ , обратные к функциям  $F, G$ :

$$\begin{aligned} x &= f(m, n) = \alpha_0 + \alpha_1 m + \alpha_2 n + \alpha_3 nm, \\ y &= g(m, n) = \beta_0 + \beta_1 m + \beta_2 n + \beta_3 nm. \end{aligned} \quad (22)$$

Коэффициенты  $\alpha_j, \beta_j$ ,  $j = \overline{1, 4}$ , определяются из решения двух независимых систем четырех линейных уравнений, составленных на основе (21), путем подстановки в правую и левую части координат  $(m_i, n_i)$  и  $(x_i, y_i)$ ,  $i = \overline{1, 4}$ .

*Шаг 3.* По обратным функциям  $f, g$  в плоскости  $xu$  восстанавливается фрагмент изображения в виде четырехугольника с узлами  $(x_i, y_i)$ ,  $i = \overline{1, 4}$ . При этом для каждого целочисленного узла  $(x, y)$ , попавшего в четырехугольник, по (22) определяются одноименные координаты  $(m, n)$  и путем яркостной интерполяции в плоскости  $mn$  находится искомая яркость пикселя. Поскольку вычисление значений (22) в соседних точках требует только операций сложения, то данное преобразование очень эффективно в вычислительном плане. Для организации цикла по целочисленным узлам четырехугольника произвольной формы используются методы компьютерной графики [6].

Рассмотренная организация процесса геометрической обработки изображений не зависит

от вида функций  $F$  и  $G$ , чем и достигается ее универсальность. Рассмотрим теперь особенности обработки с учетом скановой структуры изображений.

Для датчиков первого типа сканы имеют незначительное перекрытие в плоскости изображения  $D$ . Не имеет значения, по данным от какого скана будет восстановлена та или иная точка в области перекрытия. Поэтому рассмотренный алгоритм применяется независимо к изображению каждого скана.

Для датчиков второго типа взаимные перекрытия сканов могут иметь сложный характер. Например, каждая точка Земли может наблюдаться дважды в паре различных сканов, причем номера сканов сложным образом изменяются от точки к точке. Важной задачей является использование имеющейся избыточности для увеличения качества выходных изображений за счет накопления сигнала от нескольких сканов.

Для организации накопления сигнала вводится дополнительное изображение  $V$ , равное по размерам  $D$ . Вначале  $V$  и  $D$  заполняются нулями. Затем на шаге 3 рассмотренного алгоритма вместо операции присвоения  $D(m, n) := b$  интерполированного кода яркости  $b$  соответствующей точке  $D(m, n)$  выполняется операция накопления:

$$D(m, n) := D(m, n) + b, \quad V(m, n) := V(m, n) + 1.$$

После окончания обработки  $\forall(m, n)$  выполняется нормировка:  $D(m, n) := D(m, n) / V(m, n)$ .

Рассмотренный алгоритм легко поддается распараллеливанию на нескольких процессорах: набор фрагментов  $P_{ij}$  делится поровну между доступными процессорами. При реализации процедуры накопления сигнала важно гарантировать монополярный доступ каждого процессора к изображениям  $D$  и  $V$ , что может снизить производительность вычислительной системы. Поэтому целесообразно выделить отдельно группу фрагментов, при параллельной обработке которых заведомо (вне зависимости от положения КА, флуктуаций развертки и действия других случайных факторов) не возникнет конфликта при доступе к буферу накопления. Этой группе соответствует большая часть изображения, при этом ее обработка проходит максимально быстро без использования механизмов блокировки шины данных.

**Уточнение геодезической привязки изображений по контурным точкам диска Земли.** Неточности измерения положения и ориентации

КА приводят к погрешностям геодезической привязки объектов земной поверхности. Изображения от систем глобального наблюдения Земли предоставляют уникальную возможность уточнения их геодезической привязки, поскольку содержат земной диск, контрастно отображающийся на фоне космоса. В идеальном случае, при отсутствии искажающих факторов, земной диск должен отображаться на изображении в строго определенной позиции, иметь форму эллипса с известными размерами и ориентацией полуосей. Такое идеальное положение диска может быть строго математически описано и использовано в качестве эталона для сравнения с реально наблюдаемым диском Земли.

Для уточнения привязки вначале осуществляется поиск на исходном изображении контурных точек диска Земли. Их расположение по форме может значительно отличаться от эллипса, особенно для датчиков второго типа. Для поиска выполняется пороговая сегментация изображения на диск Земли и космос [7]. Порог сегментации выбирается на основе анализа гистограммы изображения и данных об освещенности Земли Солнцем (для видимой области спектра).

Выделенные краевые точки преобразуются во вспомогательную плоскость, проходящую через центр Земли перпендикулярно к направлению на виртуальный спутник. Тогда пересчет краевой точки с координатами  $(m, n)$  осуществляется в соответствии с рассмотренными ранее моделями (1) – (18), только вместо (18) используется преобразование

$$x = |\mathbf{R}_c| Y' / X', \quad y = |\mathbf{R}_c| Z' / X', \quad (23)$$

где координаты  $(x, y)$  в данном случае являются искомым образом  $(m, n)$  во вспомогательной плоскости.

Можно показать [7], что в идеальном случае краевые точки во вспомогательной плоскости лежат на эллипсе с центром  $(0, 0)$  и полуосями

$$a = a_3 \sqrt{X_c^2 b_3^2 + Y_c^2 b_3^2 + Z_c^2 a_3^2} / c, \quad (24)$$

$$b = \sqrt{X_c^2 b_3^4 + Y_c^2 b_3^4 + Z_c^2 a_3^4} / c,$$

где  $c = \sqrt{X_c^2 b_3^2 + Y_c^2 b_3^2 + Z_c^2 a_3^2 - a_3^2 b_3^2}$ .

В силу малого влияния искажающих факторов следует ожидать, что контурные точки диска Земли также лежат на фигуре, близкой к эллипсу (24), а геометрические рассогласования в первом приближении проявляются линейно: в виде плоскопараллельного смещения, поворота и из-

менения масштаба. При таких допущениях эллипс переходит в эллипс.

Опишем произвольный эллипс как

$$x^2 + gxy + cy^2 + dx + ey + f = 0, \quad (25)$$

где  $g, c, d, e, f$  – параметры эллипса, которые определяют его центр  $(x_{ц}, y_{ц})$ , угол поворота  $\varphi$  и полуоси  $a_d, b_d$  как

$$x_{ц} = (eg - 2cd)/(4c - g^2),$$

$$y_{ц} = (dg - 2e)/(4c - g^2),$$

$$\varphi = 0.5 \arctg(g/(1-c)),$$

$$a_d, b_d = \sqrt{\frac{2(cd^2 + fg^2 + e^2 - edg - 4cf)}{(4c - g^2)(1 + c \pm \sqrt{(1-c)^2 + g^2})}}.$$

Физический смысл (25) становится понятным, если эллипс близок к окружности, т.е. при  $g \approx 0, c \approx 1$ . В этом случае левая часть (25) приводится к виду  $(x - x_{ц})^2 + (y - y_{ц})^2 - R^2$ , т.е. становится пропорциональной расстоянию от точки  $(x, y)$  до окружности. Таким образом, используя левую часть (25) как меру близости точки к эллипсу, можно определить коэффициенты (25) на основе множества найденных крайних точек по методу наименьших квадратов.

Поскольку вспомогательная плоскость перпендикулярна к лучу, соединяющему спутник и центр Земли, то поправки к углам ориентации спутника (тангажа, крена и рысканья) находятся соответственно как

$$\Delta\alpha = \arctg \frac{x_{ц}}{|\mathbf{R}_c|}, \quad \Delta\omega = \arctg \frac{y_{ц}}{|\mathbf{R}_c|}, \quad \Delta\chi = \varphi. \quad (26)$$

Отклонение найденных полуосей  $a_d, b_d$  эллипса диска Земли от соответствующих полуосей  $a, b$  эталонного эллипса (24) свидетельствует об ошибке измерения расстояния спутника от центра Земли  $|\mathbf{R}_c|$ . Поэтому проводится коррекция высоты полета КА путем умножения его координат  $(X_c, Y_c, Z_c)$  на усредненный по осям коэффициент изменения масштаба  $0.5(a/a_d + b/b_d)$ .

Поскольку уточнение геопривязки сводится к коррекции параметров картографической проекции, то этот процесс может быть выполнен параллельно с геометрической обработкой.

**Выводы.** Рассмотренные модели и алгоритмы позволяют описать процесс формирования изображений от систем глобального наблюдения

Земли и выполнить их геометрическую коррекцию. Отличительной особенностью предложенных геометрических моделей является то, что они практически инвариантны к двум принципиально различным способам формирования изображений: с двухкоординатной линейной и круговой разверткой с использованием набора ПЗС - линеек.

Предложенные модели апробированы на снимках с американского геостационарного спутника «MeteoSat-8» путем имитации характерных искажений. Рассмотренные алгоритмы положены в основу программного комплекса геометрической нормализации видеoinформации от систем глобального наблюдения. В качестве вычислительных средств использована серверная ЭВМ IBM x3850 с 4-я двудерными процессорами Intel Xeon 7120N 4x3.0GHz / 667 МГц, обеспечивающая за счет распараллеливания вычислительного процесса 25 млрд. операций в секунду и имеющая оперативную память 8 Гбайт. Время геометрической обработки видеoinформации одного сеанса связи со спутником в объеме 3 Гб не превышает 5 минут. При этом точность рассмотренной технологии геодезической привязки по диску Земли для центрального области снимка составила 1.3 пикселя.

### Библиографический список

1. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Издательство А и Б, 1997. – 288 с.
2. Злобин В.К., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е. и др. Межотраслевая обработка изображений датчика МСУ-В ИСЗ «Океан-О» // Исследование Земли из космоса. – 2002. – №1. – С. 24-31.
3. Селиванов А.С., Нараева М.К., Носов Б.И. и др. Многозональный сканер с конической разверткой для исследования природных ресурсов // Исследование Земли из космоса. – 1985. – №1. – С. 66-72.
4. LRIT/HRIT Global Specification. CGMS 03. Issue 2.6. Coordination Group for Meteorological Satellites. August 1999.
5. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. – М.: Физматлит, 2006. – 288с.
6. Пореев В.Н. Компьютерная графика. – СПб.: БХВ - Петербург, 2002. – 432 с.
7. Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Москвитин А.Э. Координатная привязка изображений от геостационарных спутников по контурным точкам диска Земли // Вестник РГРТУ, 2007. – № 22. – С. 10-17.