

В. Г. АНДРОНОВ, С. В. ДЕГТЯРЁВ, Е. В. ЛАЗАРЕВА

## ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОСМИЧЕСКИХ ПАНОРАМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

На основе анализа динамики и особенностей формирования космических изображений в режимах панорамной съемки со сканирующим головным зеркалом получены функциональные фотограмметрические зависимости между элементами геометрической структуры изображений подобного типа и гринвичскими координатами соответствующих им точек земной поверхности.

*Ключевые слова:* космические сканерные изображения, панорамная фото-съемка, фотограмметрическая модель.

**Введение.** В работе [1] представлены общая постановка и строгое решение прямой фотограмметрической задачи орбитальным методом для всех типов космических сканерных систем. Показано, что орбитальный метод основывается на последовательном использовании двух моделей, а именно, общей геоорбитальной модели космической сканерной съемки и координатно-временной модели формирования сканерного изображения конкретного типа. Аналитические соотношения, описывающие первую модель, представлены в работе [2]. Цель настоящей статьи — разработка второй модели, описывающей в каждый момент времени съемки переход от порядковых номеров пикселей цифрового космического сканерного изображения к топологическим параметрам элементов фоточувствительной структуры сканера.

**Математическая постановка задачи.** Необходимо установить взаимосвязь геометрической структуры оцифрованного изображения и топологии фотоприемной структуры. Пусть на дату  $Date = \langle \text{день, месяц, год} \rangle$  и московское время  $t_0$  заданы начальные условия поступательного и углового движения космического аппарата (КА), с углами тангажа  $\alpha(t_0)$ , крена  $\beta(t_0)$  и рысканья  $\chi(t_0)$ , осуществляющего панорамную видовую съемку с кеплеровской орбиты с элементами  $\{a, e, i, \Omega, \omega_{\text{п}}, v\}$ .

В качестве фотоприемной структуры съемочной аппаратуры КА будем рассматривать фотопленку шириной  $h$ , которая в процессе съемки протягивается с постоянной скоростью перпендикулярно экспонирующей щели длиной  $l_{\text{щ}}$  и шириной  $d_{\text{щ}}$ , расположенной вдоль направления полета КА. В результате полученное после включения съемочной аппаратуры оцифрованное космическое панорамное изображение обрабатывается путем сканирования фотопленки с разрешением  $\varepsilon$  и представляется в виде мозаичной структуры пикселей из  $K$  строк и  $N$  столбцов. Каждый пиксел имеет порядковые номера  $k, n$  и оптическую плотность  $D_{k,n} \in [0, D_{\text{max}}]$ , где  $D_{\text{max}}$  — максимальное значение. Геометрическая структура панорамного космического изображения описывается множеством  $\mathfrak{R} = \{ \langle k, n \rangle \mid k = \overline{1, K}, n = \overline{1, N} \}$ .

Будем считать, что описанная фотоприемная структура характеризуется некоторыми топологическими параметрами  $\{x, y\}$ , которые в каждый момент времени  $\tau_i$  на интервале  $(t_0, t_{\text{п}})$  съемки функционально связаны с порядковыми номерами  $k, n$  оцифрованного изображения, и известна функция отображения

$$\Phi : \{k, n\} \rightarrow \{x, y, \tau_i\}. \quad (1)$$

Положим далее, что в координатном пространстве, связанном с общим земным эллипсоидом, заданы функции

$$X = F_X(x, y, Q, H, t); \quad Y = F_Y(x, y, Q, H, t); \quad Z = F_Z(x, y, Q, H, t), \quad (2)$$

устанавливающие в моменты московского времени  $t = t_0 + \tau_i$  функциональную связь географических координат  $\{X, Y, Z\}$  точек земной поверхности, их геодезических высот  $\{H\}$ , топологических параметров  $\{x, y\}$  фотоприемной структуры, а также орбитальных, угловых и конструктивных параметров съемочной аппаратуры  $\{Q\}$ .

При заданных исходных параметрах требуется найти функцию отображения

$$\Phi : \{k, n\} \cdot \{H\} \rightarrow \{X, Y, Z\} \quad (3)$$

элементов  $\{k, n\}$  геометрической структуры оцифрованного панорамного изображения в географические координаты  $\{X, Y, H\}$  соответствующих элементам точек земной поверхности.

Иными словами, задача заключается в получении строгих аналитических соотношений, описывающих функции (1)—(3) для космической панорамной съемки.

Введем систему координат (СК)  $oxyz$  экспонирующей щели (рис. 1, а). Центр  $o$  СК расположим в геометрическом центре щели, ось  $oy$  направим вдоль щели по направлению полета КА, ось  $ox$  — перпендикулярно щели; ось  $oz$  дополняет систему до правой, а ее отрицательное направление совпадает с линией визирования съемочной аппаратуры. Положим далее, что развертка панорамного изображения по строкам выполняется сканированием головного зеркала (рис. 1, б) в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты, путем вращения линии визирования вокруг оси  $oy$  по углу крена КА  $\beta$ , а развертка по кадру — за счет движения КА. При этом будем считать, что ориентация съемочной аппаратуры по углам тангажа и рысканья КА в процессе панорамной сканерной съемки остается неизменной. Эквивалентная схема панорамной съемочной аппаратуры такого типа представлена на рис. 1, б.

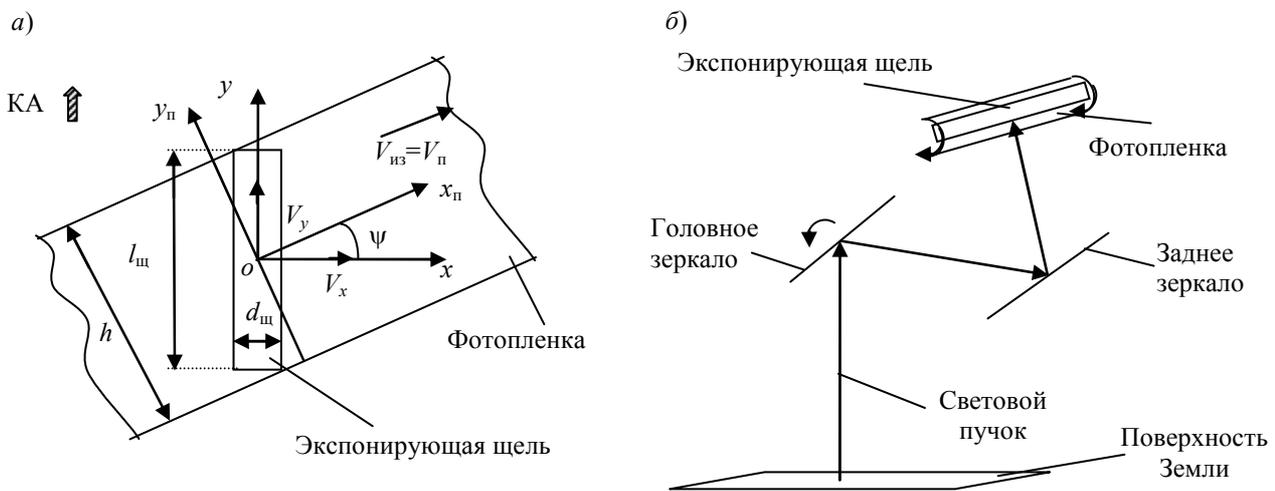


Рис. 1

В процессе съемки световой пучок, пришедший от подстилающей поверхности, отражается сканирующим головным зеркалом, проходит через объектив и отражается задним зеркалом, после чего попадает через световой затвор и блок светофильтров в фокальную плоскость объектива, где расположена экспонирующая щель, под которой с помощью специального механизма протягивается фото пленка.

Головное зеркало сканирует с постоянной угловой скоростью [3]

$$\omega_{\text{СК}} = \frac{f |V_{\text{КА}}|}{l_{\text{щ}} H_{\text{КА}}}, \quad (4)$$

где  $f$  — фокусное расстояние съёмочной аппаратуры;  $|V_{КА}|, H_{КА}$  — модуль вектора скорости движения КА и высота КА над поверхностью общего земного эллипсоида.

Фотопленка, движущаяся со скоростью  $V_{п}$ , равной скорости движения  $V_{из}$  изображения в том же направлении, в целях компенсации сдвига изображения развернута относительно щели на угол  $\psi$  (рис. 1, а). Разложим вектор  $V_{из}$  на две составляющие, первая из которых  $V_x$  обусловлена панорамированием, а вторая  $V_y$  — поступательным движением КА. Во время экспонирования фотопленки должно выполняться равенство  $V_{п}=V_{из}$  [3]. При этом применяется угловая компенсация сдвига изображения, которая заключается в необходимости постоянства вектора  $V_x$  и минимизации вектора  $V_y$  в геометрическом центре щели на интервале съёмки. Эти условия обеспечиваются соответственно постоянством угловой скорости  $\omega_{ск}$  и разворотом вектора  $V_{п}$  относительно  $V_x$  на угол  $\psi$ . Из очевидных соотношений  $V_x = V_{из} \cos \psi$  и  $V_y = V_{из} \sin \psi$  следует, что

$$\operatorname{tg} \psi = V_y / V_x . \quad (5)$$

Подставив в формулу (5) выражения, полученные в работе [4] для составляющих  $V_x, V_y$ , справедливые для геометрического центра щели ( $x_{щ} = y_{щ} = x_S = y_S = 0$ ), с учетом того, что для панорамной съёмки  $\omega_X = \omega_Z = 0$  и  $\omega_Y = \omega_{ск}$ , после несложных преобразований получим:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{W_2(t)}{W_1(t) + \left\{ \omega_{ск} \left[ Z_{И} - Z_S(t)_{И} \right] / \sin i \sin u(t) \right\}} , \quad (6)$$

где

$$W_1(t) = b_{11}(t) X_S^*(t)_{И} + b_{21}(t) Y_S^*(t)_{И} + b_{31}(t) Z_S^*(t)_{И} ;$$

$$W_2(t) = b_{12}(t) X_S^*(t)_{И} + b_{22}(t) Y_S^*(t)_{И} + b_{32}(t) Z_S^*(t)_{И} .$$

В выражении (6) приняты следующие обозначения (относящиеся к моменту включения съёмочной аппаратуры  $t = t_0$ ):  $Z_{И}$  — аппликата точки пересечения линии визирования с земной поверхностью в инерциальной системе координат (ИСК);  $Z_S(t)_{И}$  — составляющая радиус-вектора КА по оси  $Z$  ИСК;  $X_S^*(t)_{И}, Y_S^*(t)_{И}, Z_S^*(t)_{И}$  — составляющие скорости движения КА в ИСК;  $i, u$  — наклонение орбиты и аргумент широты КА;  $\langle b_{11}(t), b_{21}(t), b_{31}(t) \rangle$ ;  $\langle b_{12}(t), b_{22}(t), b_{32}(t) \rangle$  — элементы соответственно первой и второй строки матрицы направляющих косинусов  $B^T(t)$ , описывающей переход из инерциальной системы координат к системе координат щели  $oxyz$ .

Формулы для расчета значений элементов матрицы  $B^T(t)$  представлены в работе [4], а составляющие  $X_S^*(t)_{И}, Y_S^*(t)_{И}, Z_S^*(t)_{И}$ , величины  $Z_S(t)_{И}$  и  $Z_{И}$  вычисляются по заданным элементам кеплеровской орбиты в соответствии с известными формулами [5].

Отметим далее, что панорамное изображение формируется в течение цикла вращения головного зеркала от  $\varphi_{\min}$  до  $\varphi_{\max}$  (рис. 2) относительно начального угла крена  $\beta_0$ . Основной режим панорамной съёмки, обеспечивающий минимальные искажения снимка, связан с начальным значением угла крена  $\beta_0 = 0$  (рис. 2, а). Тогда в момент открытия затвора линия

визирования  $SK$  будет находиться в положении, соответствующем  $\beta(t_0) = \varphi_{\min}$ . Понятно, что значение угла визирования по крену будет отрицательным. При попадании зеркала в положение, соответствующее  $\beta(t_{\Pi}) = \varphi_{\max}$ , пластинки затвора сходятся и доступ световой энергии прекращается. Положение линии визирования  $SK$  в момент окончания формирования изображения показано на рис. 2, б.

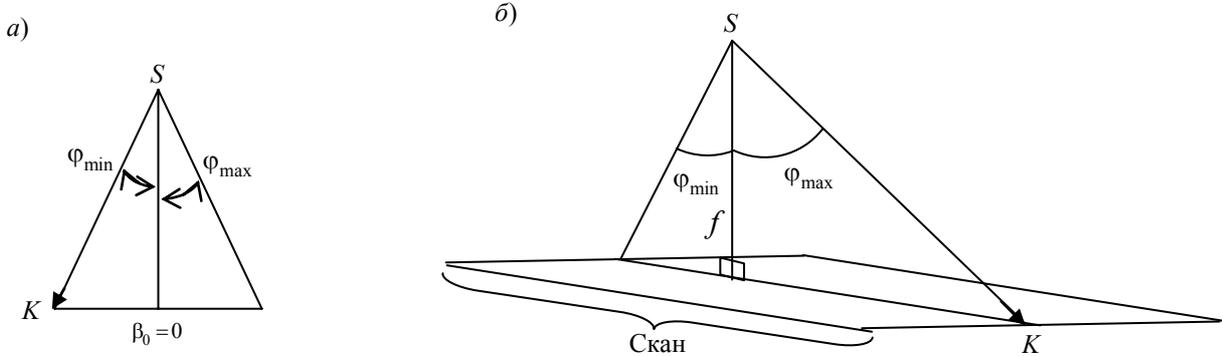


Рис. 2

Текущее значение угла крена можно определить по формуле

$$\beta(\tau) = \beta_0 + \varphi(\tau) = \varphi(\tau), \quad (7)$$

где  $\tau$  — текущее время на интервале съемки  $(t_0, t_{\Pi})$ ;  $\varphi_{\min} \leq \varphi(\tau) \leq \varphi_{\max}$ .

Для получения выражений, устанавливающих связь между временем формирования точки изображения в системе координат щели и ее положением на панорамном снимке, а также топологическими координатами, обозначим через  $\tau_T$  тактовое время формирования одной строки изображения, а через  $\tau_k$  — время формирования  $k$ -й строки панорамного изображения на интервале сканирования. Получим

$$\beta(\tau_k) = \varphi(\tau_k) = \varphi_{\min} + \omega_{\text{ск}} \tau_k. \quad (8)$$

При этом справедливо выражение

$$\tau_k = k \tau_T = k \frac{d_{\text{щ}}}{V_x} = k \frac{d_{\text{щ}}}{\omega_{\text{ск}} f}, \quad (9)$$

подставив которое в уравнение (8), получим

$$\beta(\tau_k) = \varphi(\tau_k) = \varphi_{\min} + k \frac{d_{\text{щ}}}{f}. \quad (10)$$

Формулы (9) и (10) позволяют по заданному (измеренному) порядковому номеру  $k$  строки панорамного изображения вычислить текущее  $\tau_k$  и московское время  $t = t_0 + \tau_k$  ее формирования на интервале съемки и текущее значение угла крена  $\beta(\tau_k)$ .

Переход от системы координат оцифрованного изображения к фотопленке опишем соотношениями

$$y_{\Pi} = (n - N/2)\varepsilon - \Delta\varepsilon; \quad x_{\Pi} = k\varepsilon, \quad (11)$$

где  $\varepsilon$  — разрешение сканера;  $\Delta\varepsilon = \begin{cases} \varepsilon/2, & \text{если } n \neq N/2; \\ 0, & \text{если } n = N/2. \end{cases}$

Для перехода от координат точки на фотопленке к топологическим параметрам  $x, y$  экспонирующей щели воспользуемся следующими (см. рис. 1) формулами:

$$y = \begin{cases} 0, & \text{если } y_{\Pi} = 0; \\ y_{\Pi} = \cos \psi; \end{cases} \quad x = -y_{\Pi} \sin \psi. \quad (12)$$

Полученные аналитические зависимости (6)—(12) описывают искомую функцию отображения (1) и позволяют по заданным порядковым номерам  $k, n$  пиксела космического сканерного изображения найти топологические параметры  $x, y$ , а также текущее относительное  $\tau_k$  и московское  $t$  время съемки, которые являются исходными данными в модели (2) и функции отображения (3).

Для получения аналитических выражений, описывающих модель (2) и функцию отображения (3), воспользуемся результатами из работы [6].

**Геоорбитальная модель космической панорамной съемки.** Общая для всех типов сканерной съемочной аппаратуры модель космической сканерной съемки, называемая геоорбитальной, получена в работе [6]. Применительно к рассматриваемым сканерным системам панорамного типа геоорбитальная модель вида (2) с учетом установленных выше соотношений  $x = x_S = y_S = 0$ ,  $\omega_X = \omega_Z = 0$ ,  $\omega_Y = \omega_{ск}$  имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_S(t) + [Z - Z_S(t)]U(t); \\ Y &= Y_S(t) + [Z - Z_S(t)]W(t); \\ Z &= [N(e^2 - 1) + H] \cos B; \\ L &= \arctg Y/X; \\ X_S^2(t) + Y_S^2(t) + 2M(B)[X_S(t)U(\tau_k) + Y_S(t)W(\tau_k)] + \\ &+ M^2(B)[U^2(\tau_k) + W^2(\tau_k)] = (N + H)^2 \cos^2 B, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где

$$M(B) = (N(1 - e^2) + H) \sin B - Z_S(t); \quad x = x_S = y_S = 0;$$

$$U(t) = \frac{a_{12}(t)y + a_{13}(t)f}{a_{32}(t)y + a_{33}(t)f}; \quad W(t) = \frac{a_{22}(t)y + a_{23}(t)f}{a_{32}(t)y + a_{33}(t)f},$$

$e$  — эксцентриситет орбиты;  $a_{ij}(t)$ ,  $i = 1, 2, 3$ ;  $j = 1, 2, 3$ , — элементы матрицы направляющих косинусов  $A(\tau_k)$ , описывающей в момент времени  $t$  ориентацию системы координат экспонирующей щели относительно гринвичской системы координат;  $X_S(t), Y_S(t), Z_S(t)$  — пространственные геоцентрические координаты КА в гринвичской системе координат.

Полученная фотограмметрическая модель космических панорамных изображений, представленная формулами (6)—(12) и системой уравнений (13), описывает строгую функциональную связь геодезической широты  $B$ , долготы  $L$ , высоты  $H$  точки земной поверхности и ее пространственных гринвичских координат  $X, Y, Z$  с топологическими параметрами  $x, y$  фотоприемной структуры, а также текущим относительным  $\tau_k$  и московским  $t$  временем съемки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андронов В. Г., Клочков И. А., Лазарева Е. В. Общая постановка и решение прямой фотограмметрической задачи для моноскопических космических изображений // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7, № 4. С. 33—35.
2. Общая геоорбитальная модель космической сканерной съемки / В. Г. Андронов, С. В. Дегтярёв, И. А. Клочков, Е. В. Лазарева // Геоинформатика. 2010. № 1. С. 48—52.
3. Батраков А. С., Летуновский В. В. Телевизионные системы. М.: МО СССР, 1978. 372 с.

4. Общая модель скорости движения космических сканерных изображений в инерциальном пространстве / В. Г. Андронов, И. А. Клочков, Е. В. Лазарева, Т. В. Мордавиченко // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2010. № 4. С. 58—61.
5. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. Г. С. Нариманова и М. К. Тихонравова. М.: Машиностроение, 1972. 374 с.
6. Андронов В. Г., Дегтярёв С. В., Лазарева Е. В. Модель формирования космических сканерных изображений в режимах панорамной съемки // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8, № 11. С. 19—26.

**Сведения об авторах**

- Владимир Германович Андронов** — канд. техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет, кафедра телекоммуникаций, Курск; E-mail: vladiA58@yandex.ru
- Сергей Викторович Дегтярёв** — д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет, кафедра информационных систем и технологий, доцент; E-mail: ist.@kistu.kursk.ru
- Евгения Вадимовна Лазарева** — аспирант; Юго-Западный государственный университет, кафедра телекоммуникаций; E-mail: eugenia-lazareva@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
телекоммуникаций

Поступила в редакцию  
26.10.10 г.