

УДК 519.283

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ

А. Г. Ермолаев, С. В. Киреев, Ю. П. Пытьев

(кафедра математики)

В статье описываются принципы совмещения изображений одного и того же участка земной поверхности, полученные в разное время из космоса. Процессы, наблюдаемые из космоса, например отдельные этапы созревания урожая, дрейф льдов, изменения погоды и т. п., интересуют исследователей в динамике. Но изображения, полученные в разное время, неизбежно смещены друг относительно друга из-за неустойчивости траектории спутника, его ориентации в момент съемки. Поэтому задача совмещения изображений имеет важное самостоятельное значение, и ее решение должно обязательно предварять анализ изображений при дистанционном зондировании.

Рассмотрим математическую модель получения видеоизображений на примере спутника типа Ландсат. Спутник движется по солнечно-синхронной орбите на высоте 915 км со скоростью 6,47 км/с относительно Земли [1], полоса захвата на поверхности Земли (185 км) расположена симметрично относительно проекции орбиты на поверхность, поле зрения составляет 11,56°. Спутник проходит 474 м во время активного цикла сканирования зеркала (рис. 1).

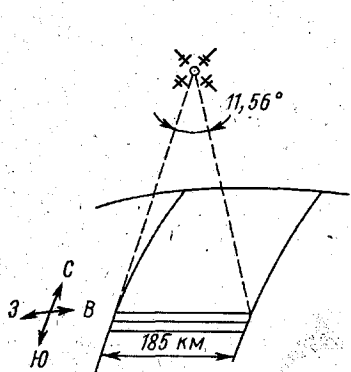


Рис. 1

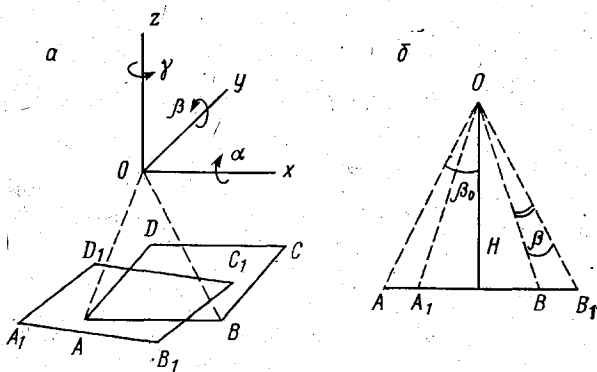


Рис. 2

Получим формулы, связывающие координаты одной точки поверхности на разновременных видеоизображениях. Для этого введем систему координат с началом в центре оптической системы спутника: ось  $Oy$  направим вдоль траектории, ось  $Oz$  — вертикально от поверхности Земли, ось  $Ox$  — так, чтобы для координатных ортов выполнялось соотношение  $e_x = [e_y, e_z]$ . В такой системе координат (рис. 2, а) поверхность Земли при условии  $H \ll R$  ( $H$  — высота полета,  $R$  — радиус Земли) можно считать плоской, задаваемой уравнением  $H + z = 0$ . Пусть при первом полете над интересующим участком получено изображение  $\Phi_1 = ABCD$ , а при втором, над этим же местом, —  $\Phi_2 = A_1B_1C_1D_1$  (см. рис. 2, а), смещенное относительно  $\Phi_1$ . Необходимо найти такое преобразование координат, при котором область  $A_1B_1C_1D_1$  переходит в область  $ABCD$ . В рассматриваемой модели считалось, что смещение изображений возникает из-за сдвига точки зрения на вектор  $m = (a, b, 0)$  в плоскости, параллельной поверхности Земли, и вращения спутника на углы  $\alpha, \beta, \gamma$  относительно осей  $Ox, Oy, Oz$  соответственно\*. При таких перемещениях точка  $(x, y, z)$  переходит в точку  $(x', y', z')$  по формулам

$$\begin{aligned} x' = & [(x + a) \cos \beta - ((y + b) \sin \alpha + z \cos \alpha) \sin \beta] \cos \gamma - \\ & - \sin \gamma [(y + b) \cos \alpha - z \sin \alpha], \end{aligned}$$

\* Углы тангажа, крена и рыскания.

$$y' = [(x+a) \cos \beta - ((y+b) \sin \alpha + z \cos \alpha) \sin \beta] \sin \gamma + \\ + \cos \gamma [(y+b) \cos \alpha - z \sin \alpha],$$

$$z' = (x+a) \sin \beta + \cos \beta [(y+b) \sin \alpha + z \cos \alpha].$$

Для получения зависимости между точками изображений  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$  нужно спроектировать точку  $(x, y, z)$  по лучу, проходящему через начало координат до пересечения с плоскостью  $z=H$ . Обозначим

$$U = (x+a) \cos \beta + (H \cos \alpha - (y+b) \sin \alpha) \sin \beta,$$

$$V = H \sin \alpha + (y+b) \cos \alpha.$$

Тогда

$$x_1 = H (U \cos \gamma - V \sin \gamma) / [(H \cos \alpha - (y+b) \sin \alpha) \cos \beta - (x+a) \sin \beta], \quad (1)$$

$$y_1 = H (U \sin \gamma + V \cos \gamma) / [(H \cos \alpha - (y+b) \sin \alpha) \cos \beta - (x+a) \sin \beta].$$

Формулы (1) задают соответствие между точками изображений  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$ :  $(x, y) \in \Phi 1$ ,  $(x_1, y_1) \in \Phi 2$ . В качестве параметров они содержат  $a, b, \alpha, \beta, \gamma$ . Для пересчета одного изображения в систему координат другого следует оценить эти параметры. Такая задача может быть решена, если установить соответствие некоторых точек одной фотографии и другой, т. е. найти похожие фрагменты на обеих фотографиях. Для этого разумно использование морфологических методов анализа изображений, инвариантных относительно условий освещения и регистрации видеосигнала, позволяющих устанавливать сходство по форме. Кроме того, морфологические методы обладают высокой помехозащищенностью и допускают реализацию в виде специализированных устройств, работающих в реальном режиме времени [2, 3].

Итак, сначала формулы (1) используются для оценки параметров пересчета — при подстановке в них найденных координат сходных фрагментов, затем — для пересчета остальных координат, используя найденные оценки для  $a, b, \alpha, \beta, \gamma$ . Непосредственное использование выражений (1), которые достаточно громоздки, неудобно. В то же время знание конкретных значений углов зрения сканера позволяет сделать определенные упрощения, так как значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$  оказываются малыми ( $\sim 1^\circ$ ).

Нетрудно показать, что в первом порядке  $\alpha$ - и  $\beta$ -повороты тождественны параллельному переносу. Действительно, рассмотрим, например,  $\beta$ -поворот. Пусть  $O$  — точка расположения спутника,  $AB$  — участок, сфотографированный при первом пролете над объектом,  $A_1B_1$  — при втором,  $2\beta_0$  — угол обзора,  $\beta$  — угол поворота (рис. 2, б). Легко видеть, что с точностью до  $\beta^2$  справедливо

$$AA_1 \approx BB_1 \approx H\beta(1 + \operatorname{tg}^2 \beta_0),$$

т. е. смещения, вызываемые поворотом вокруг осей  $Ox$  и  $Oy$ , хорошо аппроксимируются параллельным переносом. С учетом этого остается только три параметра пересчета изображений: координаты вектора переноса  $(a, b)$  с поправкой на  $\alpha$ - и  $\beta$ -повороты и угол  $\gamma$ . Формулы (1) линеаризуются и приобретают вид

$$x_1 = (x+a) \cos \gamma - (y+b) \sin \gamma, \quad (2)$$

$$y_1 = (x+a) \sin \gamma + (y+b) \cos \gamma.$$

Обратное преобразование:

$$x = -a + x_1 \cos \gamma + y_1 \sin \gamma,$$

$$y = -b - x_1 \sin \gamma + y_1 \cos \gamma. \quad (3)$$

Из формул (2)—(3) следует, что система координат, связанная с изображениями, не зависит от расположения спутника и может быть задана произвольно. Это существенно упрощает задачу совмещения.

На основе изложенных принципов совмещения был разработан и отлажен пакет программ автоматического пересчета в единую систему координат реальных разновременных изображений, полученных в различных условиях регистрации. Для поиска сходных по форме фрагментов использовался морфологический функционал

$$L(\psi, \varphi) = \|\psi - P_\varphi \psi\|^2 / \|E\psi - P_\varphi \psi\|^2.$$

Здесь  $\psi$  — некоторое изображение (или фрагмент),  $P_\varphi$  — морфологический оператор проектирования  $\psi$  на форму изображения  $\varphi$ ,  $E$  — оператор усреднения по полю зрения [2]. Решающее правило для этого функционала: изображение  $\psi_1$  ближе по форме к  $\varphi$ , чем  $\psi_2$ , если  $L(\psi_1, \varphi) < L(\psi_2, \varphi)$ , — позволяет из набора фрагментов  $\{\psi_i\}$ ,  $i=1, \dots, N$ , взятых на изображении  $\Phi 2$ , выбрать ближайший по форме к фраг-

менту  $\psi$ , взятому на изображении  $\Phi_1$ . Тем самым устанавливается соответствие  $(x, y) \leftrightarrow (x_1, y_1)$ . Функционал  $L(\psi, \varphi)$ , хотя и более трудоемок для вычислений, имеет ряд преимуществ перед другими морфологическими функционалами [3], а именно: а) исключаются ложные решения для фрагментов  $\psi$ , близких к ровному (пустому) полю зрения; б) точки минимума более глубоки и локализованы, что позволяет с высокой точностью определять координаты; в) значения  $L(\psi, \varphi)$  не зависят от уровня регистрируемого видеосигнала, так как числитель и знаменатель пропорциональны  $\|\psi\|^2$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дистанционное зондирование: количественный подход/Ред. Свейн. М., 1983. С. 133—140. [2] Пытьев Ю. П.//ДАН СССР. 1983. 269, № 5. С. 1061—1064. [3] Пытьев Ю. П.//Математические методы исследования природных ресурсов Земли из космоса. М., 1984. С. 42—60.

Поступила в редакцию  
10.04.86