

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).

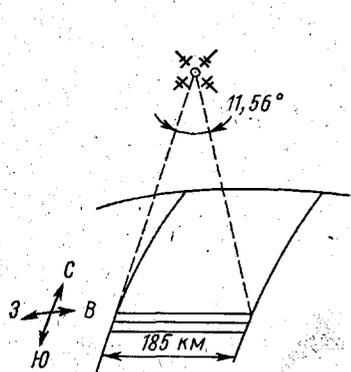


Рис. 1

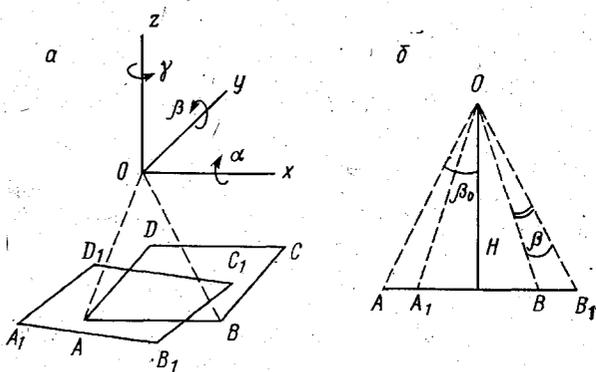


Рис. 2

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 Φ_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 α, β, γ 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 α и β оказываются малыми ($\sim 1^\circ$).

Нетрудно показать, что в первом порядке α - и β -повороты тождественны параллельному переносу. Действительно, рассмотрим, например, β -поворот. Пусть O — точка расположения спутника, AB — участок, сфотографированный при первом пролете над объектом, A_1B_1 — при втором, $2\beta_0$ — угол обзора, β — угол поворота (рис. 2, б). Легко видеть, что с точностью до β^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 α - и β -повороты и угол γ . 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 ψ — некоторое изображение (или фрагмент), P_φ — морфологический оператор проектирования ψ на форму изображения φ , E — оператор усреднения по полю зрения [2]. Решающее правило для этого функционала: изображение ψ_1 ближе по форме к φ , чем ψ_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 ψ , взятому на изображении Φ_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 ψ , 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