

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

2007, том 43, № 5

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 004.932 : 004.94

УТОЧНЕНИЕ ВНЕШНЕЙ ОРИЕНТАЦИИ КАМЕР ПРИ СИНХРОННОЙ СЪЕМКЕ С ДВУХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Г. И. Перетягин, А. Ю. Серен

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: Seren.Alexey@ngs.ru*

Предлагаются и исследуются методы одновременного уточнения параметров внешней ориентации спутниковых камер при синхронной съемке с двух космических аппаратов, движущихся по одной орбите. Методы основаны на учете перспективных соотношений между сопряженными координатами проекций элементов местности в синхронной серии стереоснимков в предположении, что общая точка прицеливания спутниковых камер во время съемки не меняется. Представлена также методика имитационного моделирования космической съемки, на основе реализации которой исследованы зависимости погрешностей оценивания углов ориентации (камер) от числа стереоснимков и уровня шума в проективных координатах изображений элементов местности.

Введение. При синхронной съемке с двух космических аппаратов (КА), движущихся по одной орбите, формируются две последовательности изображений, имеющие практически одинаковые параметры освещенности и идентичные по составу объектов сцены. Это существенно облегчает их последующую совместную обработку, в том числе определение географических координат объектов стереомониторинга.

Точность ориентации спутниковых камер при дистанционной съемке определяется рядом меняющихся факторов. Уточнение параметров ориентации осуществляется уже в ходе летно-конструкторских испытаний КА по результатам координатной обработки изображений контрольных (полигонных) объектов [1]. Естественно, что постоянно такая калибровка невозможна. Поэтому в данной работе исследуется возможность привлечения альтернативного (дополнительного) подхода на основе совместного анализа синхронной серии изображений сцены в предположении, что общая точка прицеливания пары спутниковых камер в процессе обработки соответствующей последовательности снимков не меняется.

Целью представленной работы является исследование возможности уточнения геометрии съемки (ориентаций спутниковых камер) на основе предложенного подхода, а также получение зависимости погрешностей оце-

нивания углов ориентации камер от числа стереоснимков и уровня шума в проективных координатах изображений элементов местности.

Модель синхронной съемки. Напомним основные геометрические соотношения на примере одной из пар синхронных камер. Будем считать, что достаточно точно известны векторы координат текущего положения (на момент времени съемки t_k) оптического центра камеры \mathbf{d}_k , $k = 1, 2, \dots, K$. Запланированная ориентация камеры, определяемая ортогональной матрицей \mathbf{R}_k , характеризуется направляющими косинусами системы координат спутниковой камеры относительно локальной географической системы координат. При планировании съемки также задается точка прицеливания \mathbf{M}_0 (в данной локальной системе координат). В бортовой системе координат, когда оптическая ось камеры направлена вдоль оси Z , точка прицеливания, очевидно, имеет координаты $\mathbf{M}_{0k} = (0, 0, d_k)$, где d_k – расстояние от спутниковой камеры до точки прицеливания в текущий момент времени t_k . Ориентация камеры на такую точку в момент очередного перенацеливания отрабатывается спутниковой аппаратурой с некоторой погрешностью. Геометрически это можно представить в виде небольшого смещения на местности точки прицеливания камеры \mathbf{M}_{0k} , которое в стандартной системе координат камеры реализуется вращением, определяемым неизвестной ортонормированной матрицей \mathbf{Q} [1]:

$$\mathbf{M}_{0k} = \mathbf{Q}\mathbf{R}_k(\mathbf{M}_0 - \mathbf{d}_k). \quad (1)$$

При описании суммарного отклонения камеры от точного положения, совершившей неучтенные вращения на углы крена ω_x , тангажа ω_y и курса ω_z вокруг соответствующих осей координат камеры, обычно используют представление матрицы \mathbf{Q} в виде произведения элементарных матриц вращения [1]: $\mathbf{Q} = \mathbf{A}_z \mathbf{A}_y \mathbf{A}_x$, где

$$\mathbf{A}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_x & -\sin \omega_x \\ 0 & \sin \omega_x & \cos \omega_x \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_y = \begin{bmatrix} \cos \omega_y & 0 & \sin \omega_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \omega_y & 0 & \cos \omega_y \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_z = \begin{bmatrix} \cos \omega_z & -\sin \omega_z & 0 \\ \sin \omega_z & \cos \omega_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Будем считать, что установлено поточечное соответствие между идентифицированными (опорными) точками сцены $\mathbf{M}_n = (X_n, Y_n, Z_n)^T$, $n = 1, N$, в географической системе координат и их координатами в плоскости фотоприемника (u_{nk}, v_{nk}) , $n = 1, N$, центрированными относительно главной точки снимка. В этом случае координаты изображения точки в плоскости фотоприемника перспективной камеры представляются в виде [1]

$$u_{nk} = \frac{f \mathbf{r}_{1k}^T (\mathbf{M}_n - \mathbf{d}_k)}{h_X \mathbf{r}_{3k}^T (\mathbf{M}_n - \mathbf{d}_k)}; \quad v_{nk} = \frac{f \mathbf{r}_{2k}^T (\mathbf{M}_n - \mathbf{d}_k)}{h_Y \mathbf{r}_{3k}^T (\mathbf{M}_n - \mathbf{d}_k)}; \quad Z_{nk} = \mathbf{r}_{3k}^T (\mathbf{M}_n - \mathbf{d}_k). \quad (2)$$

Здесь h_X, h_Y – расстояния между ячейками фотоприемника вдоль строк и столбцов соответственно; f – фокусное расстояние. Определив (для k -го мо-

мента времени съемки t_k) в однородных координатах трехмерный вектор $\mathbf{m}_{nk} = (u_{nk} h_X / f, v_{nk} h_Y / f, 1)^T = (x_{nk}, y_{nk}, 1)^T$, соотношение (2), учитывающее возможное отклонение оптической оси, можно записать аналогично (1):

$$Z_{nk} \mathbf{m}_{nk} = \mathbf{Q} \mathbf{R}_k (\mathbf{M}_n - \mathbf{d}_k). \quad (3)$$

Здесь учтена связь координат $(X_{nk}, Y_{nk}, Z_{nk}) = \mathbf{M}_{nk}$ идентифицированных точек сцены (относительно стандартной системы координат камеры) с однородными координатами соответствующих им (сопряженных) точек k -го изображения $\mathbf{m}_{nk} = (x_{nk}, y_{nk}, 1)^T$ с помощью соотношений $\mathbf{M}_{nk} = Z_{nk} \mathbf{m}_{nk}$. Кроме матрицы \mathbf{Q} , характеризующей систематическую ошибку ориентации спутниковой камеры (в период времени съемки между моментами механического перенацеливания), неизвестными являются параметры Z_{nk} («расстояния» до элементов сцены для текущего положения спутниковой камеры).

Моделирование показывает, что оценивание параметров систематической ошибки ориентации имеет принципиальное значение. В частности, можно отметить, что оценивание высот без учета ошибок в матрицах ориентации в общем случае приводит к появлению тренда (систематической погрешности) в оценках высот.

Это хорошо видно на рис. 1, где приведены зависимости среднеквадратичных отклонений (СКО) оценок высоты в заданной точке рельефа от ее истинного значения (при обработке последовательностей снимков с двух спутниковых камер, содержащих систематические ошибки ориентации) для общего времени синхронной съемки, равного 64 с.

Ясно, что величина погрешности оценки высоты рельефа зависит от положения камеры на орбите относительно точки съемки. Здесь средние значения отклонений (на рисунке показаны точками) порядка 75 м при общей вариации рельефа 400 м на моделируемой сцене.

Вычисление систематических ошибок ориентации (углов тангажа, крена и курса) позволяет фактически компенсировать тренд в погрешностях оце-

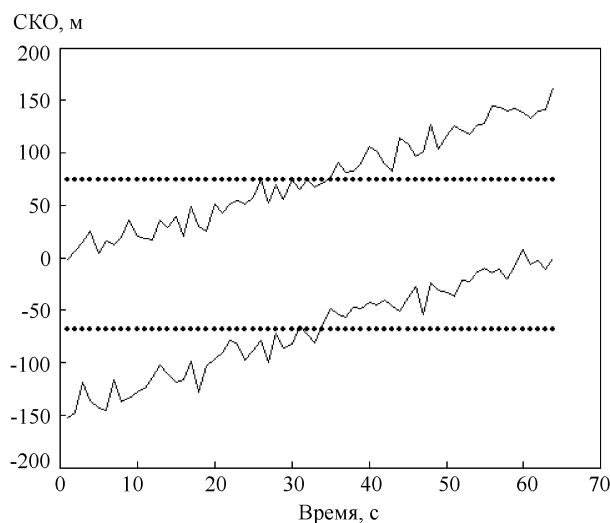


Рис. 1. Отклонения оценок высоты в заданной точке рельефа от ее истинного значения без компенсации ошибок ориентации

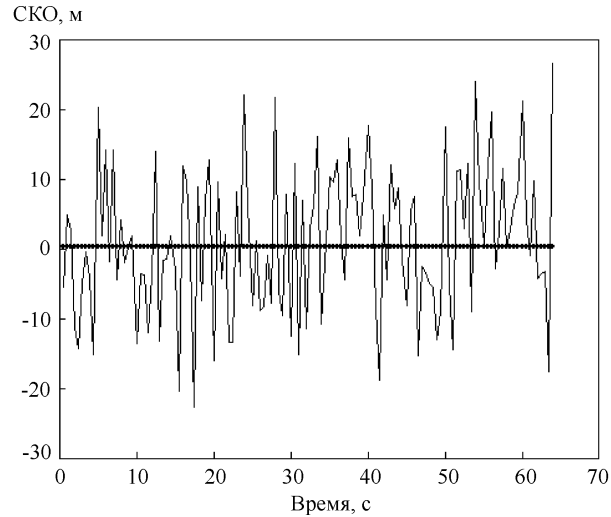


Рис. 2. Отклонения оценок высоты в заданной точке рельефа от ее истинного значения с компенсацией ошибок ориентации

нок высот, как это видно на рис. 2. СКО не превышает 10 м, и тренд практически нулевой.

При синхронной съемке с двух КА систематические ошибки ориентации спутниковых камер характеризуются матрицами \mathbf{Q}_1 и \mathbf{Q}_2 . С учетом этих ошибок и формулы (3) взаимосвязь между координатами сопряженных точек на синхронной паре кадров для момента съемки t_k имеет вид

$$\mathbf{M}_{2, nk} = Z_{2, nk} \mathbf{m}_{2, nk} = Z_{1, nk} \mathbf{Q}_2 \mathbf{R}_{2, k} \mathbf{R}_{1, k}^T \mathbf{Q}_1^T \mathbf{m}_{1, nk} + \mathbf{Q}_2 \mathbf{R}_{2, k} (\mathbf{d}_{1, k} - \mathbf{d}_{2, k}) = \tilde{\mathbf{R}}_k \mathbf{M}_{1, nk} + \tilde{\mathbf{d}}_k, \quad n = \overline{1, N}. \quad (4)$$

Исходя из данного соотношения, необходимо оценить матрицы \mathbf{Q}_1 и \mathbf{Q}_2 при неизвестных значениях высот ($Z_{1, nk}$, $Z_{2, nk}$).

Аппроксимация рельефа ориентированной плоскостью. В поиске устойчивого решения поставленной задачи прежде всего заметим, что при высоте съемки порядка 400–500 км локальными перепадами высот элементов рельефа чаще всего можно пренебречь, а рельеф аппроксимировать плоскостью. В этом приближении положим неизвестные параметры рельефа (в орбитальной системе координат) равными известному расстоянию текущего положения камеры от начала локальной географической системы координат (запланированной точки прицеливания) с включением параметров текущей ориентации плоскости $Z_{nk} \approx |\mathbf{t}_k| + a_k u_{nk} + b_k v_{nk}$, $k = 1, \dots, K$, где K – число стереоснимков в последовательности. Точность данного приближения около 0,1 %, если перепад высот на сцене не больше 400–500 м. При малых отклонениях углов ориентации камеры от истинного положения также справедли-

во приближенное равенство $\mathbf{Q} \approx \mathbf{I} + \mathbf{\Omega}$, где $\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_Z & \omega_Y \\ \omega_Z & 0 & -\omega_X \\ -\omega_Y & \omega_X & 0 \end{bmatrix}$ – косо-

симметричная матрица, а \mathbf{I} – единичная матрица.

Соотношение (4) при сделанных приближениях приводится к виду

$$\begin{aligned} & (|\mathbf{d}_{2,k}| + a_{2,k} u_{nk} + b_{2,k} v_{nk}) \mathbf{m}_{2,nk} = \\ & = (|\mathbf{d}_{1,k}| + a_{1,k} u_{nk} + b_{1,k} v_{nk}) (\mathbf{I} + \Omega_2) \mathbf{R}_{2,k} \mathbf{R}_{1,k}^T (\mathbf{I} - \Omega_1) \mathbf{m}_{1,nk} + \\ & + (\mathbf{I} + \Omega_2) \mathbf{R}_{2,k} (\mathbf{d}_{1,k} - \mathbf{d}_{2,k}), \quad n=1, \dots, N, \quad k=1, \dots, K. \end{aligned}$$

Для синхронно движущихся камер совершенно естественно моделировать параметры плоскости линейно изменяющимися с течением времени съемки величинами, т. е.

$$a_k = \alpha_1 + \alpha_2 t_k, \quad b_k = \beta_1 + \beta_2 t_k.$$

С учетом этого допущения перспективные взаимоотношения между элементами синхронной съемки приобретают вид

$$\begin{aligned} & (|\mathbf{d}_{2,k}| + \alpha_{12} u_{nk} + \alpha_{22} t_k u_{nk} + \beta_{12} v_{nk} + \beta_{22} t_k v_{nk}) \mathbf{m}_{2,nk} = \\ & = (|\mathbf{d}_{1,k}| + \alpha_{11} u_{nk} + \alpha_{21} t_k u_{nk} + \beta_{11} v_{nk} + \beta_{21} t_k v_{nk}) \times \\ & \times (\mathbf{I} + \Omega_2) \mathbf{R}_{2,k} \mathbf{R}_{1,k}^T (\mathbf{I} - \Omega_1) \mathbf{m}_{1,nk} + (\mathbf{I} + \Omega_2) \mathbf{R}_{2,k} (\mathbf{d}_{1,k} - \mathbf{d}_{2,k}). \end{aligned}$$

Отбрасывая члены второго порядка малости, получим

$$\begin{aligned} & (|\mathbf{d}_{2,k}| + \alpha_{12} u_{nk} + \alpha_{22} t_k u_{nk} + \beta_{12} v_{nk} + \beta_{22} t_k v_{nk}) \mathbf{m}_{2,nk} = \\ & = (|\mathbf{d}_{1,k}| + \alpha_{11} u_{nk} + \alpha_{21} t_k u_{nk} + \beta_{11} v_{nk} + \beta_{21} t_k v_{nk}) \mathbf{R}_{2,k} \mathbf{R}_{1,k}^T \mathbf{m}_{1,k} + \\ & + |\mathbf{d}_{1,k}| \Omega_2 \mathbf{R}_{2,k} \mathbf{R}_{1,k}^T \mathbf{m}_{1,nk} - \\ & - |\mathbf{d}_{1,k}| \mathbf{R}_{2,k} \mathbf{R}_{1,k}^T \Omega_1 \mathbf{m}_{1,nk} + (\mathbf{I} + \Omega_2) \mathbf{R}_{2,k} (\mathbf{d}_{1,k} - \mathbf{d}_{2,k}). \end{aligned} \quad (5)$$

Далее, привлекая известное соотношение

$$\Omega \mathbf{S}_{lk} = -[\mathbf{S}_{lk}]_{\times} \boldsymbol{\omega}, \quad (6)$$

где

$$\boldsymbol{\omega} = (\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z)^T; \quad [\mathbf{S}_{lk}]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -(S_{lk})_3 & (S_{lk})_2 \\ (S_{lk})_3 & 0 & -(S_{lk})_1 \\ -(S_{lk})_2 & (S_{lk})_1 & 0 \end{bmatrix},$$

приходим к системе линейных уравнений относительно 14-мерного вектора параметров $\boldsymbol{\theta} = (\omega_1^T \omega_2^T \alpha_{12} \alpha_{22} \beta_{12} \beta_{22} \alpha_{11} \alpha_{21} \beta_{11} \beta_{21})^T$:

$$|\mathbf{d}_{1,k}| \mathbf{R}_{2,k} \mathbf{R}_{1,k}^T [\mathbf{m}_{1,nk}]_{\times} \boldsymbol{\omega} -$$

$$\begin{aligned}
& -(|\mathbf{d}_{1,k}| [\mathbf{R}_{2,k} \mathbf{R}_{1,k}^T \mathbf{m}_{1,nk}]_x + [\mathbf{R}_{2,k} (\mathbf{d}_{1,k} - \mathbf{d}_{2,k})]_x) \omega_2 - \\
& - (\alpha_{11} u_{nk} + \alpha_{21} t_k u_{nk} + \beta_{11} v_{nk} + \beta_{21} t_k v_{nk}) \mathbf{R}_{2,k} \mathbf{R}_{1,k}^T \mathbf{m}_{1,nk} + \\
& + (\alpha_{12} u_{nk} + \alpha_{22} t_k u_{nk} + \beta_{12} v_{nk} + \beta_{22} t_k v_{nk}) \mathbf{m}_{2,nk} = \\
& = |\mathbf{d}_{1,k}| \mathbf{R}_{2,k} \mathbf{R}_{1,k}^T \mathbf{m}_{1,nk} + \mathbf{R}_{2,k} (\mathbf{d}_{1,k} - \mathbf{d}_{2,k}) - |\mathbf{d}_{2,k}| \mathbf{m}_{1,nk} + \xi. \quad (7)
\end{aligned}$$

Здесь индекс n «пробегают» значения от 1 до N . В результате суммарно по всем кадрам синхронной съемки имеем систему из NK линейных уравнений для оценивания вектора из 14 параметров: $\mathbf{P}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{g} + \xi$, где вид матрицы \mathbf{P} и вектора \mathbf{g} достаточно ясен из уравнения (7), а вектор погрешностей линейного представления ξ помимо случайных ошибок содержит методические ошибки аппроксимации. Метод наименьших квадратов дает искомое решение

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{P}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{g}. \quad (8)$$

Очевидно, что погрешность оценок углов систематической ошибки ориентации зависит от длины последовательности снимков K и числа сопряженных точек N , уверенно идентифицированных на данных снимках. Варьируя число опорных точек рельефа, число снимков в последовательности и уровень шума в проективных координатах опорных точек (в сопряженных точках), можно досконально исследовать статистические свойства получаемых оценок с помощью имитационной модели космической съемки.

Имитационная модель. Для экспериментальной проверки работоспособности и практической применимости исследуемых алгоритмов осуществлено моделирование космической съемки. В первую очередь учитывался характер перемещения спутниковой аппаратуры по орбитам, определяемым законами небесной механики и особенностями поверхности Земли. Положение плоскости орбиты (в геоцентрической системе координат) определяется двумя ее элементами: долготой восходящего узла λ_Ω и его наклоном (относительно плоскости экватора), которое обозначается символом i . Долгота восходящего узла измеряется дугой, отсчитываемой в плоскости экватора от Гринвичского меридиана.

Особенностью околоземных КА является близость их орбит к круговым, поэтому для практических расчетов трасс можно пользоваться формулами кругового движения [2]:

$$\varphi = \arcsin(\sin i \cdot \sin(2\pi(t/T))),$$

$$\lambda = \lambda_\Omega + \arctg(\cos i \cdot \tg(2\pi(t/T))) - \omega t,$$

где φ и λ – геоцентрические широта и долгота точки трассы; t – текущее время, отсчитываемое от момента прохождения спутником восходящего узла; T – период обращения КА по замкнутой орбите; ω – угловая скорость собственного вращения Земли.

В данной работе при моделировании съемки в геоцентрической системе координат вычислялось положение точки прицеливания камеры (центра сцены), а также положение спутника и предполагаемая ориентация оптической

оси камеры в текущий момент времени (внешние параметры съемки (\mathbf{R}, \mathbf{d})). Для этого предварительно задавались параметры орбиты (λ_Ω, i) , геоцентрические широта и долгота точки прицеливания $(\varphi_0$ и $\lambda_0)$, а также частота съемки. Переход от эллипсоидальных координат (φ, λ) к трехмерной прямоугольной системе координат с началом отсчета в центре эллипсоида (геоцентрической системы координат, где R – радиус Земли, H_0 – высота точки прицеливания) осуществлялся по известным формулам [2]:

$$\begin{aligned} X_0 &= r_0 \cos \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0, & Y_0 &= r_0 \cos \varphi_0 \cdot \sin \lambda_0, \\ Z_0 &= r_0 \sin \varphi_0, & r_0 &= R + H_0. \end{aligned}$$

Параллельно моделировался рельеф местности и задавались опорные точки сцены $\mathbf{M}_n = (X_n, Y_n, Z_n)^T$, $n = \overline{1, N}$, в локальной географической (топоцентрической) системе координат с центром в точке прицеливания.

Эта система имеет ось Z , обращенную в зенит, ось X , указывающую на юг, и ось Y , направленную на восток. В данной локальной системе координат положение оптического центра камеры в момент времени t задается азимутальным углом γ_t , углом склонения ε_t и расстоянием до начала координат d_t , $t \in (t_1, t_2, \dots, t_K)$, причем при съемке всей серии оптическая ось камеры предполагается направленной в заданную фиксированную точку пространства (точку наведения). Если (r_S, r_E, r_Z) – координаты спутника в данной топоцентрической системе, то расстояние до спутника равно $d = \sqrt{r_S^2 + r_E^2 + r_Z^2}$, угол склонения – $\arcsin(r_Z/d)$, а азимутальный угол – $\arctg(-r_E/r_S)$.

По этим данным определялись орбитальные системы координат для каждого спутника, в которых оси OZ совпадали с оптическими осями камер (в момент t_k) и были направлены от камер к сцене. Оси OX лежали в плоскости орбиты, задаваемой планируемыми направлениями оптических осей спутниковых камер. Тогда оси OY ортогональны данной плоскости и их направления должны образовывать правую тройку с осями OZ и OX . Орбитальные системы координат задаются тремя единичными ортогональными векторами

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{1zk} &= \mathbf{n}_{1k}, & \mathbf{e}_{yk} &= (\mathbf{n}_{1k} \times \mathbf{n}_{2k}) / |\mathbf{n}_{1k} \times \mathbf{n}_{2k}|, & \mathbf{e}_{1zk} &= \mathbf{e}_{yk} \times \mathbf{e}_{1zk}; \\ \mathbf{e}_{2zk} &= \mathbf{n}_{2k}, & \mathbf{e}_{yk} &= (\mathbf{n}_{1k} \times \mathbf{n}_{2k}) / |\mathbf{n}_{1k} \times \mathbf{n}_{2k}|, & \mathbf{e}_{2zk} &= \mathbf{e}_{yk} \times \mathbf{e}_{2zk}, \end{aligned}$$

где компоненты единичных векторов \mathbf{n}_{jk} , $j = 1, 2$, формирующие направление из начала локальной системы координат на камеры в момент съемки t_k :

$$n_{jkx} = \cos \varepsilon_{jk} \cdot \cos \gamma_{jk} = \frac{X_{jk}}{d_{jk}}; \quad n_{jky} = \cos \varepsilon_{jk} \cdot \sin \gamma_{jk} = \frac{Y_{jk}}{d_{jk}}; \quad n_{jkz} = \sin \varepsilon_{jk} = \frac{Z_{jk}}{d_{jk}},$$

определяются непосредственно положениями камер в текущий момент времени съемки:

$$\begin{aligned} X_{jk} &= r \cos \varphi_{jk} \cdot \cos \lambda_{jk}, & Y_{jk} &= r \cos \varphi_{jk} \cdot \sin \lambda_{jk}, \\ Z_{jk} &= r \sin \varphi_{jk}, & r &= R + H. \end{aligned}$$

Здесь H – высота орбиты спутника, предполагающаяся постоянной (круговая орбита).

Переход из локальной (топоцентрической) системы координат в бортовую на момент t_k , построенную вышеприведенным способом, осуществляется с помощью матрицы вращения, имеющей вид

$$\mathbf{R}_{jk} = \begin{bmatrix} [(\mathbf{n}_{1k} \times \mathbf{n}_{2k}) \times \mathbf{n}_{1k}]^T / |\mathbf{n}_{1k} \times \mathbf{n}_{2k}| \\ (\mathbf{n}_{1k} \times \mathbf{n}_{2k})^T / |\mathbf{n}_{1k} \times \mathbf{n}_{2k}| \\ \mathbf{n}_{1k}^T \end{bmatrix}.$$

В совокупности это позволяет вычисленные географические координаты элементов местности $\mathbf{M}_n = (X_n, Y_n, Z_n)^T$, $n = 1, N$, перевести в координаты их проекций на снимках (2).

В дополнение к данной модели задавались систематические ошибки ориентации камер (углы ω_{jX} , ω_{jY} , ω_{jZ}), вычислялись элементы матриц \mathbf{Q}_j и осуществлялась переориентация матриц вращения \mathbf{R}_{jk} в виде $\mathbf{Q}_j \mathbf{R}_{jk}$.

При моделировании к элементам векторов трансляции также добавлялся аддитивный шум, поскольку положение спутника на орбите определялось с некоторой случайной погрешностью. Аналогично к вычисленным положениям проективных координат (u_{nk}, v_{nk}) (2) добавлялся шум измерений. Моделируемая систематическая ошибка ориентации равнялась ± 36 угл. с вокруг осей крена, тангажа и курса для обеих камер. Также принималось во внимание аддитивное добавление к систематическим ошибкам в каждый момент съемки случайных ошибок, поскольку текущая ориентация в точку прицеливания осуществлялась разворотом внешнего зеркала, которое может совершать небольшие гармонические колебания около основного положения (дрожать). Среднеквадратичные отклонения случайной ошибки ориентации задавались величиной 1,8 угл. с. СКО шума в координатах вектора трансляции 7,5 м. Высота съемки 500 км, угол зрения камер 1,5°. Смоделированная ситуация космической съемки позволяет в соответствии с предложенным алгоритмом находить затем оценки заданных углов $\hat{\omega}_j = (\hat{\omega}_{jX}, \hat{\omega}_{jY}, \hat{\omega}_{jZ})^T$ и СКО этих оценок.

Экспериментальные результаты. Рассмотрим результаты экспериментального имитационного исследования метода аппроксимации ориентированной плоскостью. Прежде всего необходимо охарактеризовать величину методической погрешности, обусловленной ошибками аппроксимации. В соответствии с этим в табл. 1 даны значения СКО оценок углов (усредненные по двум камерам), характеризующих систематические ошибки ориентации при $N = 200$, длине серии снимков $K = 64$. Общий моделируемый перепад высот рельефа 200 м. (При моделировании в случае аппроксимации рельефа

Т а б л и ц а 1

σ_ξ	$\hat{\sigma}_{\omega_X}$	$\hat{\sigma}_{\omega_Y}$	$\hat{\sigma}_{\omega_Z}$
0	0,31"	1,71"	54,25"

плоскостью необходимо иметь в виду данный параметр.) СКО шума всех измеряемых величин здесь равно нулю.

Общая ситуация, когда СКО шума σ_ξ в измеряемой последовательности проективных координат элементов местности 0,1 дискрета, представлена

Т а б л и ц а 2

K	$\hat{\sigma}_{1, \omega_x}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_x}$	$\hat{\sigma}_{1, \omega_y}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_y}$	$\hat{\sigma}_{1, \omega_z}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_z}$
64	3,13"	1,77"	3,49"	3,27"	383,3"	317,7"
128	1,72"	1,27"	2,41"	2,19"	197,8"	166,9"

Т а б л и ц а 3

K	$\hat{\sigma}_{1, \omega_x}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_x}$	$\hat{\sigma}_{1, \omega_y}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_y}$	$\hat{\sigma}_{1, \omega_z}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_z}$
64	4,56"	2,57"	6,86"	5,98"	465,0"	386,0"
128	2,82"	1,47"	3,19"	3,25"	276,0"	247,0"

в табл. 2. Здесь даны значения СКО оценок углов крена, тангажа и курса («рыскания») $\hat{\omega}_j = (\hat{\omega}_{jX}, \hat{\omega}_{jY}, \hat{\omega}_{jZ})^T$, которые характеризуют систематические ошибки ориентации синхронных камер. Общий перепад высот рельефа 200 м. Время съемки 64 с. Частота съемки согласована с числом снимков ($K = 64$ и $K = 128$), $N = 200$.

Значения СКО оценок систематических ошибок ориентации синхронной пары камер при $\sigma_\xi = 0,3$ дискрета приведены в табл. 3. Общий перепад высот рельефа 200 м, $N = 200$.

Из сравнения табл. 2 и 3 видно, что вышеуказанный метод достаточно устойчив к шумам в сопряженных точках. Обращает на себя внимание большая погрешность оценивания угла курса, что, впрочем, характерно и для известного метода контрольных (полигонных) точек [1].

Следует отметить, что для метода аппроксимации ориентированной плоскостью важным фактором является величина общего перепада высот. Однако моделирование показало, что увеличение перепада высот до 400 м на обозреваемой сцене (~10–12 км) не сказывается существенно на точности оценивания углов ориентации камеры. Так, в табл. 4 даны значения СКО оценивания систематической ошибки ориентации при длине серии снимков $K = 128$, частоте съемки 2 кадр./с. СКО шума в измеряемой последовательности проективных координат элементов рельефа 0,3 дискрета. Общий перепад высот рельефа 400 м. В первом столбце приводится число сопряженных точек.

Результаты моделирования показывают принципиальную возможность уточнения параметров тангажа и крена спутниковой камеры на основе предложенного подхода. Тем не менее данный метод не пригоден при съемке местностей с большим перепадом высот, поскольку приближение ориентированной плоскостью будет приводить к достаточно большим методическим ошибкам. Рассмотрим метод, свободный от этого недостатка.

Аппроксимация эиполярных ограничений. В модели синхронной съемки (4) векторы $\hat{\mathbf{R}}_k \mathbf{M}_{1, nk}, \mathbf{M}_{2, nk} = Z_{2, nk} \mathbf{m}_{2, nk}$ и

Т а б л и ц а 4

N	$\hat{\sigma}_{\omega_x}$	$\hat{\sigma}_{\omega_y}$	$\hat{\sigma}_{\omega_z}$
120	3,39"	4,96"	447,0"
250	3,12"	3,92"	213,0"
400	2,40"	3,86"	152,0"

$\tilde{\mathbf{d}}_k$ лежат в одной плоскости (компланарны), поэтому для них должны выполняться эпполярные ограничения [3]

$$\mathbf{M}_{2, nk}^T (\tilde{\mathbf{d}}_k \times \tilde{\mathbf{R}}_k \mathbf{M}_{1, nk}) = 0. \quad (9)$$

Раскрывая значения векторов $\tilde{\mathbf{R}}_k \mathbf{M}_{1, nk}$ и $\tilde{\mathbf{d}}_k$, получаем выражение

$$Z_{1, nk} Z_{2, nk} \mathbf{m}_{2, nk}^T \times \\ \times (\mathbf{Q}_2 \mathbf{R}_{2, k} (\mathbf{d}_{1, k} - \mathbf{d}_{2, k}) \times \mathbf{Q}_2 \mathbf{R}_{2, k} \mathbf{R}_{1, k}^T \mathbf{Q}_1^T) \mathbf{m}_{1, nk} = 0, \quad n=1, \dots, N. \quad (10)$$

Данное соотношение принято записывать в виде $\mathbf{m}_{2, nk}^T \mathbf{E}_k \mathbf{m}_{1, nk} = 0$, где \mathbf{E}_k называется существенной матрицей [3]. В практике вычислений в формуле (9) векторное произведение заменяется матричным умножением, в результате существенная матрица факторизуется следующим образом:

$$\mathbf{E}_k = [\tilde{\mathbf{D}}_k]_{\times} \tilde{\mathbf{R}}_k. \quad \text{Здесь матрица } [\tilde{\mathbf{D}}_k]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -\tilde{d}_z & \tilde{d}_y \\ \tilde{d}_z & 0 & -\tilde{d}_x \\ -\tilde{d}_y & \tilde{d}_x & 0 \end{bmatrix} \text{ (кососимметрич-$$

ная) сформирована из элементов вектора $\tilde{\mathbf{d}}_k = [\tilde{d}_x \quad \tilde{d}_y \quad \tilde{d}_z]^T$. Формула (10) представляет собой билинейное соотношение проективных координат сопряженных точек (соответствующих идентифицированным контрольным элементам рельефа) на двух спутниковых камерах.

Выражение $\mathbf{m}_{2, nk}^T \mathbf{E}_k \mathbf{m}_{1, nk} = 0$ (когда n пробегает все возможные значения от 1 до N) можно записать в виде $\mathbf{A}_k \mathbf{e}_k = 0$, где 9-мерный вектор $\mathbf{e}_k = [E_{11} \quad E_{12} \quad \dots \quad E_{32} \quad E_{33}]^T$, а матрица \mathbf{A}_k размера $N \times 9$ составлена из элементов векторов $\mathbf{m}_{1, nk}$, $\mathbf{m}_{2, nk}$:

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} x_{1, 1k} x_{2, 1k} & y_{1, 1k} x_{2, 1k} & x_{2, 1k} & x_{1, 1k} y_{2, 1k} & y_{1, 1k} y_{2, 1k} & y_{2, 1k} & x_{1, 1k} & y_{1, 1k} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1, Nk} x_{2, Nk} & y_{1, Nk} x_{2, Nk} & x_{2, Nk} & x_{1, Nk} y_{2, Nk} & y_{1, Nk} y_{2, Nk} & y_{2, Nk} & x_{1, Nk} & y_{1, Nk} & 1 \end{bmatrix}.$$

Решением однородной системы уравнений является условный минимум квадратичной формы $\mathbf{e}_k^T \mathbf{A}_k^T \mathbf{A}_k \mathbf{e}_k$ (при $\mathbf{e}_k^T \mathbf{e}_k = 1$), представляющий собой собственный вектор симметричной матрицы $\mathbf{A}_k^T \mathbf{A}_k$, соответствующий минимальному собственному значению [4].

Моделирование показывает, что прямой метод оценивания матрицы \mathbf{Q} на основе эпполярных ограничений (9) (инвариантный относительно неизвестных параметров Z_{nk}) не позволяет получать достаточно точные значения систематических ошибок углов ориентации камеры. Неустойчивость метода обусловлена нелинейностью процесса оценивания и большой чувствительностью получаемых оценок к шумам в исходных данных, поэтому линеаризуем метод. Для этого, как и ранее, учтем, что при малых погрешностях

углов ориентации камеры справедлива аппроксимация $\mathbf{Q} \approx \mathbf{I} + \Omega$, где $\Omega =$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -\omega_Z & \omega_Y \\ \omega_Z & 0 & -\omega_X \\ -\omega_Y & \omega_X & 0 \end{bmatrix}, \text{ а } \omega_X, \omega_Y, \omega_Z - \text{ систематические ошибки углов поворо-}$$

та камеры вокруг соответствующих осей. Кроме того, чтобы использовать данную аппроксимацию, запишем билинейное соотношение (10) в модифицированном виде, основываясь на свойствах смешанного (векторно-скалярного) произведения ($\mathbf{a}(\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = \mathbf{c}(\mathbf{a} \times \mathbf{b})$), так что верно соотношение

$$(\mathbf{Q}_2 \mathbf{R}_{2,k} \mathbf{R}_{1,k}^T \mathbf{Q}_1^T \mathbf{m}_{1,nk})^T ([\mathbf{m}_{2,nk}]_{\times} \mathbf{Q}_2 \mathbf{R}_{2,k} (\mathbf{d}_{1,k} - \mathbf{d}_{2,k})) = 0. \quad (11)$$

Привлекая аппроксимацию матриц $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$, а также соотношение (6) и ограничиваясь членами первого порядка малости, приводим (11) к виду

$$\begin{aligned} & \mathbf{m}_{1,nk}^T [\mathbf{R}_{1,k} \mathbf{R}_{2,k}^T [\mathbf{m}_{2,nk}]_{\times} \mathbf{R}_{2,k} (\mathbf{d}_{1,k} - \mathbf{d}_{2,k})] \omega_1 + \mathbf{m}_{1,nk}^T \mathbf{R}_{1,k} \mathbf{R}_{2,k}^T \times \\ & \times \{ [\mathbf{m}_{2,nk}]_{\times} [\mathbf{R}_{2,k} (\mathbf{d}_{1,k} - \mathbf{d}_{2,k})]_{\times} - [[\mathbf{m}_{2,nk}]_{\times} \mathbf{R}_{2,k} (\mathbf{d}_{1,k} - \mathbf{d}_{2,k})]_{\times} \} \omega_2 = \\ & = \mathbf{m}_{1,nk}^T \mathbf{R}_{1,k} \mathbf{R}_{2,k}^T [\mathbf{m}_{2,nk}]_{\times} \mathbf{R}_{2,k} (\mathbf{d}_{1,k} - \mathbf{d}_{2,k}) + \xi_{kn}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\omega_i = (\omega_{i,X}, \omega_{i,Y}, \omega_{i,Z})^T$, $i=1,2$; ξ_{kn} – вектор ошибок данного представления.

В результате для последовательности сопряженных точек по всем кадрам синхронной съемки, соответствующих N элементам рельефа, необходимо оценивать вектор из шести параметров $\boldsymbol{\theta} = (\omega_{1,X}, \omega_{1,Y}, \omega_{1,Z}, \omega_{2,X}, \omega_{2,Y}, \omega_{2,Z})^T$: $\mathbf{B}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{S} + \Xi$, где вид $(NK \times 6)$ -матрицы \mathbf{B} и $(NK \times 1)$ -вектора \mathbf{S} достаточно ясен из системы уравнений (12). Метод наименьших квадратов, минимизирующий длину вектора остатков, дает оценку вектора параметров в обычном виде:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{S}. \quad (13)$$

При точно заданной регрессионной матрице \mathbf{B} эта оценка является несмещенной с минимальной дисперсией. Однако привлеченная аппроксимация приводит к тому, что элементы регрессионной матрицы содержат ошибки, поэтому оценка (13) может быть смещенной (содержать методическую погрешность).

Результаты моделирования. Рассмотрим полученные погрешности оценивания метода аппроксимации эпиполярных ограничений. Моделируемая систематическая ошибка ориентации равнялась ± 36 угл. с вокруг осей крена, тангажа и курса.

Усредненные по паре камер значения СКО оценивания систематической ошибки ориентации при числе опорных точек сцены $N = 300$, длине серии снимков $K = 64$ и частоте съемки 1 кадр./с представлены в табл. 5. В первом столбце приводятся значения СКО шума в измеряемой последова-

Т а б л и ц а 5

σ_{ξ}	$\hat{\sigma}_{\omega_X}$	$\hat{\sigma}_{\omega_Y}$	$\hat{\sigma}_{\omega_Z}$
0	0,008"	0,017"	0,02"
0,1	1,130"	7,580"	15,70"
0,3	1,210"	21,250"	41,30"

тельности проективных координат элементов рельефа (в дискретах). Здесь первая строка может характеризовать величину методической погрешности, поскольку исходные данные моделировались без шума измерений. Хорошо видно, что такой погрешностью можно пренебречь, поскольку из табл. 5 следует, что определяющим фактором служит величина шума в измеряемых проективных координатах элементов местности (характеризуемых последовательностью сопряженных точек на снимках).

Кроме того, к систематическим ошибкам в каждый момент съемки аддитивно добавляются случайные ошибки. СКО случайной ошибки ориентации задавалось 1,8 угл. с, СКО шума в координатах вектора трансляции 7,5 м. Высота съемки 500 м, угол зрения камер 1,5°. В табл. 6 приведены СКО ошибок оценивания углов ориентации в зависимости от длины стереопоследовательности синхронных снимков K (первый столбец). Время съемки 64 с. Частота съемки согласована с числом снимков. Число сопряженных точек $N = 300$. СКО шума в измеряемой стереопоследовательности проективных координат элементов рельефа 0,1 дискрета.

СКО ошибок оценивания углов ориентации в зависимости от длины стереопоследовательности, когда СКО шума в измеряемой последовательности проективных координат элементов рельефа 0,3 дискрета, представлены в табл. 7. Видно, что метод аппроксимации чувствителен к величине шума в последовательности сопряженных точек. Увеличение времени съемки до 128 с позволяет существенно улучшить точность оценивания систематиче-

Т а б л и ц а 6

K	$\hat{\sigma}_{1, \omega_x}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_x}$	$\hat{\sigma}_{1, \omega_y}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_y}$	$\hat{\sigma}_{1, \omega_z}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_z}$
64	2,68"	2,48"	10,07"	12,15"	14,19"	15,22"
128	1,61"	1,76"	9,39"	9,44"	9,28"	9,50"
256	1,35"	1,34"	9,18"	9,41"	7,88"	7,28"

Т а б л и ц а 7

K	$\hat{\sigma}_{1, \omega_x}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_x}$	$\hat{\sigma}_{1, \omega_y}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_y}$	$\hat{\sigma}_{1, \omega_z}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_z}$
64	2,22"	2,11"	25,85"	27,49"	34,07"	31,84"
128	1,59"	1,67"	26,68"	24,64"	25,38"	29,91"
256	1,14"	1,14"	21,65"	23,87"	21,37"	17,84"

Т а б л и ц а 8

K	$\hat{\sigma}_{1, \omega_x}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_x}$	$\hat{\sigma}_{1, \omega_y}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_y}$	$\hat{\sigma}_{1, \omega_z}$	$\hat{\sigma}_{2, \omega_z}$
64	1,02"	0,87"	4,19"	4,95"	12,57"	12,01"
128	0,91"	1,09"	4,72"	4,54"	7,68"	7,61"
256	0,72"	0,68"	3,53"	3,35"	5,97"	6,37"

ских ошибок ориентации. Соответствующие результаты для СКО шума в измеряемой последовательности проективных координат элементов рельефа в 0,3 дискрета представлены в табл. 8. Из последней строки таблицы следует, что предложенный метод дает практически удовлетворительные оценки систематических ошибок всех углов ориентации спутниковой камеры.

Заключение. В данной работе развиты методы одновременного уточнения параметров абсолютной ориентации двух спутниковых камер по серии космических стереоснимков с общей точкой наведения, а также предложена методика программно-алгоритмического исследования этой проблемы.

Реализация изложенной методики в модели космической стереосъемки дала возможность получить экспериментальные зависимости погрешностей оценивания углов абсолютной ориентации от числа снимков и от уровня шума в проективных координатах изображений элементов местности. Определены области применения представленных методов, позволяющие рекомендовать их в практических разработках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Киричук В. С., Косых В. П., Перетягин Г. И.** Прецизионное оценивание параметров абсолютной ориентации спутниковой камеры // Автометрия. 2003. **39**, № 6. С. 46.
2. **Гонин Г. Б.** Космические съемки Земли. Л.: Недра, 1989.
3. **Форсайт Д., Понс Ж.** Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004.
4. **Голуб Дж., Ван Лоун Ч.** Матричные вычисления. М.: Мир, 1999.

Поступила в редакцию 2 августа 2006 г.