# Калибровка съемочной аппаратуры космического аппарата «Канопус-В» в процессе его эксплуатации

### А.И. Васильев

## 3AO «СТТ груп», Москва,111024, Россия E-mail:ahbac@mail.ru

В статье рассматривается задача калибровки параметров съемочной аппаратуры космического аппарата (КА) «Канопус-В». Характерными особенностями этой аппаратуры являются: 1) наличие нескольких полей зрения – в фокальной плоскости находится 6 непересекающихся ПЗС-матриц; 2) существенно узкоугольная оптическая схема – угол зрения менее 3°. В работе показано, что традиционный подход на основе минимизации ошибки перепроецирования не применим к калибровке параметров этой камеры, поскольку приводит к значительным ошибкам в определении положения микрокадров (формируется каждой ПЗС-матрицей) – более 1000 пикс. Учет показаний навигационных датчиков и результатов предполетной калибровки позволяет определить положения микрокадров с точностью не хуже 15 пикс. (3 σ).

В статье приведено восстановление параметров камеры на основе опорных точек на заданный район местности (г. Пятигорск). Восстановленная модель камеры использовалась для построения фотосхемы на основе технологии обработки данных кадровой аэрофотосъемки. Применяемая технология обработки включает несколько ключевых этапов: 1) формированиеединых кадров на основе микрокадров и их известных положений относительно главной точки снимка; 2) поиск связующих точек между едиными кадрами; 3) аэрофототриангуляция; 4) трансформирование единых кадров и сшивка. Приведенная технология применялась для построения фотосхемы по данным с КА «Канопус-В» в окрестности г. Мемфис. На результирующей фотосхеме наблюдались линии разрывов (СКО разрывов ~7 пикс.). Разрывы обуславливаются низкой точностью калибровки параметров камеры, в частности, точность положений микрокадров относительно главной точки снимка ~5 пикс. (1 σ).

С целью построения без разрывных фотосхем в работе предлагается рассматривать сложную оптическую систему с 6 полями зрения в виде 6 независимых кадровых камер. На основе предлагаемого модифицированного подхода удалось сформировать фотосхему безлиний разрывов (СКО ошибки перепроецирования на связующих точках ~1 пикс.).

Ключевые слова: космический аппарат «Канопус-В», калибровка, узкоугольная камера, несколько полей зрения

#### Введение

В 2012 г. были запущены два идентичных космических аппарата для дистанционного зондирования Земли – «Канопус-В» и «БелКА» (Владимиров и др., 2008). В этих аппаратах используется малораспространенный среди систем ДЗЗ космического базирования подход к проведению фотосъемки – зондирование выполняется на основе технологии кадровой аэрофотосъемки.

Для решения тематических целевых задач данные, поступающие от космических аппаратов «Канопус-В» и «БелКА», предварительно подвергаются фотограмметрической обработке, заключающейся в формировании фотосхем местности на основе информации от навигационных датчиков, известных параметрах съемочной аппаратуры, а также геометрической модели рельефа наблюдаемой местности.

На *рис. 1* приведена схема расположения матриц в фокальной плоскости камеры КА «Канопус-В». Формирование фотосхем местности на основе таких конструктивных особенностей камеры обеспечивается за счет поперечного перекрытия между смежными включениями и продольного перекрытия между через-1-смежными включениями съемочной аппаратуры. (В дальнейшем под микрокадром будем понимать растровое изображение, формируемое одной из ПЗС-матриц, полем зрения, то есть каждое включение обеспечивает формирование 6 микрокадров.)



Рис. 1. Схема расположения шести ПЗС-матриц в фокальной плоскости камеры КА «Канопус-В» (панхроматический канал)

В работах (Кравцова, Некрасов, 2011) и (Некрасов, 2012) описана технология фотограмметрической обработки снимков с КА «Канопус-В» на основе синтетических данных. Она основывается на предположении о том, что для каждого микрокадра существует дробно-рациональная полиномиальная функция (Grodecki, 2001), устанавливающая связь точек местности и пиксельных координат микрокадра. Расчет параметров этой функции для каждого микрокадра осуществляется на основе конструктивных особенностей параметров съемочной аппаратуры и навигационных данных. Предлагаемая авторами в работах (Кравцова, Некрасов, 2011) и (Некрасов, 2011, 2012) технология включает следующие основные этапы: 1) поиск связующих точек в области перекрытия микрокадров; 2) набор опорных точек; 3) уравнивание линейной поправки каждой из рациональных полиномиальных функций рассматриваемых микрокадров; 4) трансформирование микрокадров на основе уточненных параметров дробно-рациональной функции и модели рельефа.

Неоспоримым преимуществом описанной технологии является возможность ее реализации в большинстве современных фотограмметрических пакетах, поддерживающих такой подход к обработке. К недостаткам же следует отнести трудоемкость, связанную с формированием проекта, включающего сотни микрокадров, поиском связующих точек в областях перекрытия микрокадров, а также измерением опорных точек, количество которых определяют точность географической привязки формируемого фотоплана (Некрасов, 2012).

С целью рассмотрения возможности фотограмметрической обработки данных, учитывающей особенности технологии зондирования, в данной работе исследован вопрос калибровки съемочной аппаратуры КА «Канопус-В».

# Моделирование калибровки камеры КА «Канопус-В» в процессе его эксплуатации

Рассмотрим положение матриц микрокадров в фокальной плоскости объектива и преобразования между системой координат, связанной с главной точкой единого кадра (пересечение оптической оси и плоскости, в которой лежат ПЗС-матрицы). Под единым кадром будем понимать кадр, формируемой эквивалентной камерой, у которой матрица содержит (включает) матрицы микрокадров, а пиксели вне матриц микрокадров являются неактивными.

Введем обозначения:

 $O_r x_r y_r$  – система координат (СК) растрового изображения единого кадра, начало этой СК совпадает с верхним левым углом единого изображения (*puc. 2*);

Oxy – пиксельная СК единого кадра, начало этой СК совпадает с центром фотографирования, СК задается путем параллельного переноса СК  $O_r x_r y_r$  на вектор  $\vec{r_o}$ . Кроме того, ось Oyпараллельна строительной оси КА и направлена противоположно вектору скорости КА;

 $O_i x_i y_i$  – СК растрового изображения *i*-той матрицы, начало этой СК связано с левым верхним углом матрицы рассматриваемого кадра, ось  $O_i y_i$  направлена вдоль положительного направления строк матрицы, ось  $O_i x_i$  направлена вдоль положительного направления столбцов матрицы;

 $\overline{p_{K}}$  – положение некоторой точки *K* растрового изображения *i*-го кадра;

 $\vec{q}_{K}$  – положение точки *K i*-го кадра в СК единого кадра;

 $p_{\rm K}\,$ – биективное преобразование между СК единого кадра и СК i-го кадра.



Рис. 2. Связь систем координат растровых изображений PSS-матриц и растрового изображения единого кадра

Поскольку все матрицы лежат в фокальной плоскости, введем допущение: преобразование **Т** является линейным (не сложнее аффинного). Запишем связь пиксельных координат точки на микрокадре и в СК единого кадра:

$$\overrightarrow{q_K} = \mathbf{T}(\overrightarrow{\theta_i}) \cdot \begin{bmatrix} \overrightarrow{p_K} & 1 \end{bmatrix}^T,$$
(1)

где  $T(\vec{\theta}_i)$  – матрица линейного преобразования размерностью 2×3, определяется вектором параметров  $\vec{\theta}_i$ .

На основе (Боярчук и др., 2011) можно ввести два предположения: преобразование между СК микрокадров и СК единого кадра соответствует параллельному переносу (конструктивные особенности расположения матриц); отсутствует дисторсия (угол обзора менее 3°). Тогда имеет место соотношение (записанное с использованием однородных координат):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} -f_x & 0 & -u_k \\ 0 & f_y & -v_k \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \mid \vec{C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}},$$
(2)

где  $\{\vec{C}, \mathbf{A}\}$  – положение начала координат локальной СК в СК камеры и матрица поворотов  $\mathbf{A} = \mathbf{A}(\vec{\gamma})$  из локальной СК в СК камеры *i*-го включения, задается вектором угловых координат  $\vec{\gamma}$ ;

 $\{f_x, f_y\}$  – пиксельные размеры фокусного расстояния;

 $\vec{\theta}_{k} = \begin{bmatrix} u_{k} & v_{k} \end{bmatrix}^{T}$  – положение *k*-го микрокадра относительно главной точки единого снимка (в пикс.);

 $\vec{R} = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}^{T}$  – координаты прообраза наблюдаемой опорной точки в локальной СК;  $\vec{p} = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}^{T}$  – пиксельные координаты образа наблюдаемой опорной точки на *k*-м микрокадре.

Рассмотрим математическую постановку задачи калибровки параметров камеры на основе принципа максимального правдоподобия:

$$\Theta^* = \operatorname{argmax}_{\Theta} \prod_{j=1}^{n} p(\overrightarrow{p_j} | \Theta, \overrightarrow{R_j}), \qquad (3)$$

где  $\Theta^* = \{\overrightarrow{\theta^*}, \overrightarrow{\gamma^*}, \overrightarrow{C^*}\}$  – наиболее вероятные внешние  $(\overrightarrow{\gamma^*}, \overrightarrow{C^*})$  и внутренние  $\overrightarrow{\theta^*}$  параметры камеры;  $\{\overrightarrow{p_j}, \overrightarrow{R_j}\}$  – множество опорных точек, заданных парами пиксельных координат и координат точек местности.

Введем предположение (Hartley, Zisserman, 2003): ошибка измерения наблюдаемых точек сцены на снимках соответствует распределению Гаусса:

$$p(\overrightarrow{p_j}|\overrightarrow{R_j}) \sim N(Proj(\overrightarrow{R_j},\Theta),\sigma_{pix}^2),$$

где  $\vec{p} = Proj(\vec{R}, \Theta)$  – проецирование наблюдаемой точки сцены на основе параметров камеры  $\Theta$ , соответствует соотношению (2);  $\sigma_{pix}$  – среднее квадратичное отклонение (СКО) ошибки измерения опорных точек на снимках.

Соотношение (3) можно свести к задаче минимизации ошибки перепроецирования

$$\Theta^* = \min_{\Theta} \sum_{j=1}^{n} \left\| \Pr{oj\left(\overrightarrow{R_j}, \Theta\right) - \overrightarrow{p_j}} \right\|^2.$$
(4)

Это традиционная математическая постановка задачи калибровки параметров камеры (Hartley, Zisserman, 2003). Результаты численного моделирования (методом Монте-Карло) калибровки камеры приведены на *рис. 3*. СКО ошибки определения положения микрокадров в СК единого кадра существенно более 1000 пикс. (систематическая ошибка, т.е. по результатам калибровки группа из 6 микрокадров и главные точки сдвинуты друг относи-



Рис. 3. СКО ошибки (в пикс.) определения положения микрокадра в СК единого кадра (СКО вычисляется для 6 микрокадров)

тельно друга более, чем на 1000 пикс.), при СКО ошибки перепроецирования ~0,25 пикс. Полученные результаты демонстрируют невозможность применения традиционного подхода для геометрической калибровки камеры КА «Канопус-В».

При моделировании использовались следующие параметры (в качестве неизвестных внутренних параметров камеры выступали координаты положений микрокадров в СК единого кадра):

- матрица кадра 83,2×21,5 мм<sup>2</sup>; фокусное расстояние 1,797 м;
- 6 микрокадров;
- высота орбиты 512 км; крен/тангаж [-5°; 5°];
- количество точек на микрокадр (равномерно распределены) 5;
- количество последовательных включений 4;
- перепад высот 500 м;
- точность измерения опорных точек 0,4 пикс.;
- СКО положения 10 м; СКО углов 10".

Важная особенность камеры КА «Канопус-В» – это узкоугольная камера с очень малым углом поля зрения  $FoV < 3^{\circ}$  (Боярчук и др., 2011). Согласно работе (Strobl, Sepp, Hirzinger, 2009) ошибка  $\varepsilon$  определения внешних параметров камеры (на основе множества опорных точек, измеренных с точностью ~0,4 пикс.) асимптотически стремится к бесконечности при уменьшении угла поля зрения FoV (до нуля):

$$\lim_{FoV \to 0} \varepsilon = \infty \,. \tag{5}$$

Для калибровки узкоугольной камеры, установленной на робота-манипулятора, в работе (Strobl, Sepp, Hirzinger, 2009) авторами предлагается учитывать положение и ориентацию камеры, известные с заданной точностью. Применим рассматриваемый авторами прием для калибровки камеры КА «Канопус-В». С этой целью перепишем соотношение (3) с учетом наличия

показаний датчиков положения и углов, а также условия независимости измерений. При этом введем допущение: датчики положения и углов измеряют линейные и угловые координаты центра фотографирования камеры с известной точностью. Тогда имеет место соотношение:

$$\Theta^* = \arg\max_{\Theta} p(\vec{\gamma}_0 \mid \vec{\gamma}) \cdot p(\vec{C}_0 \mid \vec{C}) \cdot \prod_{j=1}^n p(\vec{p}_j \mid \vec{\theta}, \Theta),$$
(6)

где  $\Theta^* = \{\vec{\theta^*}, \vec{\gamma^*}, \vec{C^*}\}$  – наиболее вероятные внешние  $(\vec{\gamma^*}, \vec{C^*})$  и внутренние  $\vec{\theta^*}$  параметры камеры;  $\vec{\gamma_0}$  – вектор углов – показание датчика углов;  $\vec{C_0}$  – вектор координат – показание датчика линейных координат.



а) учет показаний навигационных датчиков

б) учет показаний навигационных датчиков, а также результатов наземной калибровки

Рис. 4. СКО ошибки (в пикс.) определения положения микрокадра в СК единого кадра (СКО вычисляется для 6 микрокадров) при калибровке, учитывающей показания навигационных датчиков

Введем предположение: ошибка измерения датчиков углов и линейных координат удовлетворяет нормальному распределению. Тогда соотношение (6) можно переписать в следующем виде (Strobl, Sepp, Hirzinger, 2009):

$$\Theta^* = \min_{\Theta} \sum_{j=1}^{n} \left\| \Pr oj\left(\overrightarrow{R_j}, \Theta\right) - \overrightarrow{p_j} \right\|^2 + \frac{\sigma_{pix}^2}{\sigma_{ang}^2} \left\| \overrightarrow{\gamma} - \overrightarrow{\gamma_0} \right\|^2 + \frac{\sigma_{pix}^2}{\sigma_{pos}^2} \left\| \overrightarrow{C} - \overrightarrow{C_0} \right\|^2, \tag{7}$$

где  $\sigma_{pix}$  – СКО измерения опорных точек;  $\sigma_{ang}$  – СКО измерения углов;  $\sigma_{pos}$  – СКО измерения положения.

Результаты численного моделирования калибровки параметров узко угольной камеры приведены на *рис. 4a*. СКО ошибки определения положения микрокадров в СК единого кадра не более 25 пикс., при СКО ошибки перепроецирования ~0,27 пикс.

С целью повышения точности калибровки в этой работе предлагается учитывать результаты наземной калибровки, а именно положение микрокадров в СК единого кадра, фокусное расстояние и другие параметры, которые были определены на этапе предполетной калибровки. Для этого введем еще одно предположение: физические воздействия на съемочную аппаратуру приводят к изменению параметров камеры в окрестности результатов наземной калибровки. В соответствии с введенным предположением перепишем соотношение (7) следующим образом:

$$\Theta^* = \min_{\Theta} \sum_{j=1}^{n} \left\| \Pr oj\left(\overrightarrow{R_j}, \Theta\right) - \overrightarrow{p_j} \right\|^2 + \frac{\sigma_{pix}^2}{\sigma_{ang}^2} \left\| \overrightarrow{\gamma} - \overrightarrow{\gamma_0} \right\|^2 + \frac{\sigma_{pix}^2}{\sigma_{pos}^2} \left\| \overrightarrow{C} - \overrightarrow{C_0} \right\|^2 + \frac{\sigma_{pix}^2}{\sigma_{int}^2} \sum_k \left\| \overrightarrow{\theta_k} - \overrightarrow{\theta_k^0} \right\|^2, \quad (8)$$

где  $\sigma_{int}$  – СКО пиксельного положения микрокадров (является неизвестным параметром);  $\vec{\theta}_k^{\vec{0}}$  –пиксельное положение *k*-го микрокадра, вычисленное при наземной калибровке.

Для минимизации выражения (8) будем использовать подход на основе ЕМ-алгоритма:

- шаг максимизации: минимизация (8), при фиксированном значении  $\sigma_{int}$ ;
- шаг ожидания: вычисление  $\sigma_{int}$  на основе вычисленных на шаге максимизации положений микрокадров  $\{\vec{\theta_k}\}$ .

$$\sigma_{\rm int} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{k=1}^{N} \left\| \overrightarrow{\theta_k} - \overrightarrow{\theta_k^0} \right\|^2},\tag{9}$$

где *N* – количество микрокадров.

Результаты численного моделирования калибровки параметров узкоугольной камеры с учетом результатов наземной калибровки приведены на *рис. 46.* (СКО положения микрокадров по результатам наземной калибровки относительно истинного положения – 10 пикс.). СКО ошибки определения положения микро кадров в СК единого кадра можно считать не более 15 пикс., при СКО ошибки перепроецирования ~0,31 пикс.

Таким образом, на основе моделирования показано, что учет навигационных данных (Strobl, Sepp, Hirzinger, 2009) позволяет сократить точность определения положения микрокадров в СК единого кадра на 2 порядка – до 20 пикс. (3 σ). В свою очередь, учет еще и результатов наземной калибровки позволяет улучшить точность определения – до 15 пикс. (3 σ).

# Обсуждение результатов моделирования калибровки параметров камеры КА «Канопус-В»

Точность определения положения микрокадров в СК единого кадра в 5 пикс.  $(1 \sigma)$  будет приводить к существенным разрывам на формируемых фотосхемах. Таким образом, конструктивные особенности камеры не обеспечивают возможность калибровки камеры с точностью не хуже 1 пикс. для построения безразрывных фотопланов (в соответствии с технологией зондирования), предназначенных для мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций, обнаружения очагов лесных пожаров, выбросов загрязняющих веществ в природную среду и др. (Боярчук и др., 2011).

Технология обработки данных с КА «Канопус-В», приведенная в работах (Кравцова, Некрасов, 2011; Некрасов, 2012), рассматривает каждый микрокадр как изображение, формируемое по данным сканерной съемки и сопровождаемое коэффициентами дробно-рациональной полиномиальной функции (Grodecki, 2001). В данной работе предлагается технология, в рамках которой каждый микрокадр рассматривается как изображение, формируемое кадровой аэрофотокамерой. Обработка данных разделена на следующие основные этапы:

- 1. поиск связующих точек между микрокадрами имеющими область перекрытия;
- 2. аэрофототриангуляция маршрута микрокадров;
- 3. трансформирование микрокадров на основе заданной модели рельефа, формирование единого изображения местности.

С целью обработки данных с использованием приведенной технологии предварительно для каждой ПЗС-матрицы вычисляется модель эквивалентной кадровой камеры, способной формировать кадр, соответствующий микрокадру рассматриваемой матрицы. Таким образом, камера КА «Канопус-В», являющаяся системой с несколькими полями зрения, рассматривается как совокупность из 6 кадровых камер.

#### Эксперимент по обработке данных с КА «Канопус-В»

Восстановление параметров камеры съемочной аппаратуры КА «Канопус-В» включало определение пиксельных координат опорных точек местности на микрокадрах маршрута и калибровку на основе модификации соотношения (8) в виде:

$$\Theta^* = \min_{\Theta} \sum_{j=1}^{n} \left\| \Pr oj\left(\vec{R_j}, \Theta\right) - \vec{p_j} \right\|^2 + \frac{\sigma_{pix}^2}{\sigma_{pos}^2} \left\| \vec{C} - \vec{C_0} \right\|^2 + \frac{\sigma_{pix}^2}{\sigma_{int}^2} \sum_k \left\| \vec{\theta_k} - \vec{\theta_k} \right\|^2.$$
(10)

Эта модификация обусловлена тем, что: 1) перекос между СК датчика углов и СК камеры неизвестен; 2) наличие результатов наземной калибровки съемочной аппаратуры, а также точность определения положения камеры существенны; 3) допущение о совпадении центра фотографирования и расположения датчика линейных координат приемлемо, поскольку СКО определения положения (~10 м) существенно меньше геометрических размеров космического аппарата (~1 м).

Для восстановления параметров камеры было измерено около 150 точек на 4 включения съемочной аппаратуры съемки в окрестности г. Пятигорска, перепад высот на местности, составил около 500 м. В результате калибровки были определены координаты положения микрокадров относительно СК единого кадра. Продольное перекрытие между микрокадрами составило 54-57 пикс., поперечное – 71-74 пикс., тогда как согласно техническим характеристикам (Владимиров и др., 2008; Боярчук и др., 2011) продольное перекрытие между микрокадрами составляет около 80 пикс., поперечное – около 60 пикс. Ошибка перепроецирования составила менее 2 пикс. Единый кадр, соответствующий одномоментному включению съемочной аппаратуры и построенный на основе результатов калибровки, показан на *рис. 5*.



Рис. 5. Пример единого кадра, построенного на основе результатов калибровки



Рис. 6. Результат обработки маршрута в районе г. Мемфис (состоит из 41 включения, 245 микрокадров)

С использованием программного обеспечения (Васильев, Крылов, Вахонин, 2011) была выполнена обработка маршрута из 41 включения на основе технологии кадровой аэрофотосъемки (см. *рис. 6*). Обработка выполнялась:

1. для одномоментных включений в виде единых кадров;

2. для микрокадров в виде независимых кадров соответствующих эквивалентных камер.

В первом случае ошибка перепроецирования на связующих точках составила около 7 пикс., во втором – около 1 пикс. На *рис.* 7 приведены фрагменты наблюдаемых разрывов на сформированной фотосхеме для различных технологий фотограмметрической обработки.

#### Заключение

В статье рассмотрена задача калибровки параметров съемочной аппаратуры КА «Канопус-В» в процессе эксплуатации с целью анализа возможности проведения обработки данных на основе «строгого» подхода, а именно подхода к обработке, соответствующего



а) Фотосхема построена на основе трансформирования растровых данных по известным показаниям навигационных датчиков, параметры камеры определены путем калибровки (по данным маршрута г. Пятигорск). СКО разрывов ~30 пикс.



б) Фотосхема построена на основе технологии обработки данных кадровой аэрофотосъемки для единых кадров (см. рис. 5), параметры камеры определены путем калибровки (по данным маршрута г. Пятигорск). СКО разрывов ~7 пикс.



в) Фотосхема построена на основе технологии обработки данных кадровой аэрофотосъемки, при этом предполагается, что каждое включение (см. рис. 5), состоящее из 6 микрокадров, формируется по данным от 6 кадровых камер, параметры которых были рассчитаны путем калибровки (г. Пятигорск)

Рис. 7. Фрагменты фотосхемы, построенной по данным маршрута съемки г. Мемфис (41 включение) на основе различных технологий. На фрагментах демонстрируется качество (безразрывность) сформированных фотосхем технологии зондирования. Исследование традиционного подхода к калибровке параметров камеры на основе решения задачи минимизации ошибки перепроецирования показало невозможность его применения в связи с ошибкой определения параметров камеры более 1000 пикс. Предложенная модификация, учитывающая ограничения от навигационных датчиков и результатов наземной (предполетной) калибровки, позволила сократить верхнюю границу этой ошибки до 15 пикс.

Проведенные эксперименты показали, что обработка данных на основе технологии кадровой аэрофотосъемки для одномоментных включений (обработка данных от камеры с несколькими полями зрения) будет приводить к существенным разрывам на фотосхемах – до 20 пикс. С целью разрешения этой проблемы была предложена технология, в которой используется допущение о независимости съемки каждого микрокадра, то есть вместо камеры с несколькими полями зрения рассматривается несколько независимых кадровых камер. С использованием этой технологии удалось сформировать фотосхему, у которой ошибка перепроецирования на связующих точках составила около 1 пикс.

#### Литература

- 1. Боярчук К.А., Волков С.Н., Горбунов А.В. и др. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В» №1. М.: ФГУП «НППВНИЙЭМ», 2011. 110 с.
- 2. Васильев А.И., Крылов А.В., Вахонин А.В. Применение графических процессоров NVIDIA в задачах фотограмметрической обработки результатов ДЗЗ. // Сборник материалов Юбилейной конференции, посвященной 50-летию полета в космос Ю.А.Гагарина, 20-21 апреля 2011г., Москва, ОАО «НИЙ ТП», С. 114-117.
- 3. Владимиров А.В., Салихов Р.С., Сеник Н.А., Золотой С.А. Космическая система оперативного мониторин-силиков 7.2., Селиков 7.2., Селиков 7.2., Селик 71.7., Золотой С.А. Коемическая система оперативного мониторин-га техногенных и природных чрезвычайных ситуаций на базе КК «Канопус-В» и белорусского космиче-ского аппарата.//Вопросы электромеханики. 2008. №105(1). С. 49–57.
   Кравцова Е.В., Некрасов В.В. Технология обработки в ЦФС Photomod снимков перспективного КА
- «Канопус-В».//Геопрофи. 2011. № 5. С. 49-52.
- 5. Некрасов В.В.Технология обработки снимков КА «Канопус-В» и БКА в картографических целях.// Сборник статей по итогам торжественного заседания посвященного 200-летию Российской военной топографической службы. Москва, 2012. С. 87-91.
- 6. Grodecki J. IKONOŚ stereo feature extraction-RPC approach. // Proceedings of ASPRS 2001 Conference, 23-27 April, St. Louis, Missouri (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland). CD ROM.
- 7. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in computer vision. Cambridge University Press. ISBN 0-521-54051-8, 2003.
- 8. Strobl K.H., Sepp W., Hirzinger G. On the Issue of Camera Calibration with Narrow Angular Field of View // IROS. 2009. P. 309-315.

## Calibration of Kanopus-V satellite sensor during its operation

#### A.I. Vasilyev

## JSC CTT Group, Moscow 111024, Russia *E-mail: ahbac@mail.ru*

In the paper the calibration problem of the Kanopus-V satellite sensor is considered. There are distinctive features of this instrument: 1) several view fields - 6 non-overlapping CCD matrix sensors in the focal plane; 2) significantly narrow-angle optical system – the field of view is less than  $3^{\circ}$ . It is shown that the traditional reprojection error minimization approach is inapplicable to calibrate this camera since it leads to significant errors of microframes (produced by each CCD-sensor) positions - more than 1000 pixels displacement. Taking into account satellite navigation data and pre-launch calibration results allows to reconstruct the microframes positions with an accuracy of 15 pixels ( $3\sigma$ ). The camera parameters reconstruction based on the ground control points for the given district area (Pyatigorsk) is described. The reconstructed camera model was used for mosaic formation on the basis of processing technology for the frame aerial photography data. The processing technology includes several key steps: 1) the single frame formation based on microframes and its known positions relative to the principal point; 2) tie points searching between single frames; 3) phototriangulation; 4) single frames transformation and stitching. The described technology was applied for the mosaic formation from the Kanopus-V data in the Memphis area. On the resulting mosaic, breaklines were observed (RMSEof breakpoints ~7pixels). These breaklines are conditioned by the low accuracy of the camera calibration, in particular, the accuracy of microframes positions relative to the principal point is ~5pixels (1 $\sigma$ ). In the paper, to form the mosaics without breaklines it is suggested to consider the complex optical system with 6 view

fields as 6 independent frame cameras. Based on the suggested modified approach, we succeeded to form the mosaics without breaklines (RMSE of reprojection error on tie points is ~1 pixel).

Keywords: Kanopus-V satellite, calibration, narrow-angle camera, several view fields.

#### References

- Boyarchuk K.A., Volkov S.N., Gorbunov A.V. et al., Kosmicheskii kompleks operativnogo monitoringa 1. tekhnogennykh i prirodnykh chrezvychainykh situatsii Kanopus-V s kosmicheskim apparatom Kanopus-V No. *I* (Space system Kanopus-V for operative monitoring of man-made and natural emergencies with spacecraft Kanopus–VNo.1), Moscow: NPP VNIIEM, 2011,110p.
- Vasilyev A.I., Krylov A.V., Vakhonin A.V., Primenenie graficheskikh protsessorov NVIDIA v zadachakh fotogrammetricheskoi obrabotki rezul'tatov DZZ. (Application of NVIDIA graphics processing units in the tasks 2. of photogrammetric processing of Earth remote sensing results), Yubileinaya konferentsiya, posvyashchennaya 50-letiyu poleta v kosmos Yu.A. Gagarina (Jubilee conference devoted to 50th anniversary of Yu.A. Gagarin's
- flight into space), Moscow: NIITP, 2011, pp. 114-117. Vladimirov A.V., Salikhov R.S., Senik N.A., Zolotoi S.A., Kosmicheskaya sistema operativnogo monitoringa 3. tekhnogennykh i prirodnykh chrezvychainykh situatsii na baze KK Kanopus-V i belorusskogo kosmicheskogo apparata (Space system for operative monitoring of man-made and nature emergencies on base of spacecraft Kanopus-V and Byelorussian spacecraft), Voprosy elektromekhaniki, 2008, No. 105(1), pp. 49-57
- Kravtsova E.V., Nekrasov V.V., Tehnologiya obrabotki v CFS Photomod snimkov perspektivnogo KA Kanopus-V (Processing technology in DPS Photomod for images from projected spacecraft Kanopus-V), *Geoprofi*,2011, No. 4 5, pp. 49-52
- Nekrasov V.V., Tekhnologiya obrabotki snimkov KA Kanopus-V i BKA v kartograficheskikh tselyakh (Processing 5. technology of images from spacecraft Kanopus-V and BSC for cartographic purposes), Torzhestvennoe zasedanie, posvyashchennoe 200-letiyu Rossiiskoi voennoi topograficheskoi sluzhby (Solemn session devoted to the 200th anniversary of Russian military land survey), Moscow: Izd. MIIGAiK, 2012, pp. 87-91. Grodecki J., IKONOS stereo feature extraction—RPC approach, *ASPRS Annual Conference*, Proc. Conf., Louis,
- 6. Missouri, 23–27 April, 2001, 7 p. (CD ROM).
- 7. Hartley R., Zisserman A., Multiple View Geometry in computer vision, Cambridge University Press, 2003, p. 655. 8. Strobl K.H., Sepp W., Hirzinger G. On the Issue of Camera Calibration with Narrow Angular Field of View, International Conference on Intelligent Robots and Systems, Proc. Conf., 2009, pp. 309-315.