

# РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЪЕМКИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ТИПА «КАНОПУС-В»

**Е.В. Макушева** (Корпорация «ВНИИЭМ»)

В 2009 г. окончила авиатехнологический факультет Московского авиационного технологического института (в настоящее время — Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского) по специальности «проектирование и технология электронных средств». После окончания института работает в ОАО Корпорация «ВНИИЭМ», в настоящее время — инженер-программист.

**В.В. Некрасов** (Корпорация «ВНИИЭМ»)

В 1983 г. окончил Казахский политехнический институт, в 2002 г. — аспирантуру МИИГАиК. С 1996 г. работал в компании МА «Совинформспутник», с 2003 г. — в ЗАО «Оптэн Лимитед», с 2008 г. — в НИИ ТП. С 2009 г. работает в ОАО Корпорация «ВНИИЭМ», в настоящее время — научный сотрудник. С 2011 г. работает в ЗАО «СТТ групп», в настоящее время — начальник отдела ГИС. Кандидат технических наук.

В рамках работ по созданию космического комплекса оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций и космической системы на его основе, с космодрома Байконур 22 июля 2012 г. был запущен космический аппарат (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) «Канопус-В» (рис. 1) и конструктивно аналогичный ему КА БКА, принадлежащий Белоруссии.

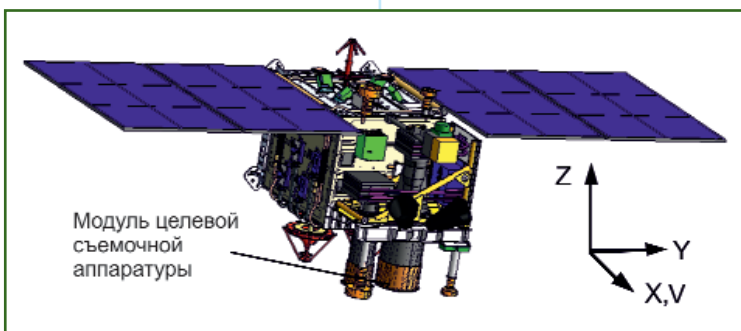
Эти космические аппараты позволяют:

- осуществлять мониторинг чрезвычайных ситуаций;



**Рис. 2**

Модуль целевой съемочной аппаратуры



**Рис. 1**

Общий вид КА «Канопус-В»

- выполнять картографирование;

- обеспечивать обнаружение очагов лесных пожаров и выбросов загрязняющих веществ;

- регистрировать аномальные физические явления для прогнозирования землетрясений;

- проводить мониторинг водных ресурсов и сельского хозяйства;

- решать задачи землепользования;

- обеспечивать высокооперативное наблюдение.

Технические характеристики космического аппарата «Кано-

пус-В» [1] представлены в табл. 1.

Модуль целевой съемочной аппаратуры КА «Канопус-В» (рис. 2) обеспечивает съемку участков поверхности Земли, формирование полученной информации в кадры и ее передачу на наземные пункты приема информации. В состав модуля входят две камеры:

- панхроматическая съемочная система (ПСС);

- многозональная съемочная система (МСС).

Съемка может проводиться как одновременно в панхроматическом и многозональном ре-

жимах, так и при различных комбинациях отдельных спектральных зон, вплоть до съемки в одной спектральной зоне.

Панхроматическая съемочная система обеспечивает получение изображения, формирование панхроматической видеoinформации и ее передачу в бортовую информационную систему.

Особенность построения ПСС состоит в том, что изображение в ней формируется на массиве микрокадров, каждый из которых строит изображение по законам центральной проекции. Расположение фоточувствительных матриц приведено на рис. 3.

Многозональная съемочная система обеспечивает получение изображения и формирование видеoinформации в четырех зонах спектра и ее передачу в бортовую информационную систему. В многозональной съемочной системе 4 матрицы для четырех зон спектра (их расположение показано на рис. 3).

Характеристики панхроматической и многозональной съемочных систем представлены в табл. 2.

В отличие от большинства существующих космических аппаратов ДЗЗ, в КА «Канопус-В» **съемка выполняется не сканирующей линейкой, а кадрами.** Первые строки видео данных в матрицах расположены так, что каждый третий кадр последующей матрицы совпадает с первым кадром предыдущей матрицы. Каждый последующий кадр МСС имеет с предыдущим кадром перекрытие в 57 строк. В ПСС каждый последующий кадр имеет с предыдущим кадром перекрытие в 80 строк. Между кадрами, полученными **разными камерами,** перекрытие составляет 70 пикселей.

Для калибровки и тестирования съемочной аппаратуры КА «Канопус-В» ФГУП Госцентр «Природа» по техническому заданию ОАО Корпорация «ВНИ-

Технические характеристики КА «Канопус-В»

Таблица 1

Разработчик	ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»
Ракета-носитель	Союз
Размер КА, м	0,9x0,75
Масса КА, кг	450
Масса полезной нагрузки, кг	110
Среднесуточная мощность, Вт	300
Срок активного существования, лет	5-7
Тип орбиты	Круговая солнечно-синхронная
Наклонение орбиты, °	97,447
Высота орбиты, км	510
Период обращения, мин	94,74
Период повторного наблюдения, суток	15
Ориентация	Трехосная
Погрешность ориентации, угловые мин	5
Стабильность угловой скорости, °/с	0,001
Погрешность определения ориентации осей КА, угловые с	30
Углы отклонения КА по крену и тангажу, °	±40
Готовность к съемке, мин	3
Максимальное значение суммарной ошибки в положении КА, м	15

ИЭМ» подготовило экспериментальный тестовый участок, границы которого представлены на рис. 4.

Расположения тестового участка выбиралось с учетом следующих факторов:

- наличия на местности достаточного количества контуров и объектов, обеспечивающих однозначное опознание точки и ее длительную сохранность;
  - наличия на местности превышений, обеспечивающих оценку ошибок за рельеф и точности координатных определений;
  - наличия достаточного количества пунктов государственной геодезической сети;
  - наличия разветвленной дорожной сети;
  - доступности контуров и объектов для проведения геодезических измерений;
  - наибольшего количества безоблачных дней в году.
- В результате был выбран участок **в Ставропольском крае, в районе города Пятигорска,**

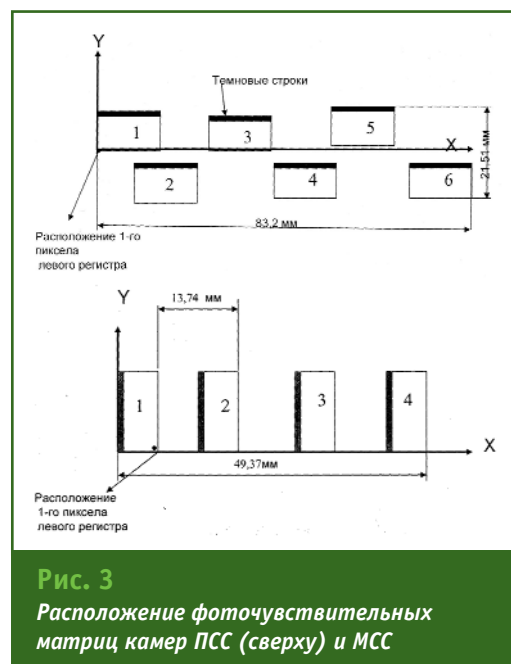


Рис. 3  
Расположение фоточувствительных матриц камер ПСС (сверху) и МСС

размером 28x8 км.

**Среднее квадратическое отклонение опорных точек в плане и по высоте не превышало 0,2 м на местности.** Каждая точка была привязана к двум исходным пунктам триангуляции, равномерно расположенным на

Основные характеристики камер ПСС и МСС

Таблица 2

Наименование характеристики	ПСС	МСС
Геометрическое разрешение (проекция пикселя), м	2,1	10,5
Спектральный диапазон (по уровню 0,5), мкм	0,52–0,85	0,54–0,6 0,63–0,69 0,69–0,72 0,75–0,86
Полоса захвата, км	23,5	20,2
Фокусное расстояние, мм	1797,5	359,5
Эффективное относительное отверстие	1:10,3	1:5,6
Светопропускание	0,7	0,6–0,8
Площадь, снимаемая одновременно (6 фрагментов кадра), км <sup>2</sup>	45,3	195



Рис. 4  
Экспериментальный тестовый участок (Ставропольский край)

территории тестовых участков.

Один из первых маршрутов на территорию России (г. Красноярск) был получен 13 сентября 2012 г. Использование динамической геометрической модели и орбитальных данных позволило привязать снимки к

местности с предельной погрешностью 300 м в плане. Схема покрытия территории микрокадрами, полученными камерой ПСС показана на рис. 5.

#### Динамическая геометрическая модель съемки

Динамическая геометрическая модель съемки, представляющая собой математическое описание съемочных систем, позволяет по данным об орбитальной траектории КА получить привязанные к местности снимки. Это отвечает современным тенденциям в обработке данных ДЗЗ тем, что позволяет значительно повысить точность и ускорить процесс обработки данных. Такие геометрические модели существуют для зарубежных космических съемочных систем, например, моделей ка-

мер КА Ikonos, QuickBird, Alos и т. п.

При этом конечному пользователю данные с большинства космических съемочных систем поставляются в виде упрощенного описания геометрической модели на основе RPC-полиномов [2, 3], коэффициенты которых генерируются с помощью точной геометрической модели съемки каждого снимка.

RPC-полиномы основаны на соотношениях, связывающих нормированные геодезические координаты точки местности с нормированными координатами ее изображения на снимке, следующего вида:

$$l_N = f_l(\varphi_N, \lambda_N, h_N)/g_l(\varphi_N, \lambda_N, h_N),$$

$$S_N = f_s(\varphi_N, \lambda_N, h_N)/g_s(\varphi_N, \lambda_N, h_N).$$

Числители и знаменатели этих соотношений представляют собой полиномы третьей степени:

$$\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 d_{ijkN} \lambda_N^i \lambda_N^j h_N^k$$

Нормировка пиксельных и геодезических координат выполняется так, чтобы их нормированные значения по модулю не превосходили 1:

$$\begin{aligned} l_N &= (l - 0_l)/S_l, \\ S_N &= (s - 0_s)/S_s, \\ \varphi_N &= (\varphi - 0_\varphi)/S_\varphi, \\ \lambda_N &= (\lambda - 0_\lambda)/S_\lambda, \\ h_N &= (h - 0_h)/S_h. \end{aligned}$$



Рис. 5  
Схема покрытия микрокадрами территории г. Красноярска

В комплект поставки изображения включаются коэффициенты полиномов  $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}, d_{ijk}$ , а также параметры нормировки  $O_i, O_s, O_\varphi, O_\lambda, O_h$  (Offset) и  $S_i, S_s, S_\varphi, S_\lambda, S_h$  (Scale).

Коэффициенты рациональных функций (полиномов) рассчитываются следующим образом:

- определяются элементы внешнего ориентирования снимка в соответствии со строгой моделью камеры по опорным точкам (либо используются элементы внешнего ориентирования, полученные по навигационным данным);

- по всему полю изображения и всему диапазону высот данной территории равномерно вычисляются опорные точки ( $x_f, y_f, X, Y, Z$ ) с использованием строгой модели камеры;

- составляется система уравнений и методом наименьших квадратов вычисляются коэффициенты рациональных полиномов.

Построение геометрической модели для съемочных систем выполняется, исходя из технических данных космического аппарата «Канопус-В».

На основе полученного математического описания геометрической модели съемки панхроматической и многозональной камер становится возможным разработать:

- методику оценки параметров калибровки камер по конструктивным характеристикам КА (до запуска КА);

- методику калибровки камер по данным съемки калибровочного полигона (после запуска КА);

- программный модуль формирования модельных снимков, получаемых панхроматической и многозональной камерами (до запуска КА);

- программный модуль, формирующий коэффициенты рациональных полиномиальных функций для обработки снимков в стандартных фотограммет-

рических программах в соответствии с принятыми в международной практике требованиями;

- программный модуль ортотрансформирования снимков на основе разработанной геометрической модели камер съемочной системы КА.

Созданная в результате проведенных работ программа NeogeoSat реализует математическое описание геометрической модели панхроматической и многозональной съемочных систем космического аппарата «Канопус-В».

В состав программы NeogeoSat вошли следующие модули:

- головной модуль;

- модуль формирования модельных снимков;

- модуль ортотрансформирования снимков;

- модуль формирования коэффициентов рациональных полиномиальных функций.

В качестве исходных данных модуль формирования модельных снимков использует ортотрансформированные изображения поверхности Земли и местоположение КА в момент фотографирования, а также цифровую модель рельефа. При ее отсутствии снимки формируются на нулевую высоту. Моделирование снимков выполняется с учетом геометрии камер МСС и ПСС КА «Канопус-В». Файлы изображений сохраняются в формате TIFF для каждой матрицы отдельно: 6 файлов для ПСС и 4 файла для МСС.

Модуль ортотрансформирования снимков в качестве исходных данных использует модельные снимки камер МСС и ПСС и навигационные данные, содержащиеся в файлах метаданных для каждой матрицы камер КА. Формирование ортотрансформированных изображений из снимков камер происходит с учетом геометрической модели съемки и цифровой модели рельефа. Для их создания используется цифровая модель

рельефа, а при ее отсутствии ортотрансформирование проводится на заданную высоту. При этом на выходе получаются файлы изображений в формате TIFF отдельно для каждой матрицы.

Модуль формирования RPC-полиномов рассчитывает коэффициенты рациональных полиномов по навигационным данным КА «Канопус-В» с учетом геометрии камер ПСС и МСС. В качестве исходных данных используются метаданные снимков. При этом для расчета берется интервал высот местности, отображенной на снимке.

После разработки модуля формирования модельных снимков программы NeogeoSat, было выполнено моделирование процесса съемки камерами ПСС и МСС КА «Канопус-В».

В результате автономных испытаний были сгенерированы модельные снимки камер ПСС и МСС. Это позволило перейти к этапу комплексных испытаний для проверки точности разработанной геометрической модели и методики калибровки процесса съемки камерами ПСС и МСС для ее применения на этапе летно-конструкторских испытаний КА «Канопус-В».

Для формирования модельных снимков камер ПСС и МСС КА «Канопус-В» использовался ортотрансформированный снимок КА «Ресурс-ДК-1» с разрешением 1,0 м. Исходный снимок и полученные результаты представлены на рис. 6.

#### ▼ Полученные результаты

Геометрические модели камер съемочных систем и собственно съемки дают возможность получать привязанные к местности снимки по данным об орбитальной траектории КА, осуществлять калибровку камер по данным полигонов, а также проводить ортотрансформирование в режиме реального времени. Кроме того, разработанная геометрическая модель камеры ПСС позволила создать и



Рис. 6

Исходный и модельные снимки: исходный снимок (а); микрокадры ПСС (б-ж); снимки с двух матриц МСС, попавших на территорию полигона (з-и)

отработать технологию блочно-го уравнивания микрокадров [4, 5] для получения сплошного покрытия. Моделирование камер использовалось для отработки экспериментального комплекса уточнения геопространственной привязки «ГеоКА» до получения реальных снимков с КА «Канопус-В», что помогло существенно сократить сроки разработки комплекса. Моделирование мультиспектральной камеры дало возможность отра-

ботать технологию получения ЦМР по снимкам камеры МСС [5].

Разработка этих технологий позволяет не только повысить оперативность получения геопространственно привязанной информации, но и расширить область применения данных, получаемых с КА «Канопус-В», и использовать их как в целях оперативного мониторинга, так и для решения задач точного картографирования.

При этом точная геометрическая модель камер обеспечивает возможность генерации специального описания снимка — RPC-полиномов, для его точной привязки в большинстве стандартных фотограмметрических программ непосредственно пользователем, без раскрытия деталей описания камеры.

#### ▼ Список литературы

1. Владимиров А.В., Салихов Р.С., Сенник Н.А., Золотой С.А. Космическая система оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций на базе КА «Канопус-В» и белорусского космического аппарата // Журнал ФГУП «НПП ВНИИЭМ» «Вопросы электромеханики». — Т. 105. — 2008.
2. Fraser C.S., G. Dial and J. Grodecki Generation Sensor orientation via RPCs // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. — May 2006. — 60(3). — pp. 182-194.
3. Fraser Clive S., Hanley Harry B. Bias-compensated RPCs for Sensor Orientation of High-resolution Satellite Imagery // Photogrammetric engineering & remote sensing journal of the American society for photogrammetry and remote sensing. — 2005. — Vol. 71. — N 8. — pp. 909-916.
4. Некрасов В.В., Кравцова Е.В. Технология обработки в ЦФС РНО-ТОМОД снимков перспективного КА «Канопус-В» // Геопрофи. — 2011. — № 5. — С. 49-52.
5. Nekrasov, V.V., Makusheva, E.V. Satellite 'Canopus-V' image processing technology development for cartography purposes based on prelaunch simulation // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XXXIX-B4, 139-142, doi: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B4-139-2012, 2012.

#### RESUME