

Аншаков Г.П., Фомин Г.Е., Макаров В.П., Скирумунт В.К., Сомов Е.И.

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

На современном этапе развития космических средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса актуальна проблема получения космических снимков с высокими измерительными характеристиками (ИХ). Это требование становится таким же важным для потребителей, как требования к пространственному разрешению на местности, к оперативности доставки информации, к возможности ДЗЗ в различных диапазонах спектра. Необходимость повышения ИХ космических снимков диктуется расширением круга решаемых задач. Можно говорить о возникновении *класса координатных задач*, основное содержание которых состоит в определении координат отображаемых на снимке объектов, а также к проведению различных измерений расстояний и углов между объектами, их высот на изображениях местности, вычисление площадей и т.д. Кроме того, высокие ИХ необходимы для получения синтезированных снимков путем композиции нескольких изображений одного и того же участка местности, снятого в различных диапазонах спектра или при различной ориентации космического аппарата (КА). В частности, это относится к получению цветных изображений или снимков, по которым далее строится стереоизображение, где необходимо отождествление каждого пикселя на каждом снимке. При этом требования к точности знания координат сопоставимы с величиной линейного разрешения снимка. Задача получения снимков с высокими ИХ существенно усложняется, когда осуществляется управление пространственным движением КА, оснащенного оптико-электронными средствами формирования изображения, вокруг его центра масс в процессе съемки. В этом случае появляются дополнительные искажения, обусловленные изменением элементов ориентирования снимка в процессе его построения. Основные соотношения для восстановления геометрии изображений, получаемых при кадровой съемке, даются классической теорией фотограмметрии. При использовании оптико-электронных методов формирования космических снимков, где условия съемки изменяются для каждой строки изображения, применяется динамическая фотограмметрия. Отличительная сущность этой теории состоит в том, что методы классической фото-

грамметрии применяются к *каждой строке* экспонируемого оптико-электронного изображения.

Компьютерная реконструкция всего снимка проводится построчно, причем каждой строке (либо ее части) сопоставляются данные о положении центра визирной системы координат (ВСК) – оптической системы телескопа и ее ориентации в инерциальном базисе (ИБ). Эти данные должны быть синхронизированы с высокой точностью с моментами времени, в которые экспонируется соответствующая строка формируемого изображения. Точность определения положения центра масс КА и его ориентации в ИБ при съемке, которая приемлема для целей управления угловым движением КА, недостаточна для реконструкции снимков. Так, например, если для целей управления КА требуемая точность определения ориентации его корпуса на участке съемки должна составлять порядка нескольких единиц угловых минут, то ориентация ВСК для целей реконструкции изображения должна быть известна с точностью до нескольких единиц угловых секунд. Реализация таких требований бортовыми системами КА крайне затруднительна. В связи с этим представляется перспективным подход к решению задачи восстановления ИХ снимков, при котором исключаются указанные жесткие требования к точности ориентации и стабилизации углового движения КА с телескопом, а также к точности определения положения его центра масс. Решение задачи достигается путем *апостериорного* восстановления *фактических* значений характеристик бортовых систем для интервалов полета КА, на которых *проводилась* съемка. При этом используются *фактические* данные о полетной калибровке наблюдательной аппаратуры, электронные изображения участков местности, вспомогательная информация и модифицированные методы прецизионной геодезической привязки космических изображений по траекторным данным [1]. Технологическая схема сводится к последовательному выполнению следующих этапов

- планирование специальных режимов работы аппаратуры ДЗЗ (калибровочных, съемки эталонных изображений, например, звездного поля, наземных реперов и т.д.),
- накопление вспомогательной информации (специальной служебной информации от бортовых систем КА и аппаратуры ДЗЗ), передача ее на Землю *совместно* с полученным электронным изображением участков местности;
- обработка вспомогательной информации в компьютерном наземном комплексе с целью восстановления *фактических характеристик* бортовых систем и аппаратуры ДЗЗ, а также законов их изменения во время съемки;

- восстановление положения центра масс КА, его ориентации в ИБ и параметров ориентирования матриц оптико-электронных преобразователей (ОЭП) по результатам обработки вспомогательной информации и полетной калибровки с точностью, необходимой для последующей геометрической коррекции снимка;

- построчная реконструкция изображения участка местности с геометрической коррекцией его искажений

Данная схема приведена для общего случая, когда не предусмотрено использование реперных точек снимка и решение находится методом прямой фотограмметрической засечки. При наличии на изображении объектов, геодезические координаты которых известны с высокой точностью (реперных точек снимка), данная схема позволяет учитывать эту дополнительную информацию и обеспечивает прецизионные результаты

Работоспособность предлагаемого подхода зависит от следующих факторов:

- полноты вспомогательной информации, частоты (периодичности) ее регистрации и точности взаимной синхронизации ее фиксации с моментами времени, в которые экспонируется соответствующая строка формируемого изображения;

- наличия технологических режимов работы КА и эффективности их планирования для получения взаимно связанной вспомогательной информации требуемого состава;

- эффективности методик обработки вспомогательной информации и высокоточного восстановления законов изменения характеристик бортовых систем и аппаратуры ДЗЗ на участках съемки

Содержательный смысл основных задач, которые необходимо решать для восстановления измерительных свойств снимков, характеризуется следующим образом.

Первая задача состоит в периодическом (один раз в несколько суток) определении опорного базиса КА в ИБ для заданного интервала полета с точностью до нескольких единиц угловых секунд и высокоточной привязки его к соответствующему моменту времени. Этот базис принимается за начало отсчета всех последующих угловых эволюций КА на временном интервале полета, внутри которого находятся участки съемки. Для решения данной задачи на борту КА должен предусматриваться режим съемки заданного участка звездного поля аппаратурой ДЗЗ. В этом режиме фиксируется измерительная информация от оптико-электронных и гироскопических приборов системы управления движением (СУД), предназначенных для штатного определения ориентации КА. производится съем информации с ряда других бортовых систем КА. Для определения опорного базиса КА проводится совместная

обработка данных об ориентации КА относительно звездного неба, полученных как аппаратурой ДЗЗ (телескопом), так и приборами СУД, а также служебной вспомогательной информации. В результате на основе методов динамической идентификации получается необходимая точность знания параметров установки приборов СУД относительно ВСК и появляется возможность алгоритмического уточнения углового положения систем координат каждого измерительного прибора СУД относительно ВСК.

Следующей важной задачей является определение интервала *стабильности* опорного базиса КА. Для ее решения предусматривается возможность измерения (идентификации) на борту КА квазипостоянных угловых рассогласований осей чувствительных элементов СУД и осей ВСК. На основе компьютерной обработки информации о рассогласовании этих осей в наземном комплексе определяется интервал стабильности и планируется следующий момент времени, для которого требуется уточнение опорного базиса КА. При этом решается комплекс задач, среди которых основными являются восстановление положения центра масс КА и угловых элементов ориентирования осей ВСК для каждой строки обрабатываемого изображения.

Задача аналитически согласованного синтеза программы маршрутного движения КА, где выполняется оптико-электронная съемка, состоит в определении кватерниона ориентации  $A$ , векторов угловой скорости  $\omega$  и углового ускорения  $\epsilon$  связанного с КА базиса относительно ИБ, как явных функций на заданном интервале времени. Решение ее получено [2,3] на основе векторного сложения всех элементарных движений в геодезическом базисе при аналитическом задании орбитального движения КА, движения Земли, начальных координат и азимута сканирования с учетом зенитного угла Солнца и текущей перспективы наблюдения, исходя из главного требования оптическое изображение заданного участка Земли должно перемещаться требуемым образом на фотоприемной структуре в фокальной плоскости телескопа (рис. 1). При этом конечным набором векторных сплайнов третьего порядка выполняется высокоточная аппроксимация траектории вектора программной угловой скорости КА по времени: аналитически получаются вектор программного углового ускорения с его производной и кватернион программной ориентации в силу выполнения условий разрешимости задачи Дарбу

При допущении неизменности параметров ориентирования внутри интервала экспонирования каждой строки изображения решается задача прямой фотограмметрической засечки в текущем геодезическом базисе (рис. 2) для выбранного подмножества точек, принадлежащих соответствующей строке изображения. В результате получаются три пространствен-

ные координаты точки местности. Такая процедура повторяется для выбранного подмножества точек, которые принимаются за *узлы интерполяции*. Размерность этого подмножества определяется, исходя из обеспечения требуемой точности интерполяционной функции, с помощью которой находятся пространственные координаты на местности для *любой точки* снимка. Как известно [1], использование интерполяции позволяет эффективно переопределить координаты точек изображения, осуществляя таким образом необходимую геометрическую коррекцию изображения построчно. Далее по скорректированному снимку решаются координатные задачи

зависимости координат и скоростей точки  $M'$  на снимке и точки  $M$  в плоскости видимых предметов на местности с использованием текущего геодезического базиса

Необходимо отметить, что существует значительное число теоретических и практических работ по проблемам восстановления ИХ космических изображений, синтезу спектральных снимков, субпиксельному совмещению фрагментов изображений и т.д. Однако большинство из них посвящено преобразованию снимков с низким пространственным разрешением. Для снимков с высоким разрешением на местности, которые в настоящее время наиболее востребованы потребителями, подобные задачи решаются в основном с использованием опорного поля точек, координаты которых специально определяются с помощью GPS технологий в районе предполагаемой съемки. Такая технология ограничивает эффективность космических средств, обусловленную глобальностью решения задач ДЗЗ, и не позволяет строить стереоскопические модели. Предлагаемая наукоемкая компьютерная технология нацелена на достижение высоких ИХ космических изображений именно с высоким разрешением на местности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аэрокосмические исследования Земли. Методы обработки видеoinформации с использованием ЭВМ. М.: Наука, 1978.
2. Сомов Е. И. Динамика прецизионного гиросилового управления космическими аппаратами землеобзора // Навигация и гироскопия. № 4(39). 2002. с. 54-55
3. Somov Ye I., Butyrin S. A., Sorokin A. V., Platonov V. N. Steering the Spacecraft Control Moment Gyroscope Clusters // Proceedings of 10th Saint-Petersburg Intern. conference on integrated navigation systems. – St.-Petersburg, 2003. pp. 403-419

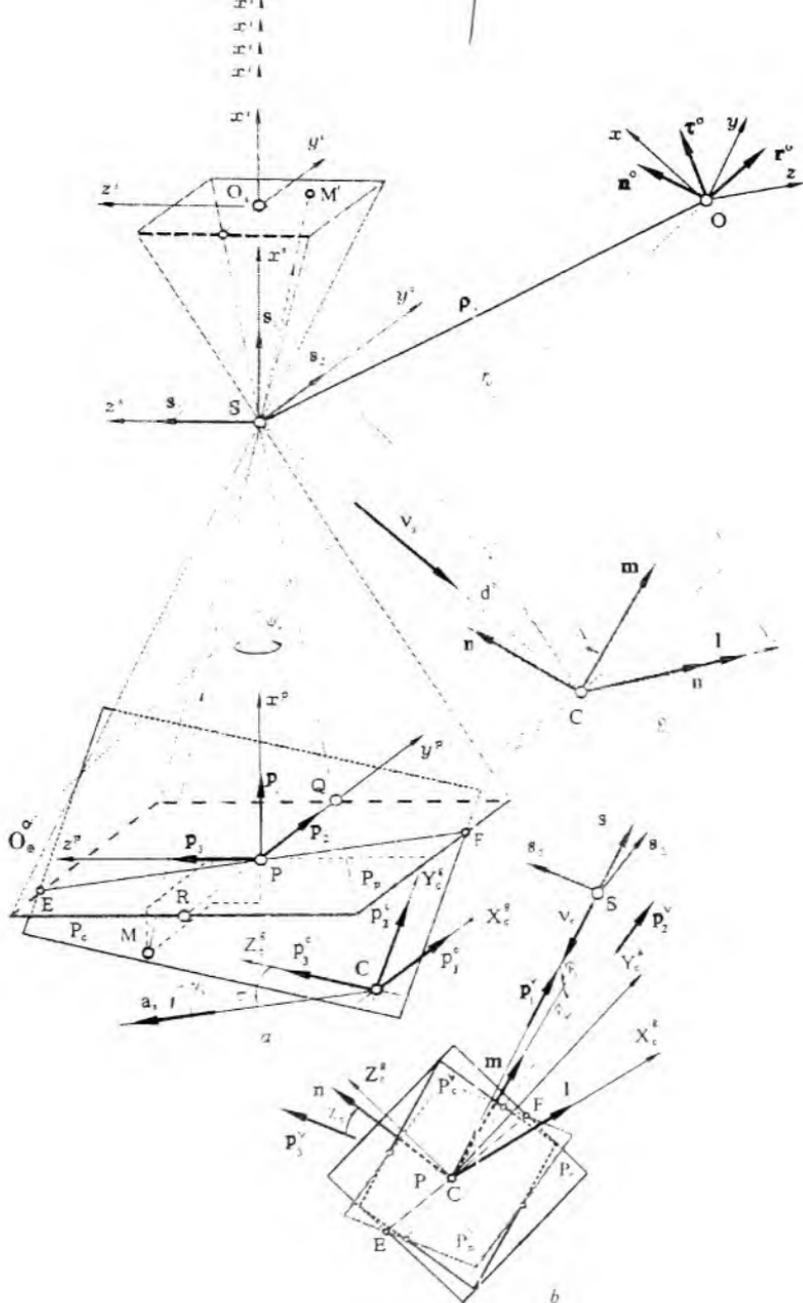


Рис. 1. Схема определения параметров внешней ориентации кадра съемки и аналитической зависимости координат и скоростей точки  $M'$  на снимке и точки  $M$  в плоскости видимых предметов на местности с использованием текущего геодезического базиса.

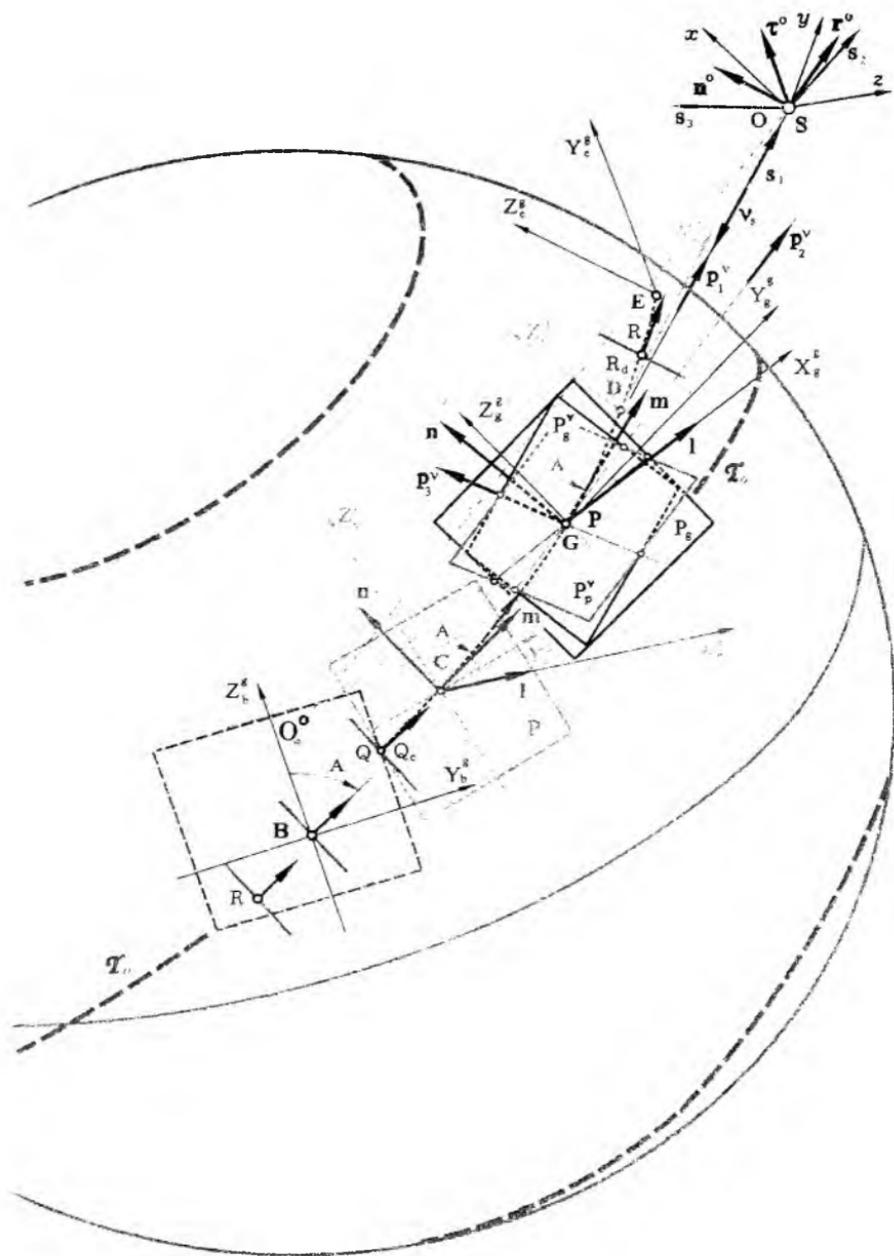


Рис. 2. Схема отображения перемещений матрицы ЭОП при съемке Земли