

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВ ПРИВЯЗКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ПИЛОТИРУЕМОМ КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ С ПОМОЩЬЮ СВОБОДНО ПЕРЕМЕЩАЕМЫХ КАМЕР

© 2016 г. Бронников С.В., Караваев Д.Ю., Рожков А.С.

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rsce.ru

Приводится описание угломерной системы для координатной привязки фотоизображений, получаемых космонавтами с помощью свободно перемещаемой фотокамеры. Показаны результаты отработки предложенных авторами вариантов построения таких систем, созданных на базе малогабаритного датчика компании Xsens Technologies B.V. (Нидерланды), на базе датчика Научно-Производственной Компании «Оптолинк» (г. Москва), ультразвуковой системы компании РУКЭП (г. Москва). Исследование предлагаемых вариантов системы выполняется в рамках космического эксперимента «Визир». Приводится описание устройства разработанных систем, основные технические характеристики, алгоритм вычисления координат центра фотоизображения. Описан новый режим автоматизированного наведения фотоаппаратуры на заданные объекты земной поверхности с помощью голосовых команд. Приведены примеры расчетов, сформулированы направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: фотосъемка Земли, привязка изображений Земли, пилотируемая орбитальная станция, экипаж.

INVESTIGATION OF GEO-TAGGING TECHNOLOGY AND CAPABILITES FOR EARTH IMAGES OBTAINED ON HUMAN SPACE VEHICLE USING FREELY MOVABLE CAMERAS

Bronnikov S.V., Karavaev D.Yu., Rozhkov A.S.

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)
4A Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru

An angular system for geo-tagging of photographic images taken by cosmonauts using a freely movable camera is described. The development testing results for such authors-proposed system construction options developed based on a small-size sensor of Xsens Technologies B.V. (the Netherlands), sensor of Research and Production Company Optolink (Moscow), ultrasonic sensors of RUCAP (Moscow) are presented. The proposed system options are investigated within space experiment Vizir. A description of the developed system composition, key performance, algorithm for computing photographic image center coordinates are provided. A new mode of computer-aided photographic equipment pointing to specified earth surface objects via voice commands is described. Calculation examples are given, and further research areas are formulated.

Key words: Earth photo imagery, Earth image geo-tagging, manned on-orbit station, crew.



БРОННИКОВ С.В.



КАРАВАЕВ Д.Ю.



РОЖКОВ А.С.

БРОННИКОВ Сергей Васильевич — кандидат технических наук, начальник отделения РКК «Энергия», e-mail: sergey.bronnikov@rsce.ru
BRONNIKOV Sergey Vasil'evich — Candidate of Science (Engineering), Head of Division at RSC Energia, e-mail: sergey.bronnikov@rsce.ru

КАРАВАЕВ Дмитрий Юрьевич — кандидат технических наук, начальник сектора РКК «Энергия», e-mail: dmitry.karavaev@rsce.ru
KARAVAEV Dmitry Yur'evich — Candidate of Science (Engineering), Head of Subdepartment at RSC Energia, e-mail: dmitry.karavaev@rsce.ru

РОЖКОВ Александр Сергеевич — заместитель начальника отдела РКК «Энергия», e-mail: alexander.rozhkov@rsce.ru
ROZHKOV Alexander Sergeevich — Deputy Head of Department at RSC Energia, e-mail: alexander.rozhkov@rsce.ru

Введение

Как было показано в статье [1], изображения земной поверхности, полученные экипажами пилотируемой орбитальной станции (ПОС) через иллюминаторы с помощью высококачественной цифровой видео- и фотоаппаратуры профессионального уровня, широко используются различными организациями при выполнении научно-исследовательских и практических работ.

Космонавты для этих съемок обычно используют свободно перемещаемые камеры, т. е. камеры, не имеющие жесткой связи с конструкцией станции. Преимущества такого способа съемки в том, что невесомость сама по себе создает идеальный «карданов подвес» для камеры, позволяя космонавту выбирать объект и наводить камеру на заданный район самым удобным для себя образом (например, сдвигая камеру буквально ресницами). Конечно, в ряде случаев съемка проводится и с разного рода кронштейнов, однако они загораживают иллюминаторы, передают вибрации и, как правило, не допускают больших отклонений от надира. Поэтому существенную часть съемок космонавты выполняют именно свободно перемещаемыми камерами, играя при этом роль трехстепенной поворотной платформы наведения.

Однако при этом возникает проблема, связанная с определением географических координат снятого района. У космических изображений Земли, получаемых с автоматических космических аппаратов (КА), всегда известно пространственное положение камеры, так как она имеет жесткую связь с конструкцией КА (или в заданный момент повернута на известные углы относительно конструкции). Таким образом, всегда известно текущее положение системы координат (СК) камеры относительно связанной СК КА. Следовательно, зная положение КА на орбите и его пространственную

ориентацию в момент съемки, для каждого полученного изображения Земли можно рассчитать географические координаты любого пикселя цифрового снимка.

В случае съемки свободно перемещаемыми камерами положение СК камеры относительно связанной СК ПОС в момент съемки неизвестно. Поэтому получить расчетом географические координаты снятого района невозможно. При обработке результатов приходится вводить этап опознавания каждого снимка путем его визуального сопоставления с ортофотопланами предполагаемых районов. После того как снимок опознан, т. е. снятый район найден на ортофотоплане, можно определить, какой точке ортофотоплана соответствует центр снимка [2]. Поскольку географические координаты каждой точки ортофотоплана заранее известны, таким способом можно определить географические координаты центра каждого снимка. В принципе, после этого каждый снимок может быть далее обработан с помощью ортотрансформирования, т. е. перевода в проекцию ортофотоплана, таким образом, можно расчетом получить географические координаты всех пикселей снимка. Для автоматического ортотрансформирования требуется визуально найти на опознанном снимке и ортофотоплане не менее четырех общих (опорных) точек.

Часть снимков опознается сравнительно легко, особенно если они сняты с фокусным расстоянием до 300 мм. Однако снимки, выполненные с фокусным расстоянием 800 мм и более, обычно включают относительно небольшой район земной поверхности и часто с трудом опознаются, не говоря уже о том, что опознать, например, акваторию без береговой линии невозможно.

В целом же этап опознавания, необходимый для съемок свободно перемещаемыми камерами, значительно увеличивает трудоемкость первичной обработки снимков и снижает ее

оперативность, особенно в условиях, когда число снимков Земли, выполненных за одну экспедицию, приближается к 100 000. Кроме этого, опознавание не поддается автоматизации и требует участия квалифицированных специалистов.

Использование угломерных систем. Экспериментальное исследование вариантов построения системы определения пространственного положения

Устранить главный недостаток съемок свободно перемещаемыми камерами — неопределенность пространственного положения камеры — можно за счет использования угломерных систем, с помощью которых рассчитывается текущее пространственное положение линии визирования (ЛВ) камеры, а, следовательно, и географические координаты точки пересечения ЛВ с земной поверхностью в момент каждого снимка.

Традиционное решение сводится к отказу от свободно перемещаемых камер и использованию при съемках кронштейнов или поворотных платформ, устанавливаемых на иллюминаторы. Преимуществом такого подхода является сравнительная простота конструкции и, например, в случае платформ с автоматическим приводом, возможность автоматического наведения на заданную точку. Недостатки перечислены выше. В силу этого можно утверждать, что хотя съемка с кронштейнов или поворотных платформ останется частью процесса съемок Земли с ПОС и регулярно будет проводиться для ряда конкретных задач, полное исключение съемок свободно перемещаемыми камерами нецелесообразно.

Поэтому необходима разработка новых средств, не требующих для определения пространственного положения наличия жесткой связи с конструкцией ПОС. Такие средства, конечно, сложнее обычных кронштейнов, однако они позволяют объединить преимущества съемки камерой, свободно направляемой человеком, с возможностью автоматического расчета географических координат снятого района.

Требование отсутствия механической связи между камерой и конструкцией ПОС накладывает ряд ограничений на элементы системы. Она должна быть малогабаритной, безопасной для человека, крепиться непосредственно на камере. Желательна полная автономность, например, питание от аккумуляторов камеры, поскольку кабель питания будет ограничивать свободу ее перемещения.

Для исследования было разработано несколько вариантов построения системы.

Вариант 1. Синхронное использование двух жестко связанных камер. Механическая сборка из двух камер. Основная камера с узкоугольным объективом снимает Землю. Вторая камера с широкоугольным объективом направлена на внутренний интерьер ПОС. По изображениям элементов конструкции, интерьера или специальных маркеров возможно определение пространственного положения второй камеры относительно связанной СК ПОС. Затем на основе данных о текущем положении ПОС в инерциальной СК, матрицы пространственного положения второй камеры относительно первой можно определить положение основной камеры в инерциальной СК.

РКК «Энергия» проводилась макетная отработка такой угломерной системы в лабораторных условиях. Основным недостатком данного варианта построения угломерной системы является то, что обработка каждого снимка малогабаритной камеры — сложная и трудоемкая процедура, с трудом поддающаяся формализации и автоматизации в условиях меняющегося интерьера ПОС. Изменение интерьера может быть вызвано перемещениями членов экипажа, изменением места размещения или положения имеющегося на борту оборудования.

Использование данного варианта угломерной системы немного упрощается, если зона съемки возле иллюминатора ограничена. NASA разрабатывает в настоящее время такую систему для использования на Американском сегменте МКС, на котором для съемок Земли имеется специализированный модуль *Cupola* [3], рис. 1. В таком модуле требуется разместить ограниченное (по сравнению с большим модулем, например, служебным модулем МКС) количество маркеров. Кроме того, здесь отсутствуют затенения маркеров из-за перемещения других членов экипажа и размещенного оборудования.



Рис. 1. Вариант угломерной системы NASA (маркеры отмечены красным) для съемок из модуля *Cupola*

Вариант 2. Угломерная система на основе волоконно-оптического гироскопа компании «Оптолинк» [4]. Задачей данного варианта было исследование и демонстрация принципиальной возможности определения направления ЛВ фотокамеры с помощью готового прибора, используемого в системе управления космического корабля «Союз». Прибор ТИУС-500 (трехстепенной измеритель угловых скоростей) представляет собой три взаимно перпендикулярных бухты стекловолокна длиной 500 м с излучателями световых импульсов и фотоприемниками. Для световых импульсов определяются изменения фазы, плоскости поляризации и т. п., пропорциональные углам поворота. Прибор крепился к объективу фотоаппарата. Данные с ТИУС-500 и момент спуска затвора по кабелю передавались в бортовой компьютер экипажа, где рассчитывалась ориентация фотоаппарата в момент срабатывания затвора (см. патент РКК «Энергия» [5]). Испытания этой демонстрационной системы на МКС провел космонавт Виноградов П.В. летом 2006 г. с положительными результатами (рис. 2).

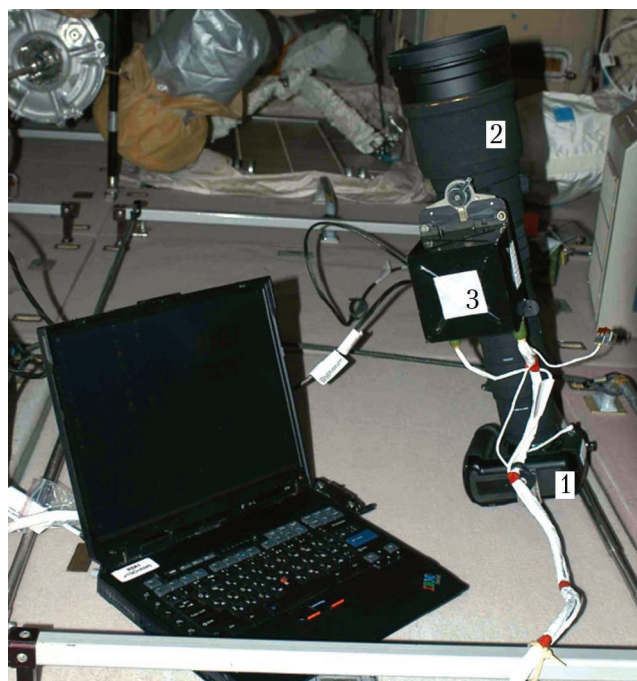


Рис. 2. Российский сегмент МКС. Прибор ТИУС-500, установленный на объективе фотоаппарата: 1 – фотоаппарат; 2 – длиннофокусный объектив; 3 – прибор ТИУС-500

Географические координаты изображений были рассчитаны с погрешностью 20–30 м. Однако с эргономической точки зрения система оказалась неудобной, поскольку имела низкий предел линейного диапазона измерений (не позволяла резких поворотов и соударений), поэтому 20% результатов были потеряны из-за случайных касаний фотокамерой

иллюминатора. Для подачи питания напряжением 27 В требовался отдельный кабель, что ограничивало и затрудняло перемещение с камерой. Кроме этого, прибор изначально создавался не портативным и имел сравнительно большие размеры (110×110×90 мм).

Вариант 3. Угломерная система на основе датчика угловых скоростей MTi фирмы Xsens Technologies B.V. Малогабаритный (55×58×22 мм) прибор MTi-28A53G25 фирмы Xsens Technologies B.V. (Нидерланды) [6], измеряющий угловые скорости по значению Кориолисовой силы от системы колеблющихся микробалок, связанных с пьезокристаллом, мог бы стать основой более эргономичной угломерной системы, поскольку имел питание 5 В и не был чувствителен к резким поворотам и соударениям. Однако автономная проверка его работы в условиях невесомости показала, что уход значения составляет до 0,6 °/с, что для длительного процесса съемок недопустимо. В земных условиях «дрейф» показаний составлял всего 20 °/ч, что объяснялось постоянной внутренней корректировкой измерений по направлению гравитационного поля с помощью встроенных акселерометров. Таким образом, измерение углов в невесомости с помощью приборов такого типа возможно лишь на очень коротких интервалах. Вариант построения системы на этих приборах был отвергнут, однако сам датчик нашел применение в следующем варианте как вспомогательная система, сохраняющая данные о направлении при кратковременных потерях сигналов.

Вариант 4. Угломерная система на основе ультразвуковых датчиков. Данный вариант системы по ТЗ РКК «Энергия» разработан компанией РУКЭП [7] (г. Москва), имевшей опыт построения ультразвуковых систем. К достоинствам ультразвуковых систем позиционирования относятся:

- портативность и малая энергозатратность;
- хорошая точность измерения координат и углов;
- простота расчета результатов;
- безопасность для человека.

К недостаткам ультразвуковых систем позиционирования относятся:

- необходимость прямой видимости между излучателями и приемниками;
- снижение точности измерений при резких изменениях температуры и движении воздуха.

Разработанная РУКЭП угломерная система имеет два физически не связанных элемента: платформу приемников на иллюминаторе и платформу излучателей на фотоаппарате (рис. 3, 4).



Рис. 3. Платформа приемников на иллюминаторе и блок управления: 1 – иллюминатор; 2 – платформа приемников; 3 – блок управления и индикации



Рис. 4. Платформа излучателей на фотоаппарате (1)

Наличие двух платформ позволяет удачно решить проблему питания: платформа излучателей (работающая в энергосберегающем импульсном режиме) питается от аккумуляторной батареи фотоаппарата, а платформа приемников, связанная с бортовым компьютером экипажа через *USB*, получает питание по этому интерфейсу. Таким образом, не требуется отдельных источников питания, и при включении фотоаппарата (и постоянно работающем компьютере) система немедленно готова к работе.

Принцип работы системы заключается в постоянном излучении ультразвуковых импульсов, получении их приемниками и измерении времени прохождения импульсов от передатчиков до приемников. По времени прихода и известной скорости ультразвука рассчитываются все расстояния между излучателями, расположенными на камере, и приемниками, расположенными вокруг иллюминатора. По полученной совокупности всех расстояний в реальном времени вычисляются положение и ориентация камеры

относительно иллюминатора, при этом для вычисления ориентации требуется не менее трех передатчиков.

Для синхронизации приемников и передатчиков, а также для передачи в компьютер момента спуска затвора используются радиопередатчик на платформе излучателей и радиоприемник в блоке управления (см. патент РКК «Энергия» [8]).

В полный состав аппаратуры, получившей название системы координатной привязки фотоизображений с использованием ультразвука (СКПФ-У), входят:

- платформа излучателей, включающая в себя три ультразвуковых излучателя, устройство управления, трехосевой МЭМС-гироскоп, узел радиоканала (радиоприемопередатчик синхронизации и передачи данных). Платформа представляет собой моноблок, который крепится с помощью винта к имеющемуся штативному гнезду, расположенному в нижней части корпуса фотоаппарата;
- платформа приемников с кабелем, включающая в себя шесть ультразвуковых приемников, объединенных в приемную антенну, которая устанавливается на штатное посадочное место вокруг иллюминатора;
- блок управления и индикации, включающий узел обработки сигналов с усилителями, модуль радиоканала (радиоприемопередатчик приема данных и синхронизации);
- специальное программное обеспечение.

На рис. 5, 6 приведены блок-схемы СКПФ-У.

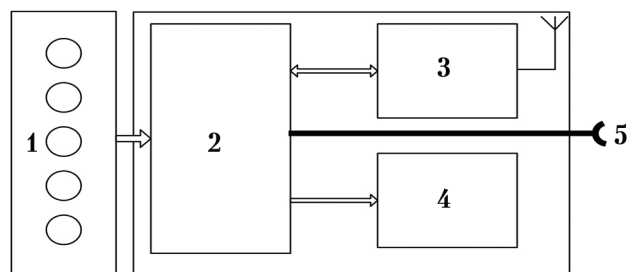


Рис. 5. Платформа приемников и блок управления и индикации: 1 – платформа приемников; 2 – узел обработки сигнала на микроконтроллере; 3 – радиоканал; 4 – узел индикации; 5 – разъем подключения к бортовому компьютеру

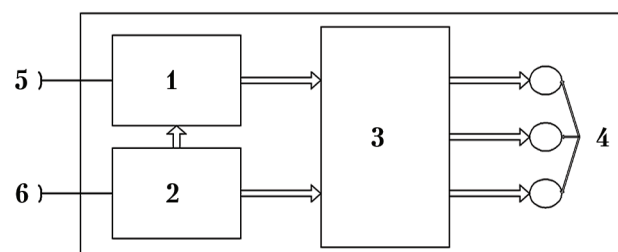


Рис. 6. Платформа излучателей: 1 – микроконтроллер с радиоканалом; 2 – стабилизатор напряжения; 3 – формирователь импульсов; 4 – ультразвуковые излучатели; 5 – разъем подключения к фотосъёмке фотоаппарата; 6 – разъем для подключения дистанционного управления фотоаппаратом

Анализ экспериментальной отработки угломерных систем показал преимущество варианта 4 (таблица), который был принят для внедрения в эксплуатацию.

Таблица

Сравнение вариантов угломерных систем

| № п/п | Критерии | Вариант | | | |
|-------|--|---------|------|----------|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Возможность автоматического расчета углового положения ЛВ камеры в связанной СК ПОС | нет | да | да | да |
| 2 | Точность определения углового положения ЛВ камеры в связанной СК ПОС | 1–3° | 1–2' | неудовл. | 1° |
| 3 | Усложнение процедуры съемки (ограничения на перемещения, необходимость выполнения дополнительных действий) | да | да | нет | нет |
| 4 | Возможность наведения по целеуказаниям | нет | да | да | да |
| 5 | Отдельный источник питания | нет | да | нет | нет |

Примечание. ЛВ – линия визирования; СК ПОС – система координат пилотируемой орбитальной станции.

Испытания и сертификация выбранного варианта

СКПФ-У прошла необходимый объем предполетных испытаний:

- на соответствие характеристик системы требованиям ТЗ;
- на механические воздействия;
- на климатические воздействия;
- на электромагнитную совместимость;
- на соответствие требованиям ГОСТ Р 50804-95 [9] в части воздействия ультразвукового излучения платформы излучателей СКПФ-У на человека-оператора.

Были проведены экспертизы радиационной стойкости, пожаробезопасности, санитарно-гигиеническая. На рис. 7 показано проведение испытания точностных характеристик системы.

Алгоритм привязки изображения

Основой алгоритма расчета координат точки пересечения ЛВ с земной поверхностью по данным угломерной системы является преобразование кватерниона разворота, выдаваемого системой, в матрицу разворота вектора ЛВ камеры. После этого методом итераций подбираются полярные координаты (соответствующие географическим координатам) вектора от центра до поверхности Земли. Этот вектор является разностью

радиуса-вектора ПОС и вектора текущего положения ЛВ. При расчете используются различные СК, позволяющие оперировать данными в наиболее удобном и естественном виде.



Рис. 7. Испытания системы координатной привязки фотоизображений на стенде измерения угловых и линейных параметров

Исходными данными для алгоритма расчета географических координат точки визирования являются:

- значение кватерниона разворота фотоаппарата $K_{ФА}$ как конечного результата работы системы с ультразвуковыми датчиками;
- матрицы разворота положения при установке платформы с приемниками относительно заданного иллюминатора M_1, M_2, M_3 . Три матрицы облегчают задание значений конкретных разворотов смонтированной рамки относительно осей иллюминатора, а также при необходимости позволяют отдельно задать величины, компенсирующие неточность установки рамки приемников.
- матрица разворота корпуса фотоаппарата относительно платформы излучателей M_{FU} ;
- матрица разворота заданного иллюминатора в инерциальную СК M_{IR} ;
- текущий радиус-вектор центра масс ПОС R_{ISK} и единичный радиус-вектор центра масс ПОС R_{0ISK} ;
- коэффициент сжатия геоида α_z как эллипсоида по оси Z согласно модели формы Земли WGS-84 [10];

Расчет координат точки визирования на земной поверхности проводится в следующем порядке:

1. Определяется матрица разворота рамки приемников относительно заданного иллюминатора как $M_{ZI} = M_1 \times M_2 \times M_3$;

Для выбранного иллюминатора № 6 реально рамка повернута вокруг оси X на 90° , т. е. $M_{1(1,1)} = 1$; $M_{1(2,3)} = 1$; $M_{1(3,2)} = -1$, остальные элементы матрицы нулевые. Вокруг «новой» (т. е. повернутой) оси Z рамка повернута на 180° , поэтому $M_{2(3,3)} = 1$; $M_{2(2,2)}$, $M_{2(1,1)} = -1$, остальные элементы матрицы нулевые.

Вокруг оси Y рамка повернута на -45° , поэтому $M_{3(1,1)}$, $M_{3(3,3)} = \cos(-45^\circ)$; $M_{3(1,3)} = -\sin(-45^\circ)$; $M_{3(2,2)} = 1$; $M_{3(3,1)} = \sin(-45^\circ)$, остальные элементы матрицы нулевые.

Матрица разворота фотоаппарата относительно платформы излучателей составляет для поворота от оси X на -90° как $M_{FU(1,1)} = 1$; $M_{FU(2,3)} = -1$; $M_{FU(3,2)} = 1$, остальные элементы матрицы нулевые.

2. Составляется матрица разворота платформы излучателей относительно рамки приемников по значению выданного аппаратурой кватерниона. Для этого составляются три вектора:

$$\mathbf{X}_{(1)} = 1 - 2(K_{\Phi A(3)} \times K_{\Phi A(3)} + K_{\Phi A(4)} \times K_{\Phi A(4)});$$

$$\mathbf{X}_{(2)} = 2(K_{\Phi A(2)} \times K_{\Phi A(3)} - K_{\Phi A(1)} \times K_{\Phi A(4)});$$

$$\mathbf{X}_{(3)} = 2(K_{\Phi A(2)} \times K_{\Phi A(4)} + K_{\Phi A(1)} \times K_{\Phi A(3)});$$

$$\mathbf{Y}_{(1)} = 2(K_{\Phi A(2)} \times K_{\Phi A(3)} + K_{\Phi A(1)} \times K_{\Phi A(4)});$$

$$\mathbf{Y}_{(2)} = 1 - 2(K_{\Phi A(2)} \times K_{\Phi A(2)} + K_{\Phi A(4)} \times K_{\Phi A(4)});$$

$$\mathbf{Y}_{(3)} = 2(K_{\Phi A(3)} \times K_{\Phi A(4)} - K_{\Phi A(1)} \times K_{\Phi A(2)});$$

$$\mathbf{Z}_{(1)} = 2(K_{\Phi A(2)} \times K_{\Phi A(4)} - K_{\Phi A(1)} \times K_{\Phi A(3)});$$

$$\mathbf{Z}_{(2)} = 2(K_{\Phi A(3)} \times K_{\Phi A(4)} + K_{\Phi A(1)} \times K_{\Phi A(2)});$$

$$\mathbf{Z}_{(3)} = 1 - 2(K_{\Phi A(2)} \times K_{\Phi A(2)} + K_{\Phi A(3)} \times K_{\Phi A(3)}).$$

Нормированные значения векторов \mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{Z} являются строками составляемой матрицы разворота, т. е. $M_{UZ(1)} = \mathbf{X}_{\text{норм}}$; $M_{UZ(2)} = \mathbf{Y}_{\text{норм}}$; $M_{UZ(3)} = \mathbf{Z}_{\text{норм}}$.

3. Определяется итоговая матрица разворота фотоаппарата относительно иллюминатора $M_{FZ} = M_{FU} \times M_{UZ}$; $M_{FI} = M_{FZ} \times M_{ZI}$. Для последующих расчетов используется матрица M_{IF} как транспонированная матрица M_{FI} .

4. Задается единичный вектор в СК иллюминатора и в инерциальной СК: $\mathbf{V}_1 = \mathbf{V} \times M_{IF}$; $\mathbf{V}_2 = \mathbf{V}_1 \times M_{IR}$, где единичный вектор \mathbf{V} в СК фотоаппарата имеет следующие составляющие: $\mathbf{V}_{(1)} = 0$; $\mathbf{V}_{(2)} = 1$; $\mathbf{V}_{(3)} = 0$.

5. Определяется косинус между полученным вектором и единичным радиусом-вектором ПОС: $\cos(\alpha) = \mathbf{R}_{ISK} \times \mathbf{V}_2$.

6. Методом итераций рассчитывается полярная координата φ точки пересечения вектора \mathbf{V}_2 с поверхностью Земли, которая считается эллипсоидом вращения с коэффициентом сжатия α_z согласно WSG-84 и экваториальным радиусом R_E . На первой итерации $\varphi = 0$.

$$R_{FF} = R_E(1 - \alpha_z \sin^2(\varphi)); \quad \mathbf{R}_{OR(1)} = \mathbf{R}_{ISK(1)} + D \times \mathbf{V}_{2(1)};$$

$$Z = R_{FF}^2 - |\mathbf{R}_{ISK}|^2 \sin^2(\alpha); \quad \mathbf{R}_{OR(2)} = \mathbf{R}_{ISK(2)} + D \times \mathbf{V}_{2(2)};$$

$$D = |\mathbf{R}_{ISK}| \cos(\alpha) - \text{sqrt}(Z); \quad \mathbf{R}_{OR(3)} = \mathbf{R}_{ISK(3)} + D \times \mathbf{V}_{2(3)};$$

$$\varphi = \arcsin(\mathbf{R}_{OR(3)} / R_{FF}),$$

здесь R_{FF} — это расстояние между плоскостью экватора и параллельной экватору плоскостью, проходящей через точку визирования (съемки); \mathbf{R}_{OR} — радиус-вектор точки визирования; D — дальность до этой точки.

7. После получения полярной координаты φ как широты искомой точки определяется ее долгота как полярная координата радиус-вектора \mathbf{R}_{OR} искомой точки с учетом текущего угла $T_{\text{звезд}}$ поворота Земли в инерциальной СК: $\lambda = \arctan(\mathbf{R}_{OR(2)} / \mathbf{R}_{OR(1)}) - T_{\text{звезд}}$.

Космический эксперимент «Визир»

С 2010 г. на Российском сегменте МКС в рамках программы космических экспериментов проводится технический космический эксперимент «Визир» [11–13] с целью:

- экспериментальной проверки и отработки в условиях космического полета программно-аппаратных средств определения текущего положения и/или ориентации объектов, перемещаемых или перемещающихся во внутренних объемах станции или по внешней поверхности, в пристанционном пространстве;
- отработки технологий использования данных о текущем положении и ориентации объектов для решения различных прикладных задач.

С помощью СКПФ-У космонавты на МКС выполнили свыше 6 000 снимков. Подтверждена работоспособность и заявленная погрешность определения пространственного положения (не более 2°). Реальная погрешность в большинстве случаев не превышала 1° , что при текущей высоте орбиты МКС соответствует примерно 7–8 км на местности. Величина «промаха» между реальным и расчетным центрами снятых районов варьировалась от 400 м до 15 км.

Система, установленная на иллюминаторе № 6 служебного модуля МКС, представлена на рис. 8.

Работа космонавта Артемьева О.Г. с СКПФ-У представлена на рис. 9.



Рис. 8. Система координатной привязки фотоизображений в сборке на иллюминаторе № 6 служебного модуля МКС: 1 – иллюминатор; 2 – платформа приемников; 3 – длиннофокусный объектив; 4 – платформа излучателей; 5 – фотоаппарат; 6 – блок управления



Рис. 9. Работа космонавта Артемьева О.Г. с системой координатной привязки фотоизображений на МКС

Наличие рассчитанных координат в реальном времени позволяет использовать СКПФ-У не только для фиксации результатов съемки, но и для помощи космонавту при наведении фотоаппарата на заранее заданный объект. Поскольку при работе СКПФ-У в бортовом компьютере постоянно имеется рассчитанная разница между требуемым и текущим положениями ЛВ камеры, программное обеспечение может генерировать голосовые команды простейших указаний по наведению («вверх», «вправо», «чуть правее» и т. п.), направляющие космонавта с фотоаппаратом в руках на заданную точку. Направление указаний по поворотам связано с СК фотоаппарата и зависит от положения фотоаппарата и космонавта у иллюминатора, например, при перевороте меняются местами команды «право-лево» и «вверх-вниз». Таким образом, появляется аналог автоматического привода поворотной платформы, когда роль этой платформы играет человек. Как показали эксперименты, это вполне действенный метод наведения, особенно в условиях облачности, ночи, отсутствия видимых ориентиров и т. п.

В процессе выполнения космического эксперимента «Визир» космонавты дали ценные рекомендации и предложения по улучшению эксплуатационных свойств СКПФ-У, которую они активно использовали. Например, по предложению космонавта А. Мисуркина алгоритм выдачи целеуказаний был дополнен проверкой попадания оси ЛВ внутрь рамки приемников.

Пример расчета координат снимка с помощью СКПФ-У

На рис. 10, 11 приведен пример расчета географических координат снятого района с помощью СКПФ-У и сравнение его с истинными координатами снимка.

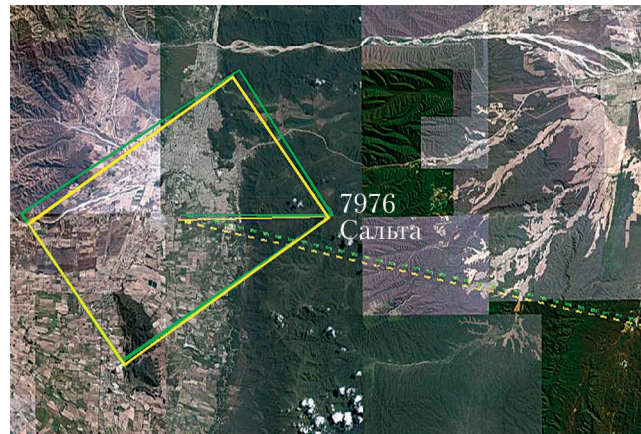


Рис. 10. Пример расчета координат на ортофотоплане по данным СКПФ-У. Район г. Сальта (Аргентина). — расчетный контур снятой местности; — истинный контур, полученный наложением полученного изображения на ортофотоплан (рис. 11); пунктирными линиями расчетный и реальный центры изображений соединены с подспутниковой точкой

Примечание. Погрешность определения центра изображения составила 570 м.



Рис. 11. Изображение г. Сальта (Аргентина), опознанное и наложенное на ортофотоплан. Съемка 21 января 2015 г. с борта МКС. Фотоаппарат Nikon D4. Фокус 700 мм. Дальность 420 км. Масштаб исходного изображения 4,6 м/пиксель. Расчет координат с помощью системы координатной привязки фотоизображений позволил уверенно опознать местность, несмотря на наличие облачности

Пример съемки при выдаче целеуказания от СКПФ-У

На рис. 12, 13 приведен пример расчета географических координат снятого района с помощью СКПФ-У и сравнение его с истинными координатами снимка. При этом проводилась выдача целеуказаний голосовыми командами, что позволило космонавту Е. Серовой навести камеру на заранее выбранный объект в условиях сильной облачности и полного отсутствия ориентиров.

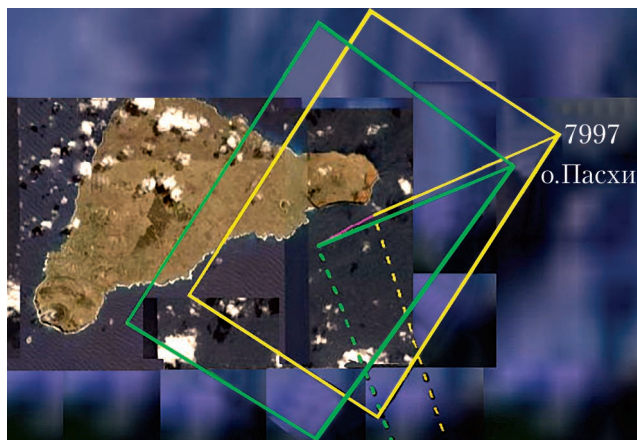


Рис. 12. Пример расчета координат при выдаче целеуказания для наведения фотоаппарата. Район о. Пасхи (Чили). — расчетный контур снятой местности; — истинный контур, полученный наложением изображения на ортофотоплан (рис. 13); пунктирными линиями расчетный и реальный центры изображений соединены с подспутниковой точкой

Примечание. Погрешность определения центра изображения составила 4,2 км.

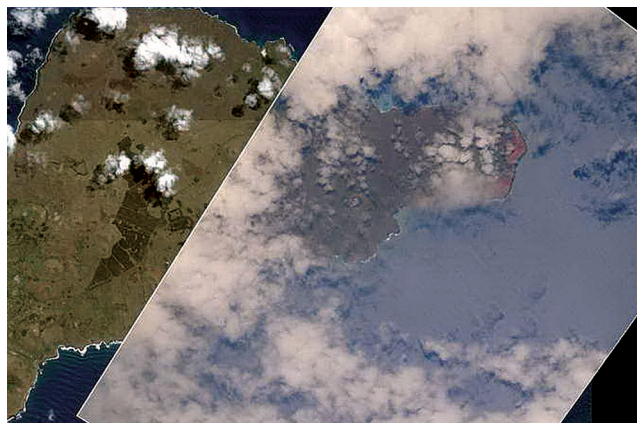


Рис. 13. Изображение о. Пасхи (Чили), наложенное на ортофотоплан. Съемка 21 января 2015 г. с борта МКС. Фотоаппарат Nikon D4. Фокус 700 мм. Дальность 420 км. Масштаб исходного изображения 4,6 м/пиксель

Заключение

Быстрый прогресс цифровой фототехники в последние десятилетия позволил существенно повысить качество съемок Земли космонавтами через иллюминаторы и приблизить его к уровню съемок специальной

аппаратурой. Например, сейчас можно вести съемку профессиональным цифровым фотоаппаратом с выдержками до $1/2000$ с со скоростью три кадра в секунду, а разрешение снимков земной поверхности может достигать 2–3 м/пиксель.

Однако при этом потребовались и новые средства обеспечения съемок, в частности, средства, облегчающие координатную привязку снимков, выполненных камерой, свободно перемещающейся в момент съемки.

Проведенные в этом направлении РКК «Энергия» работы позволили решить главную задачу — определение пространственного положения камеры, не имеющей механической связи с конструкцией ПОС.

Можно ожидать, что по мере дальнейшей отработки этих средств и методов их эксплуатации все съемки земной поверхности свободно перемещаемыми камерами будут выполняться космонавтами с их использованием. Это, в свою очередь, повысит результативность таких съемок и оперативность их обработки.

Список литературы

1. Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Караваев Д.Ю., Легостаев В.П., Рязанцев В.В., Юрина О.А. Особенности проведения и использования результатов съемки земной поверхности, выполняемых экипажами Российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии. 2015. № 1(8). С. 17–30.
2. Кожевников Н.П., Крашенинников Г.Д., Каликов Н.П. Фотограмметрия. М.: Геодезиздат, 1960. 532 с.
3. Stefanov W.L., Hunter S., Smith E., Smith T. ISS Geocam project: on-orbit digital still camera pointing system (DSCPS), Oral/Visual Presentation, 18 November 2014. NASA Johnson Space Center, Houston, TX, USA. Document ID: 20140017120, Report/Patent Number: JSC-CN-32420.
4. Научно-Производственная Компания «Оптолинк». Режим доступа: <http://www.optolink.ru/> (дата обращения 15.03.2016 г.).
5. Патент RU 2 353 902 С2. Российская Федерация. Способ определения географических координат изображений объектов на поверхности планеты при съемке с пилотируемого космического аппарата; Виноградов П.В., Крикалев С.К., Калери А.Ю., Бронников С.В., Караваев Д.Ю., Рожков А.С., Малименков Е.И.; заявитель и патентообладатель — ОАО РКК «Энергия»; заявка 2007117663/28; приоритет от 11.05.2007 // Изобретения. 2009. № 12.
6. Xsens Technologies. Режим доступа: <https://www.xsens.com/> (дата обращения 15.03.2016 г.).

7. Компания РУКЭП. Режим доступа: <http://rucap.ru/> (дата обращения 15.03.2016 г.).

8. Патент RU 2 524 045 С2. Российская Федерация. Способ определения географических координат изображений области наблюдения, перемещаемой относительно космического аппарата аппаратуры наблюдения, система для его осуществления и устройство размещения излучателей на аппаратуре наблюдения; Бронников С.В., Рожков А.С., Караваев Д.Ю., Рулев Д.Н., Рурин О.С., Калифатиди А.К.; заявитель и патентообладатель — ОАО РКК «Энергия»; заявка 2012134961/28; приоритет от 16.08.2012 // Изобретения. 2014. № 6.

9. ГОСТ Р 50804-95. Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. 106 с.

10. NIMA Technical Report TR8350.2. Department of defense world geodetic system 1984, its definition and relationships with local geodetic systems. 3rd edition. 4 July 1997.

11. Бронников С.В., Караваев Д.Ю., Рожков А.С., Малименков Е.А. Фотосъемка с рук космонавтом земной поверхности с автоматической привязкой полученных изображений и помощь в наведении на объект съемки // Научные исследования и эксперименты на МКС. Международная научно-практическая конференция. 9–11 апреля 2015. ИКИ РАН, Москва.

12. Боровихин П.А., Караваев Д.Ю., Лепорский А.П., Соколов Д.А. Методика определения положения объекта внутри орбитальной станции // 50 Научные чтения памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 15–17 сентября 2015 г. Тезисы докладов. Изд-во РАН. С. 109.

13. Бронников С.В., Караваев Д.Ю., Рожков А.С. Исследование технологий позиционирования в космическом эксперименте «Визир» // 50 Научные чтения памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 15–17 сентября 2015 г. Тезисы докладов. Изд-во РАН. С. 109–110.

Статья поступила в редакцию 24.03.2016 г.

Reference

1. Belyaev M.Yu., Desinov L.V., Karavaev D.Yu., Legostaev V.P., Ryazantsev V.V., Yurina O.A. Osobennosti provedeniya i ispol'zovaniya rezul'tatov s'emki zemnoi poverkhnosti, vypolnyaemykh ekipazhami Rossiiskogo segmenta MKS [Features of imaging the Earth surface and using the results of the imaging made by the ISS Russian Segment crews]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2015, no. 1(8), pp. 17–30.

2. Kozhevnikov N.P., Krashennnikov G.D., Kalikov N.P. *Fotogrammetriya* [Photogrammetry]. Moscow, Geodezizdat publ., 1960. 532 p.

3. Stefanov W.L., Hunter S., Smith E., Smith T. ISS Geocam project: on-orbit digital still camera pointing system (DSCPS), Oral/Visual Presentation, 18 November 2014. NASA Johnson Space Center, Houston, TX, USA. Document ID: 20140017120, Report/Patent Number: JSC-CN-32420.

4. Nauchno-Proizvodstvennaya Kompaniya «Optolink» [Research-and-Production Company Optolink]. Available at: <http://www.optolink.ru/> (accessed 15.03.2016).

5. Patent RU 2 353 902 C2. Rossiiskaya Federatsiya. Sposob opredeleniya geograficheskikh koordinat izobrazhenii ob'ektov na poverkhnosti planety pri s'emke s pilotiruemogo kosmicheskogo apparata [The method for determining geographical coordinates of the images of objects on the planet surface when shooting from manned spacecraft]. Vinogradov P.V., Krikalev S.K., Kaleri A.Yu., Bronnikov S.V., Karavaev D.Yu., Rozhkov A.S., Malimenkov E.I.; the applicant and the patent owner — ОАО РКК «Энергия»; application 2007117663/28; priority of 11.05.2007. *Izobreteniya*, 2009, no. 12.

6. Xsens Technologies. Available at: <https://www.xsens.com/> (accessed 15.03.2016).

7. Kompaniya RUCAP [RUCAP]. Available at: <http://rucap.ru/> (accessed 15.03.2016).

8. Patent RU 2 524 045 S2. Rossiiskaya Federatsiya. Sposob opredeleniya geograficheskikh koordinat izobrazhenii oblasti nablyudeniya, peremeshchaemoi otnositel'no kosmicheskogo apparata apparatury nablyudeniya, sistema dlya ego osushchestvleniya i ustroystvo razmeshcheniya izluchatelei na apparature nablyudeniya [The method for determining geographical coordinates of the images of the observation area, the observation equipment moving relative to the spacecraft, the system for its implementation and the device for locating emitters on the observation equipment]. Bronnikov S.V., Rozhkov A.S., Karavaev D.Yu., Rulev D.N., Rurin O.S., Kalifatidi A.K.; the applicant and the patent owner — ОАО РКК «Энергия»; application 2012134961/28; priority of 16.08.2012. *Izobreteniya*, 2014, no. 6.

9. GOST R 50804-95. Sreda obitaniya kosmonavta v pilotiruemom kosmicheskom apparate [Cosmonaut habitable environment in manned spacecraft]. 106 p.

10. NIMA Technical Report TR8350.2. Department of defense world geodetic system 1984, its definition and relationships with local geodetic systems. 3rd edition. 4 July 1997.

11. Bronnikov S.V., Karavaev D.Yu., Rozhkov A.S., Malimenkov E.A. *Fotos'emka s ruk kosmonavtom zemnoi poverkhnosti s avtomaticheskoi privyazkoi poluchennykh izobrazhenii i pomoshch' v navedenii na ob'ekt s'emki* [Photography of the earth's surface using a hand-held camera of the cosmonaut with automatic reference of the obtained images and assistance in pointing to the photography object]. *Nauchnye issledovaniya i eksperimenty na MKS. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, 9–11 April 2015, IKI RAN, Moscow.*

12. Borovikhin P.A., Karavaev D.Yu., Leporskii A.P., Sokolov D.A. *Metodika opredeleniya polozheniya ob'ekta vnutri orbital'noi stantsii* [Methods to determine the object position inside the orbital station]. *50 Nauchnye chteniya pamyati K.E. Tsiolkovskogo, abstracts. Kaluga, 15–17 September 2015, RAS publ., p. 109.*

13. Bronnikov S.V., Karavaev D.Yu., Rozhkov A.S. *Issledovanie tekhnologii pozitsionirovaniya v kosmicheskom eksperimente «Vizir»* [Study of the positioning technologies in space experiment Vizir]. *50 Nauchnye chteniya pamyati K.E. Tsiolkovskogo, abstracts. Kaluga, 15–17 September 2015, RAS publ., pp. 109–110.*