

УДК 629.78:528.8:629.7.05

## ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ

© 2012 Ю. В. Белов, С. В. Шиханов

ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Рассматривается перспективная интегрированная система управления космическим аппаратом дистанционного зондирования Земли (картографирования) на основе многофункционального использования бортовой аппаратуры в целях минимизации её массо-энергетических и стоимостных показателей.

*Интеграция, многофункциональность аппаратуры, информационно-измерительное устройство, бортовой спецкомплекс, бортовой комплекс управления.*

Характерной чертой развития космических систем дистанционного зондирования Земли является усложнение космического аппарата (КА), что обусловлено всё возрастающими требованиями к таким основным критериям их эффективности, как качество получаемой информации, оперативность её доставки потребителю и производительность. Отмеченная особенность приводит к возрастанию массы и энергопотребления аппаратуры зондирования и бортовых обеспечивающих систем, а в сочетании с требованием повышения их экономической эффективности - к увеличению сроков активного функционирования КА, запасов расходуемых ресурсов и стоимости. Особенно актуальна проблема минимизации массы при создании малых КА.

Её решение системными средствами ведётся в двух направлениях. Первое основано на упрощении и улучшении массо-энергетических показателей (МЭП) модернизируемой и новой аппаратуры за счёт усложнения логики управления последней, реализуемой в бортовой цифровой вычислительной машине.

Примерами являются переход к созданию бескарданных систем ориентации, в которых гироскопическая платформа с громоздкими устройствами подвеса со следящими приводами «заменяется» интегрированием кинематических уравнений, а также при-

менение в последних разработках ЦСКБ двухступенных гиросиловых стабилизаторов (гиродинов) с лучшими МЭП вместо более сложных конструктивно, но простых в управлении «спаренных» гироскопов. Создаются также системы энергоснабжения с гибким управлением структурой и режимами работы составных частей с учётом их внутреннего состояния, энергетических и ресурсных возможностей и требований со стороны бортовых потребителей электроэнергии к параметрам и качеству питающего напряжения.

Вторым важным направлением минимизации массо-энергетических и стоимостных показателей бортовой аппаратуры (БА) и сокращения потребных запасов топлива является более полная реализация их потенциальных возможностей за счёт использования в нескольких бортовых системах. Успешному развитию этого направления в настоящее время способствует тот фактор, что во многих случаях приборы и методы, реализующие близкие функции в различных бортовых и наземных системах, построены на одних и тех же физических принципах. Например, прецизионные оптико-электронные приборы в системах автономной навигации и ориентации и оптико-электронные звёздные аппараты (ЗА) в бортовых спецкомплексах (БСК) для определения угловых

элементов внешнего ориентирования (УЭВО) снимков.

Разработанное единое информационно-измерительное устройство (ИИУ), предназначено для высокоточного определения угловых и линейных элементов

внешнего ориентирования снимков, т.е. визирной системы координат (ВСК) и обеспечения ориентации последней. Структурная схема единого ИИУ интегрированного комплекса БА приведена на рис.1.

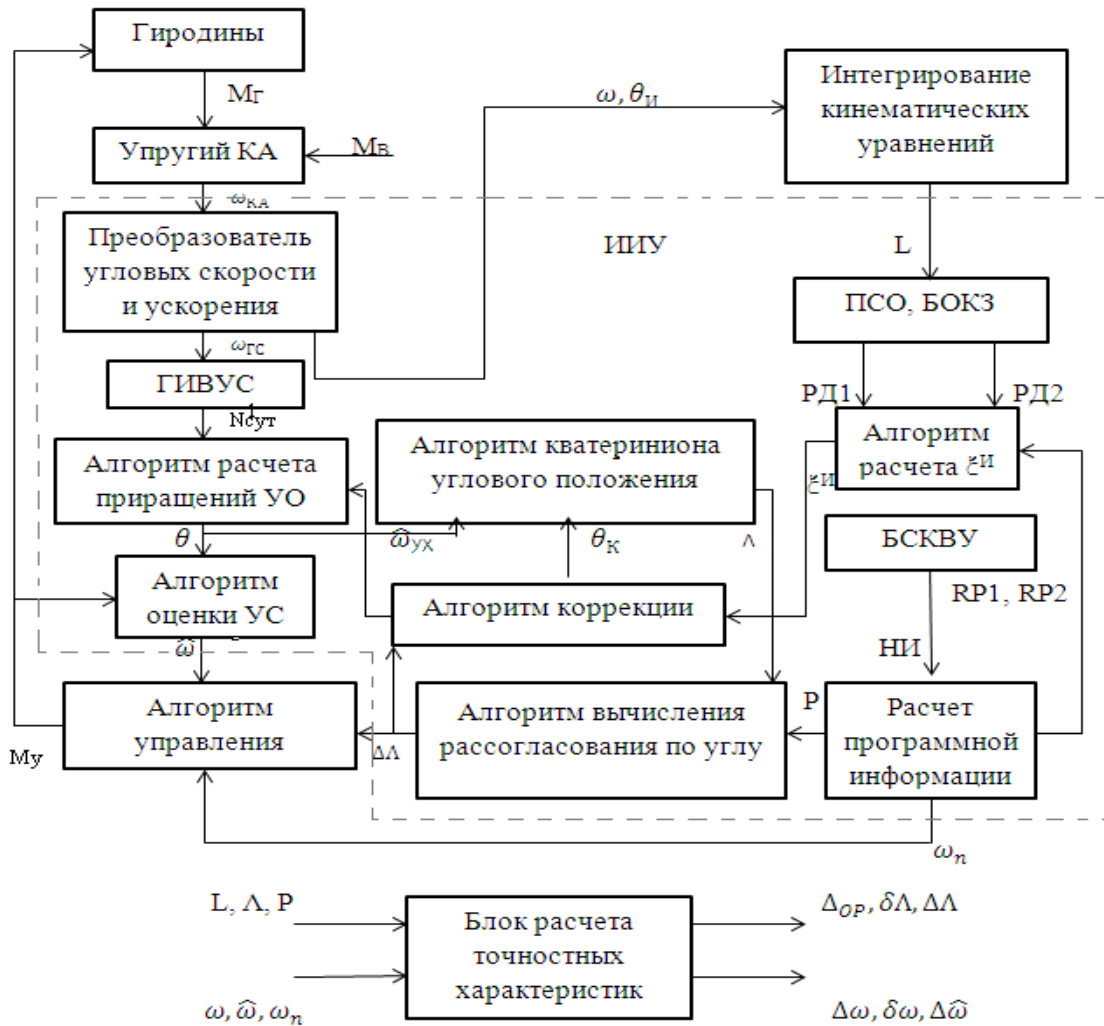


Рис. 1. Структурная схема ИИУ единого интегрированного комплекса БА

На рис. 1:

$\Theta_{и}$  - приращение угла ориентации (УО) КА, преобразованное в ВСК;

$\Theta$  - оценка  $\Theta_{и}$  по измерениям гироскопического измерителя вектора угловой

скорости (ГИВУС) и прибора согласования осей (ПСО) [1];

$\omega$  - вектор фактической абсолютной угловой скорости (УС) КА в проекциях на оси ВСК;

$\omega_n$ ,  $V$  - векторы программной и оцененной абсолютной угловой скорости ВСК;

$\omega_{uz}$  - вектор оценок «уходов» гироскопов ГИВУС в ВСК;

$RD1(2)$ ,  $RP1(2)$  - измеренные и программные координаты астроориентиров в осях ВСК;

$\Delta_{op} = P \circ L(\Delta\omega = \omega - \omega_n)$  - ошибки ориентации ЦА по углу (угловой скорости);

$\Delta\Lambda = \tilde{P} \circ \Lambda(\Delta v = v - \omega_n)$  - ошибки стабилизации ЦА по углу (угловой скорости);

$M_u$ ,  $M_g$ ,  $M_b$  - формируемый в соответствии с законом управления КА, воспроизводимый гиродинами и возмущающий моменты;

$\omega_{KA}$ ,  $\omega_{GC}$  - векторы угловой скорости КА в осях, связанных с КА и ГИВУС;

$\varepsilon^H$  - рассогласование вычисленного по измерениям ПСО и программного, определяемого по навигационной информации (НИ), положений рабочих астроориентиров:

$$\varepsilon^H = \frac{\varepsilon_1 + RP1[(\varepsilon_2, RP1) + \alpha_{12}(\varepsilon_1, RP2)]}{(1 - \alpha_{12})^2},$$

где

$$\alpha_{12} = (RP1, RP2); \varepsilon_1 = RD1 \times RP1; \varepsilon_2 = RD2 \times RP2;$$

$\delta\Lambda = \tilde{\Lambda} \circ L(\delta\omega = \omega - v)$  - погрешности оценок УО (УС);

$\Theta_k$  - сигнал коррекции для вычисления  $\Lambda$  - оценки  $L$ ;

$L$  - кватернион истинного углового положения ЦА в инерциальной системе координат;

$N_{oji}^1$  - число импульсов  $i$ -го канала  $j$ -го измерительного блока за 1-й такт опроса;

$P$  - программный кватернион.

Включение в состав бортовых средств высокоточного измерителя угловой скорости (или приращений углов ориентации) позволяет существенно снизить ошибки определения на борту КА угловой ориентации ВСК, оказывающих заметное влияние на точность создаваемых крупномасштабных цифровых карт и формирования целеуказаний. Кроме того, использование приращений углов позволяет на последующих этапах обработки мак-

симально приблизить растровое изображение местности к гладкой картине реального изображения. В целях реализации требуемых высоких точностных характеристик определения (единицы угл.с) и обеспечения ориентации оптических осей ЦА, ресурса (до 10 лет), надёжности, а также минимизации МЭП и стоимости космического комплекса в целом, целесообразно разработку унифицированной системы управления вести в направлении создания перспективного комплекса БА КА, решающего одновременно задачи БСК и бортового комплекса управления, на базе ИИУ, в состав которого входят бортовое синхронизирующее координатно-временное устройство (БСКВУ), ПСО (функционально), конструктивно входящий в состав топографического оптико-электронного комплекса (ТОЭК), а также блок определения координат звёзд (БОКЗ) и прецизионный бесплатформенный ГИВУС типа КИНД34-020 разработки НИИ прикладной механики (масса 12,5 кг), успешно прошедший лётную отработку и длительную штатную эксплуатацию на многих отечественных и зарубежных КА.

В реальной работе на борту КА ГИВУС калибруется два раза в сутки. В промежутках между калибровками точность определения ориентации целевой аппаратуры (ЦА) всецело зависит от сохранения прибором калибровочного значения нулевого сигнала. По результатам лётных испытаний и штатной эксплуатации прибора КИНД34-020 на КА «Ямал-100» случайная составляющая нулевого сигнала в конкретном включении сохраняет своё значение (0,0015-0,002°/ч) в течение нескольких лет [2].

Альтернативой ГИВУС для определения УЭВО снимков может являться прибор, разрабатываемый НПП «Антарес» на основе волоконно-оптического гироскопа, обладающий, однако, на порядок большим значением случайной составляющей нулевого сигнала в конкретном включении в течение 24 часов (некорректируемый дрейф) [3], по которому нет опыта эксплуатации.

В составе ТОЭК предусматриваются система автоматической фокусировки (САФ) и ПСО.

САФ предназначена для обеспечения контроля положения и восстановления совмещения плоскостей изображения объективов с плоскостями фоточувствительных поверхностей оптико-электронных преобразователей системы приёма и преобразования информации.

ПСО предназначен для измерения малых углов отклонения осей объективов от их номинального положения и представляет собой фотозлектрический коллиматор, во входной зрачок которого из контролируемых объективов направляются параллельные пучки лучей, создаваемых точечными источниками излучения, расположенными в фокальных плоскостях их оптических систем.

При этом ПСО и БОКЗ в общем случае обеспечивают разновременные измерения координат отдельных астроориентиров, а ГИВУС обеспечивает определение разностей углов ориентации КА в интервале между измерениями, за счёт чего возникает избыточность информации. Это приводит, с одной стороны, за счёт её статистической обработки к повышению точности определения УЭВО, а с другой - к существенному снижению требований к БОКЗ (по чувствительности и углу зрения) и ГИВУС (по постоянному «уходу») и, как следствие, дополнительному улучшению МЭП.

Статистическая обработка измерительной информации, поступающей с ПСО, БОКЗ и ГИВУС, с привлечением НИ традиционно проводится на борту КА (астрокалибровка ГИВУС с использованием фильтра оценивания постоянных составляющих его нулевого сигнала и погрешности масштабного коэффициента (цены импульса выходного сигнала) на каждом шаге поступления измерительной информации без её запоминания на борту КА) с целью оперативного получения информации об ошибках ориентации визирных осей ЦА по углу и угловой скорости в инерциальной системе координат и ис-

пользования её в каналах управления их угловым движением.

Она же может и должна использоваться для оперативного определения УЭВО снимков на борту КА.

Нет необходимости повторять эту операцию на Земле с передачей и хранением полного объёма измерительной информации и ненужной загрузкой бортовой системы сбора служебной информации, высокоскоростной радиолинии и каналов связи наземного комплекса приёма, обработки и распространения космических данных.

Целесообразность использования одного и того же кватерниона ориентации ВСК, обновляемого с частотой смены кадров изображения как для определения, так и для обеспечения её ориентации в пространстве, вытекает из необходимости (с точки зрения максимальной точности восстановления непрерывного сигнала из дискретного) обеспечить высокую «плавность» (минимальную угловую скорость) движения источника информации.

Высокая стабильность привязки визирных осей ЦА к осям чувствительности ИИУ будет достигаться при этом установкой компонентов ТОЭК, БОКЗ и ГИВУС в непосредственной близости друг от друга на единую платформу повышенной жёсткости с низким коэффициентом температурных деформаций.

Кроме того, в этом случае значительно упрощаются функции интегрированной системы управления (ИСУ) в части управления ориентацией КА, т.к. её роль в режиме работы ЦА сводится лишь к обнулению кватерниона ориентации ВСК с помощью системы гиродинов и не требуется достаточно сложная юстировка взаимного углового положения посадочных мест чувствительных элементов системы управления движением и ЦА.

С помощью только ПСО задача высокоточного определения ориентации визирных осей объективов в пространстве может быть решена наиболее рационально, если совместить режим контроля положения осей с режимом астроконтроля

согласования осей. В этом случае в фокальной плоскости ПСО осуществляется попеременная регистрация кадров изображений участка звёздного неба с помощью пентагонального отражателя, размещённого перед входным зрачком ПСО, и кадров контроля положения визирных осей. Призмённые системы, передающие излучения из объективов ТОЭК в ПСО, перекрывают незначительную часть площади его входного зрачка, что позволяет с помощью пентагонального отражателя вести съёмку участка небесной сферы, расположенного в направлении, перпендикулярном оси ПСО. Определение в системе координат матричного фотоприёмного устройства ПСО координат изображений звёзд и координат изображений точечных источников излучения, расположенных в фокальных плоскостях объективов ТОЭК, обеспечит однозначную информацию об ориентации осей объективов в пространстве. Эта операция не будет являться помехой для основной работы на маршруте съёмки и может проводиться с достаточно высокой частотой обновления информации. Каждый период обновления будет включать:

- экспозицию кадра контроля положения визирных осей объективов при закрытом входном зрачке пентагонального отражателя;

- регистрацию кадра звёздного неба при открытом входном зрачке пентагонального отражателя и выключенных точечных источниках излучения, расположенных в фокальных плоскостях объективов.

Это ещё один пример многофункционального использования БА.

Преимуществом такой схемы функционирования КА является также исключение режима периодической с разворотами КА калибровки взаимного положения ЦА и БОКЗ в полёте, принципиально не обеспечивающего определения их расогласования непосредственно на участке целевой работы.

Проведённые синтез основных параметров и аналитическая оценка точно-

сти ИИУ, удовлетворяющего критерию минимума **БА**, показали также реальность обеспечения динамико-информационной совместимости ИИУ, ИСУ и упругого КА и высоких точностей определения и обеспечения ориентации ЦА при комплексировании ПСО, ГИВУС, БОКЗ и БСКВУ в едином ИИУ без использования громоздких ЗА и бескарданной инерциальной системы на базе электростатических гироскопов.

Существует также принципиальная возможность (реализованная на КА «Монитор-Э») совместного (одновременного) управления траекторным и угловым («разгрузка» силового гироскопического комплекта) движениями за счёт использования одних и тех же управляющих ракетных двигателей малой тяги и единого запаса рабочего тела комплексной двигательной установки, предназначенного, в первую очередь, для коррекции орбиты. Это позволит отказаться от других - электромагнитной и аэродинамической, неэффективной на больших высотах, - систем «сброса» аккумулируемого в процессе полёта кинетического момента КА.

Таким образом, показана целесообразность и возможность реализации предложенного принципа на борту перспективных КА в целях минимизации их МЭП и стоимостных показателей.

#### Библиографический список

1. Топографический оптико-электронный комплекс для космической системы «Ресурс-П»: Пояснительная записка. - ОАО «ЛОМО», 2006.

2. Волынцев, Л. А. Опыт создания высокоточных поплавковых гироскопов, применяемых в системах угловой ориентации КА и станций [Текст] / Л. А. Волынцев, Л. А. Дудко, Б. А. Казаков [и др.] // Доклад на 10-й Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, НИИ ПМ, РКК «Энергия», 2003. - 10 с.

3. Измеритель угловой скорости волоконно-оптический с акселерометрами: Техническое задание на составную часть ОКР, ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2001.

## **INTEGRATED SYSTEM OF CONTROLLING EARTH REMOTE SENSING SPACECRAFT ON THE BASIS OF MULTIFUNCTIONAL USAGE OF ONBOARD EQUIPMENT WITH THE AIM OF MINIMIZING MASS-ENERGY AND COST PARAMETERS**

© 2012 Yu. V. Belov, S. V. Shikhanov

TsSKB-Progress, Samara

The paper presents a promising integrated system of controlling Earth remote sensing (mapping) spacecraft on the basis of multifunctional usage of onboard equipment with the aim of minimizing mass-energy and cost parameters, i.e. more full realization of the equipment's potentialities through its use in several onboard systems.

*Integration, multifunctional equipment, data-measuring device, onboard special-purpose complex, onboard control system.*

### **Информация об авторах**

**Белов Юрий Вячеславович**, кандидат технических наук. Область научных интересов: многофункциональное использование аппаратуры на борту космического аппарата.

**Шиханов Сергей Вячеславович**, инженер-конструктор, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: [Shihanoff@mail.ru](mailto:Shihanoff@mail.ru). Область научных интересов: проектирование космических аппаратов, оптимизация проектно-баллистических характеристик КА.

**Belov Yuriy Vyacheslavovich**, candidate of engineering. Area of research: multifunctional use of spacecraft onboard equipment.

**Shikhanov Sergey Vyacheslavovich**, undergraduate student, design engineer, Space Rocket Center "TsSKB-Progress". E-mail: [Shihanoff@mail.ru](mailto:Shihanoff@mail.ru). Area of research: spacecraft design, optimization of spacecraft design ballistic characteristics.