

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АСТРОИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассматриваются требования, предъявляемые к астроинерциальным системам управления движением (СУД) перспективных астрофизических космических аппаратов (КА).

Приводится один из возможных вариантов алгоритмов прецизионной СУД для астрофизических КА. Методом математического моделирования определяются точностные и динамические требования к измерительным средствам и исполнительным органам СУД. Разработаны рекомендации по выбору приборного состава с точки зрения минимизации энерго-массовых характеристик и увеличения ресурса работы СУД.

Введение

Космические аппараты (КА) наблюдения можно разделить на два класса в зависимости от наблюдаемых объектов: КА дистанционного зондирования Земли и астрофизические КА. К системам управления движением (СУД) этих классов КА предъявляются различные требования по маневренности, ориентации в сеансах наблюдения, длительности наблюдения за исследуемым объектом. В статье рассматриваются проблемы создания СУД астрофизических КА.

Астрофизические исследования с помощью космических средств являются одним из важнейших направлений современных научных исследований Вселенной. Широкое распространение это направление получило за рубежом.

С помощью КА *HST*, *Herschel*, *Planck* (и др.) получены значимые научные открытия. В настоящее время разрабатываются качественно новые проекты: космический телескоп Вебба (*Webb Space Telescope*), который будет исследовать объекты ранней Вселенной, обладающие большим красным смещением; кластерная система *Darwin*, предназначенная для поиска планет, условия на которых благоприятны для жизни, астрофизическая обсерватория *ATLAST* [1, 2].

В России также успешно осуществляются астрофизические исследования с помощью космического радиотелескопа (КА «Спектр-Р»). В дальнейшем планируется запуск международных астрофизических обсерваторий «Спектр-РГ» и «Спектр-УФ», предназначенных для проведения исследований космического пространства в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах излучения с высоким угловым разрешением.

Лобанов Валентин Степанович. Кандидат технических наук, с.н.с., начальник отдела ФГУП «Центральный научно-исследовательский машиностроения» (г. Королев, Московская обл.). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Тарасенко Наталия Владимировна. Кандидат технических наук, доцент по специальности, начальник сектора ФГУП «Центральный научно-исследовательский машиностроения».

Шульга Дмитрий Николаевич. Главный специалист ФГУП «Центральный научно-исследовательский машиностроения».

Зборошенко Валентина Николаевна. Главный специалист ФГУП «Центральный научно-исследовательский машиностроения».

Беляев Борислав Борисович. Кандидат технических наук, ведущий специалист ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» (г. Химки, Московская область).

Статья по докладу на XXVIII конференции памяти Н.Н.Острякова.

Одной из проблем создания СУД астрофизических КА является обоснование требований к приборному составу системы в части измерительных средств и исполнительных органов и разработка алгоритмического обеспечения СУД для выполнения целевой задачи – стабилизации КА относительно направления на исследуемый объект в инерциальном пространстве с заданной точностью.

В статье сформулированы требования к астроинерциальным системам перспективных астрофизических КА, разработаны рекомендации по оптимизации приборного состава СУД.

Требования к системе управления движением астрофизических КА

Требования к системе управления движением перспективных отечественных астрофизических КА определяются функционированием целевой аппаратуры (ЦА):

- сроком активного существования – до 15 лет;
- точностью наведения и стабилизации ЦА – от 2.5 до 0.1 угл. с по углу и 10^{-5} град/с по угловой скорости (3σ);
- функционированием в радиационных поясах Земли;
- нежесткостью элементов конструкции КА.

Основным требованием, влияющим на структуру и состав СУД астрофизического КА, является точность наведения и стабилизации целевой аппаратуры (ЦА) в инерциальном пространстве.

Для отечественных КА типа «Спектр-Р», «Спектр-РГ» необходима точность наведения ЦА на объекты исследования порядка 20 угл. с и точность стабилизации относительно оси визирования ± 2.5 угл. с (3σ). В этом случае СУД строится на основе астроинерциального комплекса, в состав которого входит прецизионный гироскопический измеритель вектора угловой скорости (ГИВУС) и звездные датчики. Исполнительным органом СУД является комплекс управляющих двигателей-маховиков (КУДМ). Летные испытания КА «Спектр-Р» показали, что заданные точности наведения и стабилизации в режимах научных наблюдений обеспечиваются [1].

Для перспективных КА типа «Спектр-УФ» требуются более высокие точности наведения и стабилизации ЦА: $\sim 0,1$ угл. с. Обеспечение таких точностей наведения телескопа с помощью СУД, построенной по традиционной схеме с использованием звездных датчиков, установленных на корпусе КА, проблематично из-за трудностей, связанных с компенсацией собственных (случайных и систематических) погрешностей звездных датчиков, взаимной юстировкой приборных осей датчиков, установленных на корпусе и осей, связанных с телескопом, по причине упругих и тепловых деформаций корпуса КА и телескопа. Поэтому предлагается ввести кроме основного контура наведения, обеспечивающего относительно «грубую» ориентацию ЦА, второй прецизионный контур наведения, использующий дополнительную информацию оптических датчиков гида, расположенных в фокальной плоскости телескопа. В качестве исполнительных органов предлагается использовать КУДМ со сбалансированными двигателями-маховиками. Разработанные алгоритмы СУД предполагают совместную обработку информации ГИВУС, звездных датчиков и датчиков гида [3]. На рис. 1 представлена структурная схема двухконтурной СУД перспективного астрофизического КА.

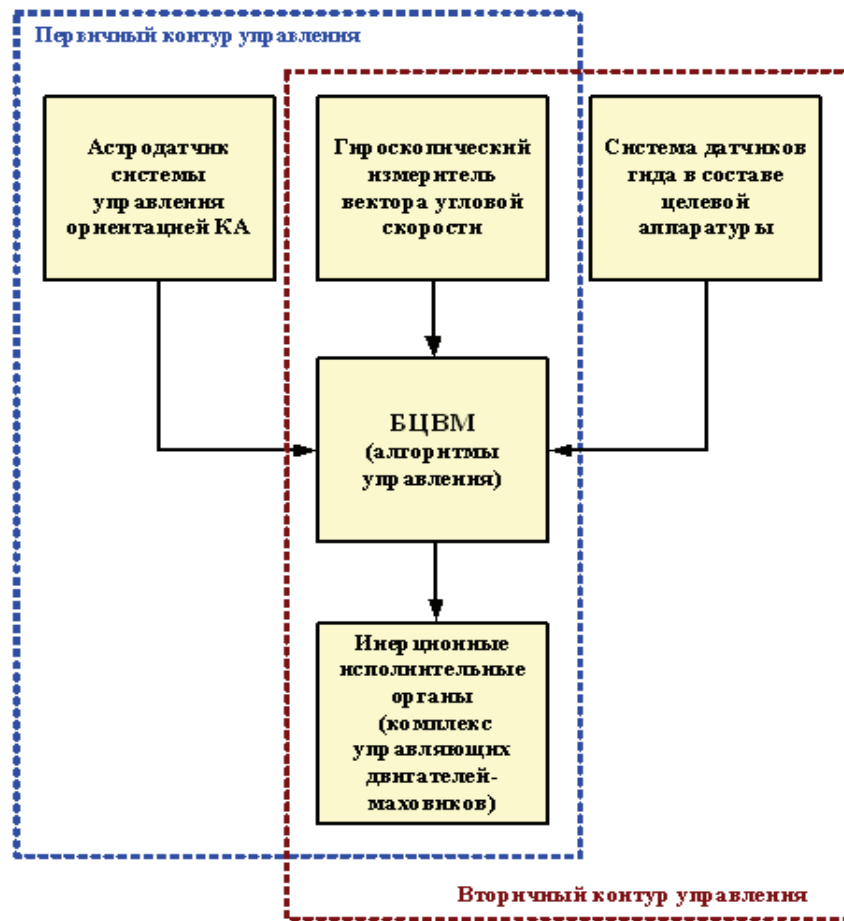


Рис. 1. Структурная схема двухконтурной СУД перспективного астрофизического КА

Особенности КА, предназначенного для проведения астрофизических наблюдений, как объекта управления

Установка на борт КА телескопа с большими линейными размерами и значительной массой приводит к существенному возрастанию моментов инерции всей конструкции КА, особенно вокруг осей, расположенных нормально по отношению к продольной оси телескопа, а также к нежесткости конструкции.

Основной особенностью аппаратов данного класса является требование прецизионной стабилизации в инерциальной системе координат в течение длительных сеансов научных наблюдений для предотвращения «смазов» изображения во время экспозиции.

Внешние возмущающие моменты, действующие на КА в течение сеансов наблюдений, можно считать практически неизменными.

Программа полета предполагает многочисленные переориентации КА, обусловленные необходимостью проведения калибровок научной аппаратуры по эталонным источникам и перенацеливаний аппаратуры на новые объекты исследований.

Кроме того, на рассматриваемый КА распространяются обычные для всех КА требования по минимизации массы и энергопотребления служебной и научной аппаратуры, повышения надежности и увеличения длительности ее функционирования.

Алгоритмы прецизионной СУД астрофизического КА

На рис. 2 приведена блок-схема системы управления движением в режиме прецизионной ориентации и стабилизации [4].

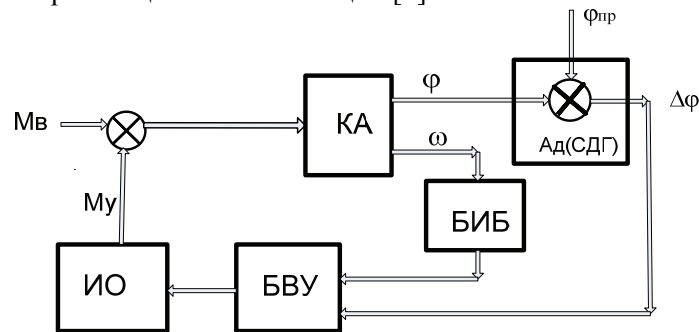


Рис. 2. Блок-схема СУД

На блок-схеме: M_v – внешний возмущающий момент; M_y – момент управления; φ , ω – углы ориентации КА и его угловая скорость; $\varphi_{пр}$ – заданное программное положение КА в инерциальном пространстве; $\Delta\varphi$ – угловое рассогласование; ИО – исполнительные органы СУД; БВУ – бортовое вычислительное устройство; БИБ – бесплатформенный инерциальный блок; Ад – звездный астродатчик и (или) система датчиков гида (СДГ) телескопа.

Введем условное разделение СУД на две подсистемы: систему ориентации и систему стабилизации.

Система ориентации (СО) выполняет следующие задачи:

- обработку информации звездных датчиков для определения углового положения КА относительно инерциального пространства;
- построение гироинерциальной системы координат по информации БИБ, в дальнейшем называемой просто системой координат БИБ;
- определение рассогласования между системой координат БИБ и заданной системой координат в инерциальном пространстве;
- приведение системы координат БИБ к заданной системе координат в инерциальном пространстве;
- определение и компенсацию систематического дрейфа БИБ.

Система стабилизации (СС) осуществляет формирование управляющих сигналов, подаваемых на ИО.

Подсистемы работают с различными временными тактами. Система ориентации работает с тактом (T_o) получения информации от астродатчиков (или от датчиков гида телескопа). Система стабилизации работает с тактом работы БВУ (τ), который совпадает с тактом получения информации БИБ и тактом выдачи управляющего сигнала на ИО.

Необходимо отметить, что T_o превышает τ на порядок.

Алгоритмы системы ориентации

Введем следующие системы координат: I – инерциальный базис; J – гироинерциальный базис, построенный путем интегрирования показаний БИБ; E – связанный с КА базис (связанная система координат КА).

Отличие базиса J от базиса I обусловлено начальными погрешностями определения ориентации и измерительными шумами БИБ, в том числе «уходами» гироскопов. Пусть Λ – кватернион перехода от базиса J к базису E , N – кватернион перехода от базиса I к базису E , а θ – вектор конечного поворота от базиса I к базису J , как показано на рис. 3.

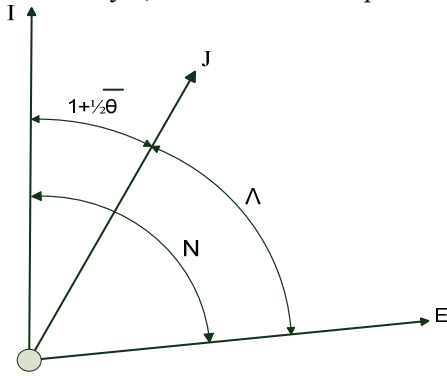


Рис. 3. Взаиморасположение базисов и связь между ними

Связь между базисами можно представить в следующем виде:

$$N = \left(1 + \frac{\bar{\theta}}{2} \right) \otimes \Lambda. \quad (1)$$

При этом движение КА (базиса E) подчиняется кинематическому уравнению в кватернионной форме:

$$\dot{N} = \frac{1}{2} N \otimes \bar{\omega}_E. \quad (2)$$

С учетом введенных обозначений работу СУД в общем виде можно представить следующим образом.

По информации БИБ БВУ вычисляет кватернион Λ , а система стабилизации создает такие управляющие воздействия ИО на КА, которые заставляют его разворачиваться нужным образом, тем самым обеспечивая уменьшение Λ .

Система ориентации по информации звездных приборов вычисляет в БВУ оценку кватерниона N , рассогласование θ между базисами I, J , систематический уход БИБ и формирует сигнал коррекции, заставляющий базис J сдвигаться к базису I и компенсирующий уход БИБ.

Для получения оценки кватерниона N используется информация звездных приборов и в прецизионном режиме информация датчиков гида телескопа.

Пусть a, b и c – единичные векторы направлений на выбранные участки звездного неба и связаны со звездными приборами или датчиками гида.

Тогда с учетом введенных обозначений можно записать:

$$\begin{aligned} (n_0 + \bar{n}) \otimes \bar{a}_E &= \bar{a}_I \otimes (n_0 + \bar{n}), \\ (n_0 + \bar{n}) \otimes \bar{b}_E &= \bar{b}_I \otimes (n_0 + \bar{n}), \\ (n_0 + \bar{n}) \otimes \bar{c}_E &= \bar{c}_I \otimes (n_0 + \bar{n}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $n_0, \bar{n}$ – скалярная и векторная части кватерниона N , а нижние индексы E и I при векторах a, b и c указывают на базис, в котором записаны их компоненты.

Введем обозначение: $\tilde{\chi} = \frac{\bar{n}}{n_0}$. Тогда методом взвешенных наименьших квадратов, из (3) можно получить

$$\tilde{\chi} = 2(\sigma_a^{-2} A E^2 + \sigma_b^{-2} B E^2 + \sigma_c^{-2} C E^2)^{-1} (\sigma_a^{-2} \bar{a}_I \times \bar{a}_E + \sigma_b^{-2} \bar{b}_I \times \bar{b}_E + \sigma_c^{-2} \bar{c}_I \times \bar{c}_E), \quad (4)$$

где $\sigma_a, \sigma_b, \sigma_c$ – погрешность измерений звездных приборов или датчиков гида

$$A E = \begin{bmatrix} 0 & -a_E^z - a_I^z & a_E^y + a_I^y \\ a_E^z + a_I^z & 0 & -a_E^x - a_I^x \\ -a_E^y - a_I^y & a_E^x + a_I^x & 0 \end{bmatrix}.$$

Аналогичный вид имеют матрицы для векторов b и c . С учетом условия нормировки $n_0^2 + \vec{n}^2 = 1$ оценка кватерниона $\hat{N}$ запишется

$$\hat{N} = \frac{1 + \vec{\chi}}{\sqrt{1 + \vec{\chi}^2}}. \quad (5)$$

По информации БИБ кватернион N может быть оценен в соответствии с формулой (1). При этом кватернион Λ определяется путем интегрирования кинематического уравнения движения КА в гироинерциальном пространстве (движение базиса E относительно базиса J), которое можно записать как

$$\begin{aligned} \dot{\Lambda} &= \frac{1}{2} \Lambda \otimes \bar{\omega}, \\ \bar{\omega} &= \bar{\omega}_E + \delta\bar{\omega} + \Delta\bar{\omega}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\bar{\omega}$ и $\bar{\omega}_E$ – векторы угловой скорости КА и базиса E ; $\delta\bar{\omega}$ – вектор «систематического ухода» БИБ относительно базиса E ; $\Delta\bar{\omega}$ – вектор случайных составляющих «ухода» БИБ, иначе говоря шум измерений.

Для определения вектора $\bar{\omega}$, вектора угловой скорости КА по показаниям БИБ воспользуемся следующими соотношениями. Пусть B_r – матрица направляющих косинусов осей чувствительности включенных головок БИБ. Тогда вектор показаний $\vec{\eta}$ включенных каналов будет: $\vec{\eta} = B_r \bar{\omega}$.

И оптимальная оценка вектора находится по формуле

$$\bar{\omega} = (B_r^T B_r)^{-1} B_r^T \vec{\eta}.$$

Если добавить к кинематическому уравнению (6) смещение вида

$$\vec{u}_J = \gamma \bar{\theta} \otimes \Lambda, \quad \gamma > 0, \quad (7)$$

то происходит приведение базиса J к базису I , так называемый случай линейной коррекции.

Кинематическое уравнение (6) с добавлением указанного смещения в этом случае будет

$$2\dot{\Lambda} = \Lambda \otimes (\bar{\omega}_E + \delta\bar{\omega} + \Delta\bar{\omega}) + \gamma \bar{\theta} \otimes \Lambda.$$

Поскольку модули векторов $\bar{\theta}, \delta\bar{\omega}, \Delta\bar{\omega}$ малы, то можно линеаризовать выражение

$$\dot{\bar{\theta}} = -\gamma \bar{\theta} - M_{EJ} \delta\bar{\omega} - M_{EJ} \Delta\bar{\omega},$$

где M_{EJ} – матрица перехода от базиса E к базису J , соответствующая кватерниону Λ .

Анализ этого уравнения позволяет сделать вывод, что при добавлении смещения указанного вида происходит асимптотическое приведение базиса J к базису I с точностью до $M_{EJ}(\delta\bar{\omega} + \Delta\bar{\omega})$.

Если для оценки рассогласования θ между базисами I и J применить дискретный фильтр Люэнберга, построенный на основе уравнения (6), то такая оценка будет содержать статическую ошибку по θ (из за наличия члена $M_{EJ} \delta\bar{\omega}$).

Поэтому предложено видоизменить такой фильтр и добавить к нему ещё оценку систематического ухода нулевого сигнала БИБ. В этом случае смещение (7) будет иметь вид

$$\bar{u}_J = (\gamma\bar{\theta} - \delta\bar{\omega}) \otimes \Lambda. \quad (8)$$

Для получения уравнения измерений представим выражение (1) в следующем виде:

$$n_0 + \bar{n} = (1 + \frac{1}{2}\bar{\theta}) \otimes (\lambda_0 + \bar{\lambda}) = \lambda_0 + \frac{1}{2}\lambda_0\bar{\theta} \times \bar{\lambda} + \bar{\lambda} - \frac{1}{2}\bar{\theta}\bar{\lambda},$$

где $n_0, \bar{n}, \lambda_0, \bar{\lambda}$ – скалярные и векторные части кватернионов N и Λ .

Из этого уравнения, используя вместо кватерниона N его оценку $\hat{N} = \hat{n}_0 + \hat{\bar{n}}$, полученную в результате обработки информации астроприборов, можно записать вектор невязок:

$$\bar{y} = \hat{\bar{n}} - \bar{\lambda} = H\bar{\theta} + \Delta\bar{\varphi}, \quad H = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \lambda_0 & \lambda_3 & -\lambda_2 \\ -\lambda_3 & \lambda_0 & -\lambda_1 \\ \lambda_2 & -\lambda_1 & \lambda_0 \end{vmatrix},$$

где $\Delta\bar{\varphi}$ – вектор шумов астроизмерительных средств.

Теперь можно записать уравнения фильтра Люэнбергера для получения оценки рассогласования θ между базисами I и J и оценки систематического ухода нулевого сигнала БИБ.

Такой модифицированный фильтр имеет вид:

- *априорная оценка*

$$\tilde{\theta}_i = -T_0 \cdot M_{EJ} \cdot \delta\bar{\omega}_{i-1};$$

$$\delta\tilde{\omega}_i = \delta\bar{\omega}_{i-1};$$

- *апостериорная оценка*

$$\theta_i = \tilde{\theta}_i + B_1(\bar{n}_i - \bar{\lambda}_i);$$

$$\delta\bar{\omega} = \delta\tilde{\omega}_i - B_2(\bar{n}_i - \bar{\lambda}_i).$$

В этих уравнениях приняты следующие обозначения:

$$B_1 = \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_1 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_1 \end{bmatrix}; \quad B_2 = \begin{bmatrix} \beta_2 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_2 \end{bmatrix},$$

где γ, β_1, β_2 – постоянные коэффициенты наблюдателя; $\delta\bar{\omega}$ – постоянная скорость ухода БИБ; $\bar{n}$ – векторная часть оценки кватерниона N положения КА в инерциальном базисе I по информации астроприборов; $\bar{\lambda}$ – векторная часть кватерниона положения КА в гироинерциальном базисе J по информации БИБ; M_{EJ} – матрица перехода от связанной системы координат КА (базиса E) к базису J ; H – матрица преобразования рассогласований между базисами I и J ; θ – вектор углов рассогласования между базисами I и J ; T_0 – такт получения информации от астродатчиков.

Для получения информации о положении КА относительно гироинерциального базиса необходимо в БВУ интегрировать уравнение (6) с введением смещения (8), в котором постоянный уход БИБ $\delta\bar{\omega}$ и $\bar{\theta}$ оценивается вышеописанным фильтром.

Алгоритмы системы стабилизации

В системе стабилизации используется закон управления следующего вида:

$$\sigma = K_{\varphi}\varphi + K_{\dot{\varphi}}\dot{\varphi} + K_M M_B,$$

где φ – угловое рассогласование между заданным направлением и стабилизируемой осью КА; $\dot{\varphi}$ – скорость изменения углового рассогласования; M_B – возмущающий момент; $K_{\varphi}, K_{\dot{\varphi}}, K_M$ – коэффициенты по углу, угловой скорости и моменту соответственно; σ – сигнал управления исполнительными органами.

Для получения оценок угловой скорости КА и возмущающего момента в системе стабилизации используется наблюдатель Люэнбергера

Обоснование точностных и динамических требований к измерительным средствам СУД и исполнительным органам перспективных астрофизических КА

Обоснование требований к исполнительным органам и измерительным средствам СУД перспективных астрофизических КА проводилось на основе критерия обеспечения максимальной точности стабилизации КА в прецизионном режиме. Методом математического моделирования были получены оценки влияния отдельные характеристики приборов СУД на точность стабилизации КА в прецизионном режиме. Был разработан программный комплекс, включающий в себя модели движения КА с упругими элементами, бесплатформенного инерциального блока, системы датчиков гида, астродатчиков и комплекса управляющих двигателей-маховиков, а также алгоритмы управления движением КА.

Оценка влияния параметров БИБ на точность стабилизации КА

Учитывались следующие параметры БИБ, влияющие на точность стабилизации:

- случайная составляющая нулевого сигнала измерительного канала гироскопа w_n ;
- шумовая составляющая измерительного канала на такте измерений;
- цена младшего разряда измерительной информации гироскопа.

Получены зависимости в виде графиков (рис. 4).

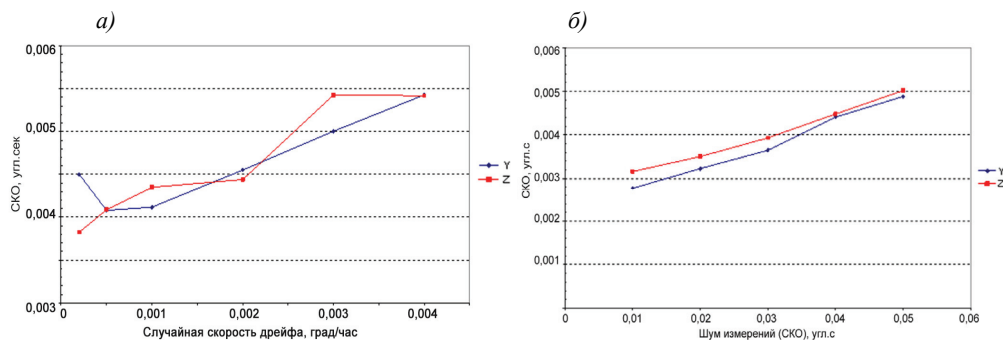


Рис. 4. Зависимость погрешности стабилизации от случайного дрейфа измерительного канала БИБ (а) и от величины шума измерений канала БИБ (б)

Как видно из этих графиков, СКО ошибок по углу в режиме стабилизации практически пропорционально значению случайной составляющей нулевого сигнала (рис. 4, а) и СКО шума измерений канала БИБ (рис. 4, б).

Точность стабилизации практически не зависит от изменения (в рассмотренном диапазоне) цены младшего разряда измерительной информации канала БИБ.

Оценка влияния параметров СДГ на точность стабилизации

Исследовано влияние следующих параметров: цены младшего разряда измерительной информации СДГ (рис. 5, а), величины шума единичного измерения (рис. 5, б) и такта получения измерительной информации (рис. 5, в).

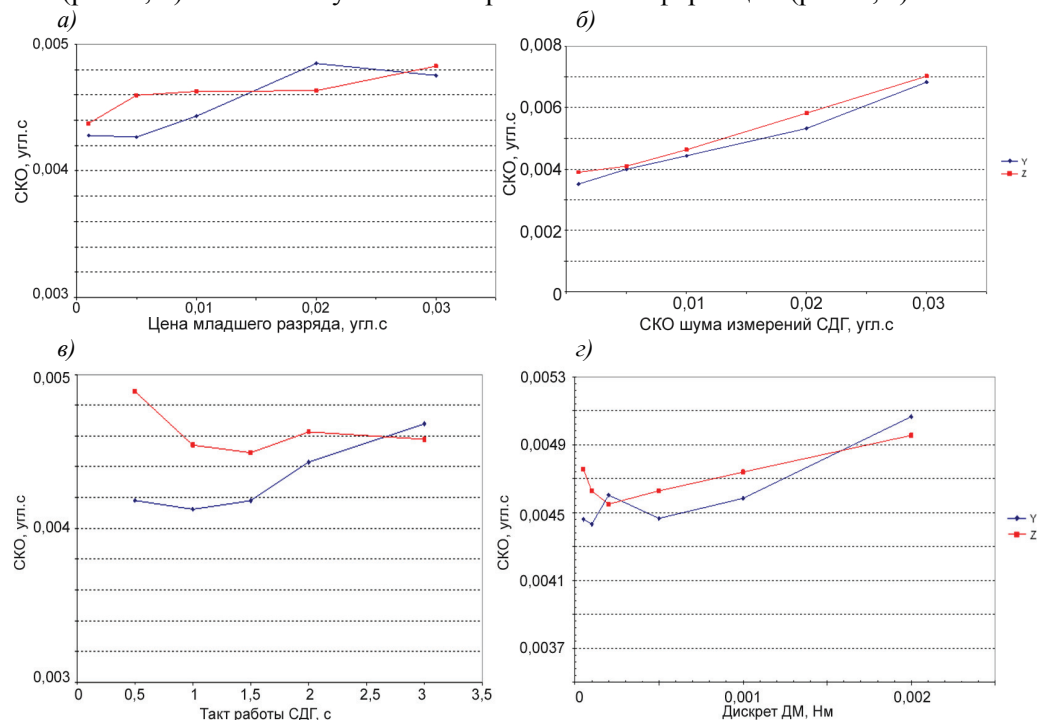


Рис. 5. Зависимость погрешности стабилизации от цены младшего разряда измерительной информации СДГ (а), от величины шума единичного измерения СДГ (б), от такта получения измерительной информации (в), от цены младшего разряда управляющего сигнала двигателя-маховика (г)

Точность стабилизации КА с уменьшением цены младшего разряда СДГ и уменьшением такта съема измерений повышается незначительно (рис. 5, а, в). Точность стабилизации КА от шума единичного измерения канала СДГ зависит существенно (рис. 5, б).

Следовательно, необходимо стремиться к уменьшению шумовой погрешности измерений СДГ и для перспективных КА эта величина должна быть не более 0.01 угл. с (1σ).

Оценка влияния параметров маховиков на точность стабилизации

На точность стабилизации КА влияет цена младшего разряда управляющего сигнала двигателя-маховика. На рис. 5, г показано изменение точности стабили-

зации КА от цены младшего разряда управляющего сигнала двигателя-маховика. Уменьшение дискрета моментной характеристики до ~ 0.0005 Нм повышает точность стабилизации КА, а дальнейшее уменьшение практически не сказывается на точности стабилизации.

Таким образом, можно сформулировать требования к характеристикам приборов астроинерциальных СУД перспективных астрофизических КА, обеспечивающих заданные точности наведения и стабилизации научной аппаратуры:

- случайная составляющая нулевого сигнала измерительного канала ГИВУС не более 0.002 град/ч,
- шумовая составляющая измерительного канала БИБ на такте измерений не более 0.04 угл. с (1σ).
- шумовая составляющая единичного измерения СДГ не более 0.01 угл. с (1σ).
- цена младшего разряда СДГ не более 0.005 угл. с.
- такт измерений СДГ не более 2 с.
- дискрет моментной характеристики двигателя-маховика 0.0005 Нм.

Разработка рекомендаций по выбору приборного состава с точки зрения минимизации энергомассовых характеристик и увеличения ресурса СУД перспективных астрофизических КА

Измерители вектора угловой скорости

На отечественных КА в настоящее время используются прецизионные бесплатформенные инерциальные блоки на основе поплавковых и электростатических гироскопов [5]. Разработанная ЦНИИ «Электроприбор» бесплатформенная инерциальная система БИС ЭГ на основе электростатических гироскопов находится в летной эксплуатации на КА «Ресурс ДК» с 2006 г. [6].

На зарубежных астрофизических КА используются волоконно-оптические и твердотельные волновые гироскопы [6]. При этом предпочтение отдается приборам на твердотельных волновых гироскопах (ТВГ).

Зарубежные приборы на ТВГ обладают исключительно высокими и стабильными точностными характеристиками, повышенной радиационной стойкостью, малыми размерами, низким уровнем шума, что делает их предпочтительным для применения в СУД астрофизических КА. Наибольших успехов в разработке приборов на ТВГ добилась фирма Northrop Grumman (США). К настоящему времени система Scalable SIRU (Northrop Grumman) безотказно работала в космосе на 125 КА 25 млн. ч [7].

В России ТВГ выпускает ОАО Раменское приборостроительное конструкторское бюро и ЗАО «Медикон» (г. Миасс). ЗАО «Медикон» создал макет прибора космического применения, который обладает малыми габаритами, высокой точностью и радиационной стойкостью [8, 9].

Астродатчики

В настоящее время в России выпускается и разрабатывается целый ряд звездных датчиков, которые могут быть использованы в составе СУД астрофизических КА для предварительного наведения телескопов на объекты исследований. Основными разработчиками звездных датчиков являются НПП «Геофизика-Космос», ИКИ РАН, ФГУП МОКБ «Марс» [10–12].

Основные требования к перспективным астродатчикам:

- минимизация массы и энергопотребления датчиков;
- увеличение частоты съема измерительной информации с прибора (не менее 10 Гц) и допустимой угловой скорости вращения КА (до 10-20 град/с);
- увеличение стойкости к воздействию радиации;
- обеспечение ресурса работы приборов до 15 лет;
- повышение точности измерения приборов до 0.1–1 угл. с.

На зарубежных КА для астрофизических исследований в качестве астродатчиков рассматриваются датчики с использованием КМОП-матриц с технологией Active Pixel Sensors (APS), более радиационно-стойкие, чем приборы на ПЗС-матрицах.

Бортовой вычислительный комплекс (БВК)

В состав БВК входит бортовая вычислительная машина (БЦВМ), интерфейсные шины, устройства обмена – адаптеры связи с бортовыми системами и устройствами, программное обеспечение.

Основные требования к БЦВМ перспективных астрофизических КА:

- производительность не менее 100 млн. оп/с (на максимальной тактовой частоте 100 МГц);
- ОЗУ объемом не менее 2 Мбайт, защищенное модифицированным кодом Хэмминга;
- внешняя энергонезависимая память не менее 8 Мбайт, защищенная модифицированным кодом Хэмминга;
- ориентировочная радиационная стойкость: интегральная доза не менее 100 Крад; устойчивость к одиночным сбоям (SEU) при потоках тяжелых ионов не менее 60 МэВ·см²/мг;
- масса одного канала не более 1 кг;
- энергопотребление одного канала не более 4 Вт.

В табл. 1 приведены параметры современных отечественных БЦВМ, имеющих летную квалификацию [11–14].

Т а б л и ц а 1

Параметр/модель	БВК	ЦВМ 22	ВМ	ЦВМ 40
Разработчик	НТЦ «Модуль»	НТЦ «Техком»	ОАО «Субмикрон»	ФГУП «НИИ Аргон»
Объект	Луч-5А, 5Б и др.	Глонасс-К №11 Фобос-Грунт	МКА-ФКИ, Резонанс	ДЗЗ Египет
Проект	2010	2009	2010	2010-2011
САС	15	5	5	15
Процессор	R4000	1890ВМ1Т	1В578	1890ВМ2Т
Частота, МГц	96	80	24	84
Масса, кг	3,5 (1+1)	4 (1+1)	4 (1+1)	2,2 (1+1)
Потребление, Вт	20	25	20	15,5
ОЗУ, Мб	8	2	2	8
ППЗУ, Мб	8	2	2	8
Конфигурация	1+1	1+1 1+1+1+1	1+1	1+1

Недостатками БЦВМ являются низкие радиационная стойкость и сбоеустойчивость при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ).

В настоящее время на отечественных предприятиях НИИСИ РАН, ФГУП «НИИЭТ», ГУП НПЦ «Элвис» создается элементная база для радиационно стойких и сбоеустойчивых БЦВМ космического применения.

Заключение

На основе проведенных исследований сформулированы основные требования к структуре, приборному составу и алгоритмам астроинерциальных систем управления движением астрофизических КА.

Анализ отечественного космического приборостроения показывает, что разрабатываемые звездные датчики, инерциальные блоки и бортовые вычислительные системы позволяют создавать СУД для перспективных астрофизических КА.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Беляев Б.Б.** Система ориентации и стабилизации перспективных астрофизических космических аппаратов / Б.Б. Беляев [и др.] / Тез. докл. науч.-технич. конф. «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами». – М.: МОКБ «Марс», октябрь 2010 г.
2. **Е.И. Сомов.** Оффсетное гидирование и нониусная стабилизация изображения большого космического астрономического телескопа // XX Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам.- СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор». -2013.- С. 221-229.
3. **Зборошенко В.Н.** Астроинерциальные системы ориентации и стабилизации КА / В.Н. Зборошенко [и др.] // Тезисы докл. 2-й Всерос. научно-технич. конф. «Состояние и перспективы развития». – М.: МОКБ «Марс», 24-26 октября 2012.
4. **Беляев Б.Б.** Способ прецизионного наведения космического ультрафиолетового телескопа / Б.Б. Беляев, П.А. Тарасенко, Н.В. Тарасенко // Измерительная техника.- 2012. - № 1.
5. http://www.tsenki.com/production_technologies/hirosopic
6. **Ландау Б.Е.** Основные результаты разработки и испытаний системы определения ориентации на электростатических гироскопах для низкоорбитальных космических аппаратов / Б.Е. Ландау [и др.]. // Гироскопия и навигация.-2007. №2(57).- С. 3-12.
7. **David M. Rozelle.** The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets». Northrop Grumman Co, Navigation Systems Division. White paper.
8. <http://www.rpkb.ru>
9. <http://www.medicon-miass.ru>
10. **Дятлов С.А.** Обзор звездных датчиков ориентации КА / С.А. Дятлов, Р.Б. Бессонов // Сб. трудов Всерос. науч.-технич. конф. «Современные проблемы определения ориентации и навигации КА».- ИКИ РАН. 2008.
11. <http://www.субмикрон.рф>
12. <http://www.argon.ru>
13. <http://www.techcom.aero>
14. <http://www.module.ru>
15. **Осипенко П.Н.** Микропроцессоры и контроллеры НИИСИ РАН для аэрокосмического применения // Сб. докл. конф. «Разработка отказоустойчивых микропроцессорных систем управления». – М., 2012.

Abstract. The requirements applied to a stellar-inertial motion control systems (MCS) of the perspective astrophysical space vehicles (SVs) are considered. Features of SV, intended for the astrophysical observations carrying out, as control object are determined. The chosen two-loop structure scheme of the precision MCS is presented.

One of the possible variants of precision MCS algorithms for the astrophysical SVs is resulted. The requirements applied to the accuracy and dynamic characteristics of MCS measurement instrumentation and executive units are determined by mathematical simulation approach.

The analysis of a state-of-the-art instrumentation which is included in the scientific SVs stellar-inertial complexes is carried out.

Recommendations are developed for the choice of instrumentation structure from the point of view of the mass and power consumption characteristics minimization and the astrophysical SVs MCS working life increasing.

Key words: astrophysical spacecraft, precision motion control system, astro-inertial system