Вопросы применения микромеханических гироскопов для космических проектов

Г.А. Аванесов, Р.В. Бессонов, С.А. Дятлов, А.Н. Куркина, В.В. Сазонов

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия E-mail: kurkinaan@mail.ru

В статье изложены основные принципы совместной обработки данных измерений с различных источников информации об угловом движении космического аппарата: двух звездных датчиков и трех одноосных датчиков угловой скорости. Подробно рассмотрены алгоритмы, позволяющие вычислять параметры ориентации и угловой скорости на момент передачи данных бортовой вычислительной машине.

Ключевые слова: датчики угловой скорости, звездные датчики, определение параметров ориентации, фильтрация измерений, калибровка параметров.

Введение

Совместное использование информации с оптических звездных датчиков (ЗД) и гироскопов характерно для многих космических аппаратов (КА), что обусловлено особенностями датчиков обоих типов. Звездный датчик способен определять параметры ориентации с высокой точностью, но при благоприятных условиях освещенности и в ограниченном диапазоне угловых скоростей. Гироскопические устройства функционируют в широком диапазоне угловых скоростей независимо от внешних оптических условий, но при отсутствии уточнения их параметров по измерениям сторонних приборов точность измерений снижается.

Целью данной работы является разработка алгоритмов совестной обработки данных измерений с обоих источников информации, удовлетворяющих следующим требованиям:

- частота формирования параметров ориентации и угловой скорости 10 Гц;
- отсутствие запаздывания измерений (вычисление параметров на момент их передачи бортовой вычислительной машине (БВМ));
- отсутствие систематических уходов.

В качестве источников информации рассматриваются микромеханические датчики угловой скорости (ДУС) SiRRS01 и звездные координаторы серии БОКЗ-МФ. Точность определения угловой скорости датчиков SiRRS01 составляет 14...16 угл. с/с в полосе пропускания 1 Гц. Погрешность определения параметров ориентации по измерениям звездного датчика составляет 2 угл. с по осям *ОХ* и *ОУ* и 20 угл. с по оси *ОZ* приборной системы координат (ПСК) при малых угловых скоростях. С увеличением угловой скорости точность измерений звездного координатора снижается.

Предлагаемая схема обработки измерений и вычисления параметров ориентации и угловой скорости на основании данных со звездных координаторов и ДУС представлена на *рис. 1*.



Рис. 1. Схема обработки данных измерений с двух звездных датчиков и датчиков угловой скорости

Измерение параметров ориентации осуществляется посредством двух звездных датчиков с частотой 1 Гц. При этом информация об ориентации поступает с запаздыванием на один такт опроса. Обработка данных измерений с двух звездных датчиков, установленных на борту КА, позволяет повысить точность вычисления параметров ориентации по оси *OZ*, и при определенном взаимном расположении приборов рассчитать равноточную трехосную ориентацию.

Сигнал с датчиков угловой скорости регистрируется с частотой 700 Гц. После предварительной фильтрации данных измерений осуществляется калибровка параметров ДУС по результатам измерений звездных координаторов. Анализ информации с обоих типов датчиков (совместная фильтрация данных измерений) позволяет вычислять параметры ориентации и угловую скорость с частотой 10 Гц с привязкой по времени к моменту выдачи данных измерений в БВМ.

Определение равноточной ориентации

Информация об ориентации поступает с двух 3Д, взаимное угловое расположение которых определяется кватернионом А. Взаимное угловое расположение 3Д определяют на Земле после установки приборов на борту КА, однако с течением времени оно может

изменяться (например, под влиянием температурных и механических воздействий). Поэтому первым шагом для уточнения параметров ориентации является определение кватерниона взаимной ориентации приборов по ряду предшествующих измерений.

Пусть в наличии имеются N одномоментных измерений с каждого из двух ЗД $(Q_k^{(1)}, Q_k^{(2)}, k=1..N)$. Тогда уточненное значение кватерниона взаимной ориентации будем искать в виде

$$\Lambda = \frac{1}{N} \sum_{k} \widetilde{\Lambda}_{k},$$

где $\widetilde{\Lambda}_k = \left(Q_k^{(2)}\right)^{-1} \cdot Q_k^{(1)}.$

После того как определен кватернион взаимной ориентации, уточняются параметры ориентации.

Уточненные показания будем искать в виде

$$\hat{Q}_k^{(i)} = Q_k^{(i)} \cdot F(\boldsymbol{\xi}^{(i)}).$$

С учетом соотношения

$$\hat{Q}_k^{(2)} \cdot \Lambda = \hat{Q}_k^{(1)} \tag{1}$$

можно показать, что векторы ошибки измерений двух звездных датчиков ($\xi^{(1)}, \xi^{(2)}$) связаны между собой следующим образом:

$$\xi^{(2)} = B\xi^{(1)} + \alpha \ . \tag{2}$$

Здесь матрица В задана кватернионом Λ , а вектор α определен соотношением

$$\left(Q_k^{(2)}\right)^{-1} \cdot Q_k^{(1)} \cdot \Lambda^{-1} = F(\alpha).$$

Значения $\xi^{(1)}, \xi^{(2)}$ будем искать из условия минимума квадратичной формы в соответствии с методом наименьших квадратов (МНК):

$$(\xi^{(1)})^T [K^{(1)}]^{-1} \xi^{(1)} + (\xi^{(2)})^T [K^{(2)}]^{-1} \xi^{(2)} \to \min,$$

где *К*⁽¹⁾, *К*⁽²⁾ – ковариационные матрицы ошибок измерений по соответствующим осям ПСК

$$K^{(1)} = K^{(2)} = \begin{bmatrix} \eta_x & 0 & 0 \\ 0 & \eta_y & 0 \\ 0 & 0 & \eta_z \end{bmatrix}.$$

Во избежание влияния ошибки определения азимута на остальные углы ориентации веса измерений должны удовлетворять условию $\eta_z << \eta_x, \eta_y$.

С учетом соотношения (2) получим:

$$(\xi^{(1)})^T [K^{(1)}]^{-1} \xi^{(1)} + (B\xi^{(1)} + \alpha)^T [K^{(2)}]^{-1} (B\xi^{(1)} + \alpha) \to \min,$$

откуда

$$\xi^{(1)} = \left(\left[K^{(1)} \right]^{-1} + B^T \left[K^{(2)} \right]^{-1} B \right)^{-1} B^T \left[K^{(2)} \right]^{-1} \alpha$$

После нахождения $\xi^{(1)}$ вычисляется исправленное значение кватерниона ориентации $\hat{Q}_{1}^{(i)} = Q_{1}^{(i)} \cdot F(\xi^{(i)})$. Значение кватерниона $Q_{k}^{(2)}$ может быть вычислено с применением выражения (1). Однако для дальнейших расчетов достаточно определить параметры ориентации относительно приборной системы координат одного ЗД.

Для отработки алгоритма были сгенерированы измерения приборов при помощи компьютерного моделирования. Поскольку точность вычисления угла прямого восхождения обратно пропорциональна косинусу угла склонения, при моделировании задавалось движение приборов в плоскости экваториальной орбиты (*puc. 2*). При этом оптические оси приборов образуют угол γ в плоскости орбиты. Таким образом, угол склонения обоих приборов всегда равен нулю.



Рис. 2. Моделирование вращения двух ЗД в инерциальном пространстве



Рис. 3. Зависимость точности определения параметров ориентации от взаимного расположения приборов

Погрешность измерения параметров ориентации задавалась в соответствии с реальными точностными характеристиками приборов (2 угл. с по осям *OX* и *OY*, 20 угл. с – по оси *OZ*). Были выбраны веса измерений 1:1:0,01 по осям *OX*, *OY* и *OZ*, соответственно.

На *рис. 3* приведены зависимости погрешности определения углов ориентации от величины угла между оптическими осями приборов после уточнения параметров ориентации.

Как видно на *рис.* 4, точность углов прямого восхождения и склонения практически не зависит от величины угла γ и составляет 1,5...2 угл. с. Точность определения азимута тем выше, чем ближе величина угла γ к 90°. При $\gamma = 90°$ погрешность определения всех углов составляет ≈ 2 угл.с, т.е. при таком взаимном расположении приборов возможно вычисление равноточной трехосной ориентации.

Вычисление угловой скорости по измерениям ДУС

В общем виде математическая модель одноосного датчика угловой скорости может быть представлена в следующем виде:

$$U = k \cdot \omega + b , \qquad (3)$$

где *U* – сигнал с датчика угловой скорости; *k* – масштабный коэффициент; *b* – смещение нуля; *ω* – проекция угловой скорости на чувствительную ось датчика.

Таким образом, сигнал с датчика пропорционален проекции скорости на его чувствительную ось и имеет некоторое смещение нуля (сигнал при нулевой угловой скорости).

Выражение для вычисления угловой скорости по измерениям ДУС нетрудно получить из соотношения (3):

$$\omega = \frac{U - b}{k}$$

Для вычисления проекций угловой скорости на оси ПСК (здесь и далее в качестве ПСК будем подразумевать систему координат, жестко связанную с приборными осями первого звездного датчика) используются измерения трех одноосных датчиков угловой скорости, расположенных взаимно ортогонально:

$$\omega_j = \sum m_{ij} \omega_i; i = 1, 2, 3; j = x, y, z$$

где ω_j – проекция угловой скорости на *j*-ю ось ПСК; ω_i – проекция угловой скорости на чувствительную ось *i*-го ДУС; m_{ii} – проекция чувствительной оси *i*-го ДУС на *j*-ю ось ПСК.

В связи с тем, что исходные измерения датчиков являются сильно зашумленными, для уменьшения погрешности определения угловой скорости применяются различные виды фильтрации. Ниже рассмотрена фильтрация на основе усреднения измерений, метода наименьших квадратов и скользящего среднего.

При постоянной угловой скорости, чем больше время усреднения измерений, тем выше точность ее определения (*табл. 1*). Однако при возникновении ускорения ошибка будет увеличиваться, что связано с отставанием сигнала после усреднения измерений. На *рис. 4* приведен пример фильтрации на основе усреднения измерений на временных интервалах по 500 мс.



Рис. 4. Фильтрация на основе усреднения измерений ДУС при возникновении ускорения

Для устранения ошибки, обусловленной ускорением, можно использовать фильтрацию по методу наименьших квадратов (МНК): сначала на некотором временном интервале аппроксимируют набор измерений, а затем определяют сглаженное значение угловой скорости на крайний момент времени рассматриваемого интервала. В этом случае удается избежать систематической ошибки при возникновении ускорения. На *рис. 5* приведен пример фильтрации угловой скорости по МНК при аппроксимации измерений полиномом первого порядка на отрезках времени по 500 мс.

Однако при отсутствии ускорения погрешность определения угловой скорости после фильтрации по МНК больше, чем при усреднении измерений на том же временном интервале (*табл. 1*).

При использовании фильтрации в два этапа (предварительная фильтрация на основе скользящего среднего, затем – по методу наименьших квадратов) погрешность определения угловой скорости больше, чем при усреднении, но меньше, чем при использовании МНК (*табл. 1*). Во избежание отставания сигнала в процессе предварительной фильтрации привязка по времени осуществляется на середину интервала окна скользящего среднего, что впоследствии учитывается при фильтрации по МНК.



Рис. 5. Фильтрация измерений по методу наименьших квадратов

| Время усреднения, мс | СКО угловой скорости при отсутствии ускорения, угл.с/с | | |
|-------------------------|--|-------------------------------|--|
| | усреднение | линейная фильтрация по МНК | фильтрация по методу скользящего среднего (100 мс) и МНК |
| 50 | 130,72 | 370,76 | 128,17 |
| 100 | 70,66 | 197,26 | 77,67 |
| 200 | 39,29 | 107,92 | 55,70 |
| 300 | 28,57 | 78,24 | 38,50 |
| 400 | 22,6 | 60,1 | 30,72 |
| 500 | 18,5 | 49,26 | 25,46 |
| 750 | 14,16 | 36,05 | 21,80 |
| 1000 | 11,61 | 28,62 | 18,15 |
| 2000 | 7,74 | 16,99 | 12,52 |
| 3000 | 6,72 | 12,55 | 10,18 |

Таблица 1. Точность определения угловой скорости при различных методах фильтрации (при постоянной угловой скорости)

После анализа рассмотренных выше типов фильтрации предлагается при постоянной угловой скорости использовать фильтрацию на основе усреднения (так как при отсутствии ускорения этот метод дает более высокую точность), а при возникновении ускорения –

фильтрацию по методу наименьших квадратов с предварительной фильтрацией по методу скользящего среднего (вследствие отсутствия систематической ошибки при ускорении).

При таком подходе на каждом такте опроса необходимо оценивать, отлично значение ускорения от нуля или нет. Для этого предлагается сравнивать среднее значение угловой скорости ($\omega_{cp} = f(T_{\phi})$) при времени усреднения T_{ϕ} и значение, полученное по методу наименьших квадратов ($\omega_{MHK} = f(T_{\phi})$), при фильтрации на этом же временном интервале.

Если $|\omega_{\text{мнк}}(T_{\phi}) - \omega_{\text{ср}}(T_{\phi})| > \Delta$, значит, угловую скорость нельзя считать постоянной и следует использовать аппроксимацию по МНК, в противном случае с точностью Δ угловая скорость будет постоянной, и в качестве выходной информации следует использовать среднюю угловую скорость при времени усреднения T_{ϕ} . При этом пороговое значение может быть выбрано как ($\Delta = 3 \cdot \sigma(\omega_{\text{мнк}}(T_{\phi})$).

Калибровка параметров датчиков угловой скорости

При определении угловой скорости по измерениям ДУС должны быть известны следующие величины: сигнал с датчика, масштабный коэффициент и смещение нуля (выражение (3)). Значения масштабного коэффициента и смещения нуля датчиков определяются в процессе наземных испытаний. Однако с течением времени значения этих параметров могут изменяться как под воздействием внешних факторов, так и случайным образом. Для учета дрейфа этих параметров их уточняют по измерениям звездного датчика.

Основной вклад в ошибку определения угловой скорости вносит дрейф смещения нуля, который проявляется на временных интервалах более нескольких десятков секунд. Поэтому уточнять этот параметр следует на небольших временных интервалах. Дрейф масштабного коэффициента в большей степени обусловлен накоплением дозы ионизирующего излучения, скорость его изменения значительно меньше. Масштабный коэффициент целесообразно калибровать при различных угловых скоростях, анализируя длительные ряды данных, содержащие участки переориентаций.

Предлагается калибровать смещения нуля и масштабные коэффициенты на разных отрезках времени в зависимости от динамических условий вращения: при постоянной скорости вращения (до 5...10 угл. мин/с) – смещение нуля, а при переменной – масштабный коэффициент. Смещение нуля уточняют только при малых угловых скоростях, так как влияние ошибки определения масштабного коэффициента при этом минимально.

Смещение нуля и масштабный коэффициент определяются из соотношения (3) для каждого датчика по известному сигналу с соответствующего датчика, проекции угловой скорости на чувствительную ось датчика (определяется на основе данных измерений ЗД и направлению чувствительной оси ДУС). При калибровке смещения нуля используется ранее уточненное значение масштабного коэффициента и наоборот.

Для снижения погрешности определения смещения нуля (масштабного коэффициента) в качестве его оценки используется среднее значение, вычисленное по нескольким десяткам мгновенных оценок этого параметра по методу скользящего среднего. Для отработки алгоритма калибровки параметров использовались данные, полученные при помощи компьютерного моделирования. Задавалась траектория вращения, состоящая из двух участков:

- участок вращения с постоянной угловой скоростью;
- участок равноускоренного вращения.

При моделировании учитывались реальные точностные характеристики датчиков. В качестве шумовой составляющей датчиков угловой скорости использовались данные реальных измерений, полученные при опросе с частотой 300 Гц при нулевой угловой скорости. Шум звездного датчика моделировался с помощью генератора случайных чисел с учетом зависимости его величины от абсолютного значения угловой скорости.

При постоянной угловой скорости осуществлялась калибровка смещения нуля по измерениям ЗД, при равноускоренном движении – масштабного коэффициента. При этом погрешность определения смещения нуля при усреднении двадцати мгновенных оценок составила не более 1 угл. с/с.

В *табл. 2* приведена зависимость погрешности определения масштабного коэффициента от диапазона изменения угловой скорости, в котором осуществлялась калибровка масштабного коэффициента.

| Диапазон изменения угловой скорости, град/с | Погрешность определения масштабного коэффициента, % |
|--|--|
| 01 | 0,58 |
| 02 | 0,30 |
| 04 | 0,18 |

Таблица 2. Погрешность определения масштабного коэффициента в различных диапазонах угловой скорости

Таким образом, несмотря на то что погрешность звездного датчика увеличивается с ростом угловой скорости, точность определения масштабного коэффициента тем выше, чем больше диапазон изменения угловой скорости.

Совместная фильтрация данных измерений

По результатам работы модуля совместной фильтрации данных измерений должны быть сформированы параметры ориентации и угловой скорости на момент выдачи измерений.

Когда на борту КА используются высокоточные гироскопы, задача определения ориентации на текущий момент времени решается следующим образом. В требуемые моменты времени вычисляются параметры ориентации путем интегрирования измеренной гироскопами угловой скорости. У высокоточных гироскопов уходы за несколько секунд пренебрежимо малы – их точность заведомо выше, чем у ЗД.

При решении этой же задачи с использованием микромеханических датчиков угловой скорости точность определения ориентации с более высокой частотой будет определяться

точностью используемых ДУС – в несколько раз хуже точности ЗД. Во избежание потери точности целесообразно, по возможности, использовать сглаживание измерений ЗД и прогноз параметров ориентации на момент выдачи измерений.

Пусть имеется набор измерений (t_k, q_k), k = n, n-1.., n-N на сравнительно коротком отрезке времени (не более нескольких десятков секунд). При этом на данном отрезке времени может быть выполнено сглаживание измерений полиномом не выше второй степени и прогнозирование ориентации на заданный момент времени.

Для удобства сглаживания измерений центрируем измерения относительно среднего значения на рассматриваемом отрезке времени:

$$s_k = q_c^{-1} \cdot q_k,$$

где $q_c = \frac{Q}{\|Q\|}, Q = \sum_{k=n-N}^{n-1} q_k$.

Далее переведем кватернионы s_k в углы ориентации $\alpha_k = (\alpha_{xk}, \alpha_{yk}, \alpha_{zk})^T$.

$$\alpha_{xk} = \delta_k \cdot \frac{s_{1k}}{\sin\left(\frac{\delta_k}{2}\right)}; \ \alpha_{yk} = \delta_k \cdot \frac{s_{2k}}{\sin\left(\frac{\delta_k}{2}\right)}; \ \alpha_{zk} = \delta_k \cdot \frac{s_{3k}}{\sin\left(\frac{\delta_k}{2}\right)}; \ \delta_k = 2 \cdot \arccos\left(s_{0k}\right).$$

Сглаживание измерений будем производить для каждого угла ориентации полиномом первого или второго порядка исходя из условия минимизации суммы квадратов отклонений (метод наименьших квадратов):

$$\sum_{k=n-N}^{n-1} [\alpha_{ik} - \alpha_i(t_k)]^2 \to \min, \ i = x, y, z.$$

При получении следующего измерения (t_n, q_n) определяется значение s_n и сравнивается со значением полинома, рассчитанного на момент времени t_n :

$$\left|\alpha_{in} - \alpha_{i}(t_{j})\right| < \zeta_{i}, \ i = x, y, z .$$

$$\tag{4}$$

Если неравенство выполняется, значит характер движения не изменился и в дальнейшем можно использовать сглаженное значение кватерниона ориентации $q(t_n)$:

$$q_0(t_n) = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right); \quad q_i(t_n) = \alpha_i \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right); \quad \alpha = \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2}; \quad i = x, y, z.$$
(5)

Длина фильтра (*M*) при этом увеличивается на единицу. Достигнув максимального значения M_{max} , длина фильтра далее не увеличивается.

Так как данные от ЗД поступают с запаздыванием на один такт, то для прогнозирования параметров ориентации на момент получения данных измерений вычисляется значение $q(t_{n+1})$ аналогично выражению (5).

При изменении характера движения на отрезке времени $[t_n, t_{n+1}]$ прогноз будет заведомо ошибочным. Поэтому прогнозное значение сравнивается с параметрами ориентации, вычисленными на основе измерений датчиков угловой скорости. Данные от ДУС поступают без запаздывания, что позволяет своевременно выявить момент изменения движения.

Для вычисления параметров ориентации с частотой 10 Гц без запаздывания прогнозирование параметров ориентации выполняется на требуемый момент времени $t_j(t_{n+1} < t_j < t_{n+2})$. Измерения угловой скорости также обновляются с частотой 10 Гц, что позволяет рассчитать кватернион ориентации по измерениям ДУС \tilde{q}_j на момент времени t_j , перейти к углам ориентации ($\tilde{\alpha}_{ij}$) и сравнить их со значениями $\alpha_i(t_j)$ на тот же момент времени:

$$\left|\widetilde{\alpha}_{ij} - \alpha_i(t_j)\right| < \zeta, \ i = x, y, z.$$
(6)

При одновременном выполнении неравенств (4) и (6) прогноз можно считать достоверным с точностью $\max(\xi_i, \zeta)$, i = x, y, z. В противном случае в качестве параметров ориентации будут использоваться значения, вычисленные по показаниям ДУС путем интегрирования угловой скорости от момента времени t_n . Длина фильтра сократится до минимального значения M_{0} .

Таким образом, если отклонение прогнозного значения от сглаживающего полинома и измерений ДУС лежит в допустимых пределах, то используется прогнозное значение, в противном случае – параметры ориентации, рассчитанные по показаниям ДУС.

Алгоритм совместной фильтрации был отработан на модели. Для этого были сгенерированы измерения звездного датчика и датчиков угловой скорости при задании вращения по произвольной орбите. Шумовые составляющие измерений приборов генерировались так же, как и при отработке алгоритма калибровки параметров ДУС.

Поскольку исходные параметры ориентации вычислены с равной точностью, то пороговые значения измерений БОКЗ по трем осям одинаковы: $\xi_i = 6$ угл. с (i = x, y, z), пороговое значение измерений ДУС составляет $\xi = 76$ угл. с. Минимальная длина фильтра, когда возможен прогноз, составляет 4 измерения, максимальная – 20 измерений.

Результатом работы алгоритма являются параметры ориентации, вычисленные на момент их выдачи в БВМ с частотой 10 Гц. Иллюстрация модельного движения и результаты работы алгоритма приведены на *рис.* 6–8.



Рис. 6. Модель изменения угловой скорости в режиме переориентации



Рис. 7. Изменение длины фильтра М



Рис. 8. Ошибка определения параметров ориентации

При получении данных первого измерения ЗД (с запаздыванием на 1 с) расчет параметров ориентации осуществляется на основе показаний ДУС путем интегрирования угловой скорости с момента привязки последних параметров ориентации. При увеличении длины фильтра до $M_0 = 4$ параметры ориентации вычисляются на текущий момент времени на основе прогноза по измерениям ЗД. При возникновении ускорения ошибка прогноза нарастает, и при превышении порогового значения длина фильтра уменьшается до минимального значения (не выполняется условие (6)), дальнейший расчет ориентации снова осуществляется на основе интегрирования измерений ДУС. После окончания переориентации длина фильтра постепенно увеличивается, используются прогнозные значения параметров ориентации.

Заключение

При помощи компьютерного моделирования были получены характерные вращения в режиме орбитального полета и при переориентации космического аппарата. Данные измерений звездных координаторов и датчиков угловой скорости, полученные по результатам натурных и стендовых испытаний, позволили использовать при моделировании реальные погрешности измерений приборов.

Предложенные алгоритмы обработки данных со звездных датчиков и ДУС позволяют определять параметры углового вращения КА с высокой точностью. При этом привязка информации осуществляется на момент передачи данных БВМ, а частота передачи соответствует частоте работы системы управления движением КА.

При отработке алгоритмов на модели были получены следующие результаты:

- при фильтрации измерений ДУС на интервале 1 с точность определения угловой скорости на момент выдачи информации БВМ составляет 12 угл. с/с в режиме орбитальной ориентации и 18 угл. с/с в режиме переориентации (при наличии измерений звездных координаторов);
- при фильтрации параметров ориентации по измерениям звездных датчиков и ДУС точность определения параметров ориентации составляет до 2 угл. с в режиме орбитального полета и 20 угл. с в режиме переориентации.

Joint data processing algorithms from star trackers and microelectromechanical angular velocity sensors

G.A. Avanesov, R.V. Bessonov, S.A. Dyatlov, A.N. Kurkina, V.V. Sazonov

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia E-mail: kurkinaan@mail.ru

The basic principles of joint processing of data on SC angular motion obtained from various information sources (two star trackers and three single-axis angular velocity sensors) are presented. Algorithms for determining orientation and angular velocity parameters at the moment of data transmission to on-board computer are discussed in detail.

Keywords: angular velocity sensor, star tracker, orientation parameters determination, data filtering, parameters calibration.