

УДК 628.78

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ НИЗКОВЫСОТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ОДНОМОМЕНТНЫХ РАЗНОТИПНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2012 М. Е. Григорьева, А. В. Крамлих

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассматриваются вопросы построения адаптивного алгоритма определения ориентации низковысотных космических аппаратов на основе обработки одномоментных разнотипных измерений (радионавигационных, магнитометрических). В основу адаптивного алгоритма положены слабосвязанная и сильносвязанная схемы комплексирования магнитометрической и радионавигационной информации; алгоритм определения ориентации, основанный на анализе пространственного положения навигационных спутников ГЛОНАСС/GPS.

Низковысотный космический аппарат, ориентация, комплексирование, магнитометрические измерения, радионавигационные измерения, ГЛОНАСС, GPS, адаптивный алгоритм.

Среди космических аппаратов (КА), функционирующих в настоящее время, большинство являются низковысотными (высота полёта менее 1000 км). Это обусловлено широкой областью их использования – научные, технологические и образовательные КА.

Для контроля и управления полётом и экспериментами, проводимыми на борту низковысотных КА в режиме времени, близком к реальному, возникает необходимость в создании системы контроля движения, позволяющей оперативно и автономно решать задачи навигации и определения ориентации. Так, например, информация о векторе состоянии КА, на борту которого проводятся научные и технологические эксперименты, необходима для правильной интерпретации их результатов. При этом, требования к точности знания некоторых элементов вектора состояния КА (например, ориентации) могут быть невысокими (погрешности порядка 5°).

Использование навигационных приёмников (НП), работающих по спутниковым радионавигационным системам (СРНС) ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США) позволяет решать задачу навигации (определение параметров движения центра масс) автономно и с высокой сте-

пенью точности [1,2]. Поэтому НП является в настоящее время обязательным элементом системы контроля движения.

НП используют два типа измерений: фазовые и кодовые. НП, использующие фазовые измерения, могут быть применены и для определения ориентации КА на основании принципов интерферометрии [3].

Алгоритмы определения ориентации, основанные на принципах интерферометрии, имеют как достоинства – высокая точность решения задачи ориентации, так и недостатки – высокая стоимость, необходимость разрешения фазовой неоднозначности, конструктивная сложность реализации на КА (большая антенная база), поскольку точность определения ориентации при фазовых измерениях в значительной мере зависит от размеров антенной базы [3].

Следует отметить, что не вся спутниковая радионавигационная информация в НП используется в полном объёме. Существует определённый информационный резерв, использование которого совместно с информацией от дополнительного измерительного устройства (магнитометр, солнечный датчик, датчики горизонта, ионные ловушки, звёздные фотометры, информация о токосъёме с панелей солнечных ба-

тарей и т.п.) позволит решить одновременно задачу определения ориентации.

Наибольшее применение в алгоритмах определения ориентации получили магнитометрические измерения и измерения с солнечных датчиков, что вызвано высокой надёжностью и экономичностью магнитометров и солнечных датчиков.

Разработке методов определения ориентации по магнитометрическим измерениям посвящено большое количество работ [4–11].

Важно отметить, что однозначное одномоментное определение ориентации только по магнитометрическим измерениям невозможно.

Задача снятия неоднозначности определения ориентации по магнитометрическим измерениям решается либо путём использования модели движения относительно центра масс, либо комплексированием магнитометрической информации с информацией от дополнительного измерительного устройства.

Существующие методы определения ориентации можно разделить на два класса: методы с использованием моделей движения относительно центра масс (ЦМ) (интегральные методы) и методы, их не использующие (локальные) [12].

1. Интегральные методы. В основу интегральных методов положена идея использования математической модели движения относительно ЦМ для объединения измерений, полученных на достаточном для обработки мерном интервале времени.

Определение ориентации с использование математической модели движения относительно ЦМ может быть выполнено и на основе измерений одного направления. При этом, однако, необходимо, чтобы измеряемый вектор существенно изменял на мерном интервале своё направление, иначе ориентация КА может быть определена лишь с точностью до произвольного поворота вокруг этого вектора.

Интегральные методы определения ориентации не применимы в случае действия на КА значительных, не поддаю-

щихся точному учёту, возмущающих моментов. Так же данный метод определения ориентации не применим для решения задачи определения ориентации в масштабе времени, близком к реальному.

2. Локальные методы. В основу локальных методов одномоментного определения ориентации положен метод согласования измерений двух и более векторов в двух системах координат. В качестве измеряемых параметров при расчёте углового положения КА используются величины, характеризующие в связанной с КА системе координат некоторые направления, известные априорно в базовой (абсолютной, орбитальной или в другой удобной) системе координат. Если на КА одновременно определяется несколько направлений, то число измеряемых функций оказывается достаточным для расчёта матрицы ориентации в каждый отдельный момент времени получения измерений.

Локальные методы определения ориентации являются предпочтительными для решения задачи оперативного определения ориентации на борту КА.

Для многих низковысотных КА приёмная антенна НП устанавливается непосредственно на корпусе КА, при этом его поверхность ограничивает область видимости навигационных спутников (НС). Таким образом, среди НС есть спутники, невидимые из-за конструктивных ограничений. В работах [13, 14] рассмотрены алгоритмы определения ориентации продольной оси КА (при наличии одной антенны) и или полной ориентации КА (при наличии трёх антенн) по анализу видимости/невидимости НС.

В работе [15] проведён анализ записи целей функций для различного количества навигационных антенн и их геометрического расположения. По результатам анализа был сделан вывод о том, что целесообразным является размещение трёх навигационных антенн по трём взаимно перпендикулярным направлениям.

На основании вышесказанного в качестве базового алгоритма в адаптивном алгоритме определения ориентации низ-

ковысотных КА предлагается использовать алгоритм, основанный на анализе видимости/невидимости НС.

При постановке и решении задачи ориентации КА удобно ввести правые ортогональные системы координат (триэдр) с центром в заданной точке, расположенной, как правило, в центре масс объекта. Введём следующие системы координат:

- связанная система координат $OX_1Y_1Z_1$ (ССК) (ось OX_1 – продольная ось, ось OY_1 направлена вверх, ось OZ_1 дополняет систему до правой);

- орбитальная система координат $OX_2Y_2Z_2$ (ОСК) (ось OZ_2 направлена по радиусу-вектору КА, ось OY_2 направлена по вектору кинетического момента орбитального движения КА, ось OX_2 дополняет систему до правой).

Для обозначения систем координат будем использовать первую заглавную букву из обозначения его осей. Нижние индексы у векторов в виде заглавных букв будут определять ту систему координат, в проекциях на которую задаётся вектор. Матрицу перехода от ОСК к ССК будем обозначать как $M_{X_1X_2}$, матрицу обратного перехода будем записывать как $M_{X_2X_1}$. Известно, что матрица перехода, элементы которой представляют собой направляющие косинусы, является ортогональной матрицей, т.е. $(M_{X_1X_2})^{-1} = (M_{X_1X_2})^T$. Поэтому

$M_{X_1X_2} \cdot (M_{X_1X_2})^T = M_{X_1X_2} \cdot M_{X_2X_1} = E$, где E – единичная матрица.

Задачу определения ориентации КА удобно рассматривать с позиций нахождения ориентации ССК относительно ОСК. Суть задачи заключается в определении матрицы $M_{X_1X_2}$. Поскольку в силу свойств ортогональности из девяти элементов этой матрицы только три являются независимыми, возникает возможность различных способов параметризации матрицы перехода. При решении задач ориентации наибольшее применение получили три варианта такой параметризации:

- непосредственно с помощью элементов этой матрицы, представляющих собой направляющие косинусы;
- с использованием кватернионов;
- с применением трёх углов (например, углов Крылова, углов Эйлера [16]).

Как известно, некоторый триэдр можно перевести из исходного положения в новое, произвольное, путём поворотов вокруг трёх осей. В качестве осей поворотов удобно взять оси OX_1 , OY_1 и OZ_1 , жёстко связанные с КА. В отличие от поворота на плоскости, операция поворота в пространстве некоммукативна, т.е. конечное положение триэдра будет зависеть от последовательности, в которой произведены повороты. Поэтому надо эту последовательность доопределить.

Для выбранных углов ориентации (J – угол тангажа, Y – угол рыскания, j – угол крена) и их последовательности поворотов получим следующую матрицу:

$$M_{X_1X_2} = \begin{bmatrix} \cos J \cdot \cos y & \cos J \cdot \sin y & -\sin J \\ \sin j \cdot \sin J \cdot \cos y - \cos j \cdot \sin y & \sin j \cdot \sin J \cdot \sin y + \cos j \cdot \cos y & \sin j \cos J \\ \cos j \cdot \sin J \cdot \cos y + \sin j \cdot \sin y & \cos j \cdot \sin J \cdot \sin y - \sin j \cdot \cos y & \cos j \cos J \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Используя связь между выбранными углами поворота и кватернионом [14], по-

лучим матрицу $M_{X_1X_2}$, параметризованную с помощью кватерниона:

$$\mathbf{M}_{x_1, x_2} = \begin{bmatrix} v_0^2 + v_1^2 - v_2^2 - v_3^2 & 2 \cdot (v_1 v_2 + v_0 v_3) & 2 \cdot (v_1 v_3 - v_0 v_2) \\ 2 \cdot (v_1 v_2 - v_0 v_3) & v_0^2 + v_2^2 - v_1^2 - v_3^2 & 2 \cdot (v_0 v_1 + v_2 v_3) \\ 2 \cdot (v_0 v_2 + v_1 v_3) & 2 \cdot (v_2 v_3 - v_1 v_1) & v_0^2 + v_3^2 - v_2^2 - v_1^2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Таким образом, задача определения ориентации КА сводится к задаче отыскания матрицы перехода (например, от ОСК к ССК) в случае параметризации матрицы углами или направляющими косинусами или к задаче отыскания собственного квадрата вращения.

В адаптивном алгоритме используются все три способа параметризации матрицы ориентации \mathbf{M}_{x_1, x_2} . Выбор конкретного способа параметризации зависит от типа используемой схемы комплексирования [14,17,18], состава измерительной информации и её качества.

Под радионавигационной информацией понимаются измеренные псевдодальности до навигационных спутников и параметры движения центра масс (ПДЦМ) КА, под магнитометрической информацией понимается измеренный и рассчитанный по известной модели вектор напряжённости магнитного поля Земли (МПЗ).

Под адаптивностью алгоритма понимается возможность выбора алгоритма решения задачи определения ориентации низковысотного КА в зависимости от текущих условий проведения измерений и качества измерительной информации.

В состав адаптивного алгоритма включены алгоритмы определения ориентации низковысотного КА по анализу видимости/невидимости НС [13,14] и алгоритмы определения ориентации на основе сильносвязанной и слабо связанной схем комплексирования [14,17,18].

Основная идея адаптивного алгоритма заключается в том, что перед непосредственным решением задачи определения ориентации низковысотного КА полученные измерения подвергаются анализу, результаты которого определяют выбор алгоритма или их комбинации для решения задачи определения ориентации.

Каждый вид измеренных данных проходит анализ и отбраковку по соответствующим критериям.

На первом этапе отбраковываются ПДЦМ КА по критерию оценки полной энергии. Для последующей обработки отбираются те решения, для которых справедливо выполнение неравенства:

$$|h(t_i) - h_{\text{mod}}(t_i)| \leq dh, \quad (3)$$

где $h(t_i)$ – значение энергии, вычисленное по траекторным измерениям на момент времени t_i ; $h_{\text{mod}}(t_i)$ – значение энергии, вычисленное на основе модели движения (в слепополётном варианте обработки данных по «эталонной орбите» [19]) в момент времени t_i ; dh – допустимое отклонение по энергии.

Причём, если в процессе отбраковки выясняется, что данные отклоняются только в краткий промежуток времени, т.е. наблюдаются единичные «всплески», то такие данные исключаются из обработки. Если временной промежуток продолжителен, то используются модельные значения ПДЦМ.

На втором этапе происходит расчёт вектора напряжённости МПЗ по выбранной модели. После расчета модельных значений вектора напряжённости МПЗ отбраковываются измеренные вектора напряжённости по критерию:

$$|H_{\text{meas}} - H_{\text{mod}}| \leq dH, \quad (4)$$

где H_{meas} – измеренное значение вектора напряжённости МПЗ в системе координат, связанной с КА; H_{mod} – модельное значение вектора напряжённости МПЗ, в системе координат, относительно которой определяется ориентация; dH – допустимое отклонение по напряжённости.

Схема адаптивного алгоритма приведена на рис. 1.

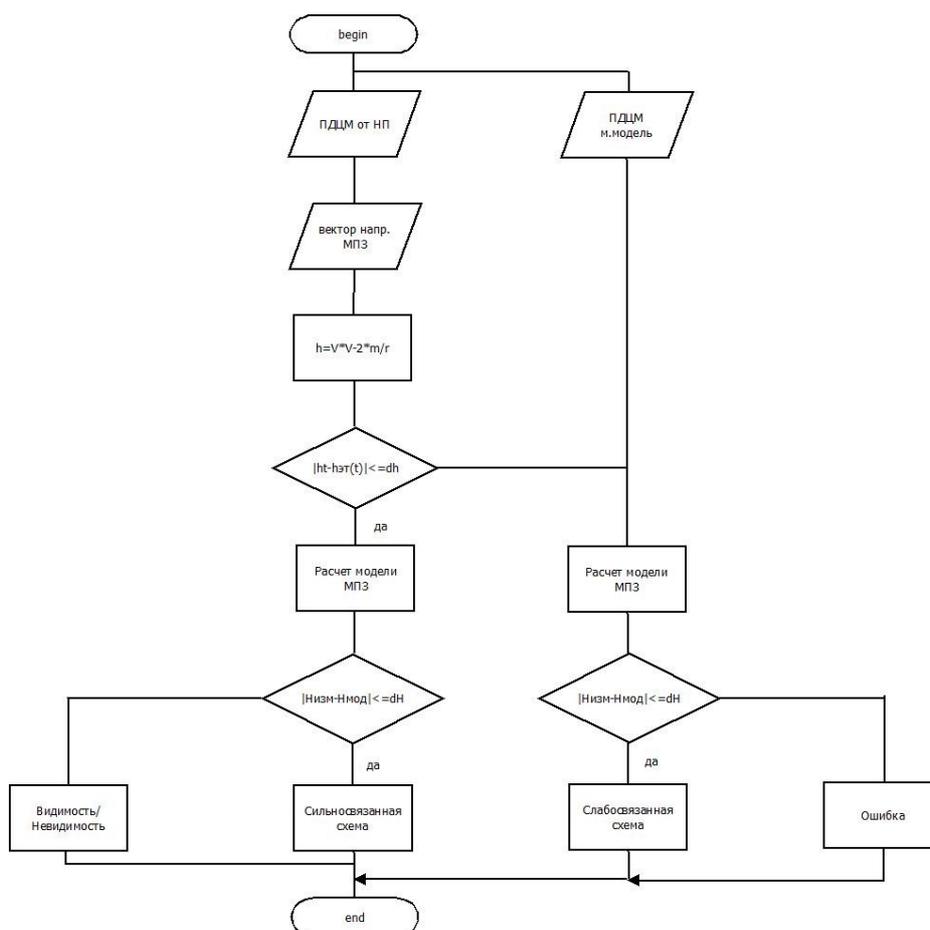


Рис. 1. Схема адаптивного алгоритма

Предложенный адаптивный алгоритм позволяет для решения задачи определения пространственной ориентации низковысотного КА выбрать необходимый алгоритм исходя из состава и качества измерительной информации и тем самым повысить надёжность решения указанной задачи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-31516 мол_a.

Библиографический список

1. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (третья редакция). – М.: КНИЦ ВКС, 1995.
2. Global Positioning System. Standard positioning service. Signal specification. 2-nd editions. June 2, 1995.

3. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации: [Сборник статей и докладов]. - СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2001. - 235 с.

4. Сидоров, И. М. Определение углового положения искусственного спутника Земли с помощью датчиков магнитного поля. [Текст] / И. М. Сидоров, В. П. Прохоренко // Космические исследования. – 1968. – т. VI., Вып. 2. – С.175-185.

5. Титов, А. М. Определение углового положения неориентированных ИСЗ по данным магнитометрических измерений [Текст] / А. М. Титов, В. В. Антоненко, В. П. Щукин // Космические исследования. – 1971. – т. IX., Вып. 3. – С. 397–407.

6. Хацкевич, И. Г. Определение ориентации ИСЗ по магнитометрическим измерениям [Текст] / И. Г. Хацкевич //

Космические исследования. – 1972. – т. X., Вып. 1. – С. 3–12.

7. Голубков, В. В. Определение локальной ориентации космических аппаратов [Текст] / В. В. Голубков // Космические исследования. – 1970. – т. VIII, Вып. 6.–С. 811–822.

8. Титов, А. М. Определение ориентации по двухвекторной системе измерений [Текст] / А. М. Титов, В. П. Щукин // Космические исследования. – 1978.–т. XVI, Вып. 1. – С.3–9.

9. Wertz, J. R. Spacecraft Attitude Determination and Control. Dordrecht [Текст] / J. R. Wertz – The Netherland, 1978.

10. Абрашкин, В. И. Определение вращательного движения спутника «Фотон-М2» по данным бортовых измерений магнитного поля Земли [Текст] / В. И. Абрашкин, В. Л. Балакин, И. В. Белоконов, К. Е. Воронов [и др.] // Препринт Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН. - 2000. – №60. - 32 с.

11. Shuster, M. D. Three-Axis Attitude Determination from Vector Observations [Текст]/ M. D. Shuster, S. D. Oh// Journal of Guidance and Control. - 1981. – Vol.4. - №1. – pp. 70-77.

12. Беляев, М. Ю. Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях [Текст] / М. Ю. Беляев. – М.: Машиностроение, 1984. - 264 с.

13. Белоконов, И. В. Определение возможной ориентации продольной оси микрогравитационной космической платформы «Фотон-М2» по спутниковым радионавигационным измерениям [Текст] / И. В. Белоконов, А. В. Крамлих // Управление движением и навигация летательных аппаратов: сборник трудов XIII Всероссийского научно-технического семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Самара, 2007. – С. 83-89.

14. Крамлих, А. В. Алгоритмы определения ориентации низковысотных кос-

мических аппаратов на основе комплексирования спутниковых радионавигационных и магнитометрических измерений [Текст]: дисс. канд. тех. наук: 05.07.09: защищена 24.10.08: утв. 02.03.09/Крамлих Андрей Васильевич. – С., 2008. – 160 с.

15. Бирюкова, О. А. Исследование эффективности алгоритмов определения ориентации космического аппарата по одномоментным радионавигационным измерениям [Текст] / О. А. Бирюкова, А. В. Крамлих // Управление движением и навигация летательных аппаратов: сборник трудов XV Всероссийского научно-технического семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Самара, 2012.–С. 63-68.

16. Бранец, В. Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела [Текст]/ В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский. – М.: Наука, 1973. - 320 с.

17. Белоконов, И. В. Методика восстановления ориентации космического аппарата при комплексировании магнитометрических и радионавигационных измерений [Текст] / И. В. Белоконов, А. В. Крамлих // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва. – 2007. – №1 (12). – С.22-30.

18. Крамлих, А. В. Алгоритм определения ориентации космического аппарата при слабосвязанной схеме комплексирования радионавигационных и магнитометрических измерений [Текст] / А. В. Крамлих // Аэрокосмическое приборостроение. – Москва, 2008. – № 7. – С. 9-13.

19. Белоконов, И. В. Алгоритм обработки измерительной информации в задаче прогнозирования и использованием регуляризации [Текст] / И. В. Белоконов, В. А. Боровков // Управление движением и навигация летательных аппаратов: сборник трудов XI Всероссийского научно-технического семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Самара, 2003. – С.168-174.

ADAPTIVE ALGORITHM OF DETERMINING LOW ALTITUDE SPACECRAFT ORIENTATION ON THE BASIS OF PROCESSING INSTANT DIVERSE-TYPE MEASUREMENTS

© 2012 M. Ye. Grigoryeva, A. V. Kramlikh

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

The paper deals with the problems of constructing the adaptive algorithm of determining low altitude spacecraft orientation on the basis of processing instant diverse-type measurements (radio navigation, magnetometric measurements). The loosely coupled and tightly coupled schemes of integrating magnetometric and radionavigation information as well as the algorithm of determining orientation based on the analysis of GLONASS/GPS navigation satellites' spatial location form the basis of the adaptive algorithm.

Low altitude spacecraft, orientation, integration, magnetometric measurements, radionavigation measurements, GLONASS, GPS, adaptive algorithm.

Информация об авторах

Григорьева Мария Евгеньевна, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: mashagrigureva@gmail.com. Область научных интересов: алгоритмы ориентации космических аппаратов, комплексирование и обработка информации.

Крамлик Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры космического машиностроения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kramlikh@mail.ru. Область научных интересов: навигация и ориентация космических аппаратов, комплексирование и обработка информации.

Grigoryeva Maria Yevgenyevna, undergraduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov. E-mail: mashagrigureva@gmail.com. Area of research: spacecraft orientation algorithms, information integrating and processing.

Kramlikh Andrey Vasilyevich, candidate of engineering science, assistant professor, the department of space mechanical engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov. E-mail: kramlikh@mail.ru. Area of research: spacecraft navigation and orientation, information integrating and processing.