

ИМИТАЦИЯ И АНИМАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ МИНИ-СПУТНИКА ЗЕМЛЕОБОЗОРА

Е.И. Сомов (Самара), Ч.М. Гаджиев (Стамбул), В.М. Суханов (Москва),
Т.Е. Сомова (Самара)

Введение

Рассматривается мини-спутник землеобзора (рис. 1), оснащенный телескопом с матрицами оптико-электронных преобразователей (ОЭП) в его фокальной плоскости. При оптико-электронной съемке заданных участков поверхности Земли совокупностью маршрутов их сканирования телескопом матрицы ОЭП работают в режиме временной задержки и накопления. Маршруту съемки соответствует закон углового наведения космического аппарата (КА), при котором обеспечивается требуемое движение оптического изображения на поверхности ОЭП. Орбита КА считается известной,

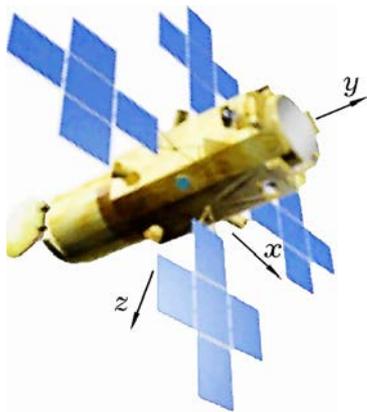


Рис. 1. Мини-спутник землеобзора

система управления движением (СУД) спутника содержит бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС) с астрономической коррекцией и силовой гироскопический комплекс (СГК) на основе гироскопов (ГД) с разгрузкой от накопленного кинетического момента магнитным приводом с широтно-импульсной модуляцией управления. Авторы имеют опыт динамических исследований и автоматизированного проектирования отказоустойчивых СУД КА различного назначения, включая информационные спутники, космические роботы и др. [1-4].

С учетом тематики конференции в статье кратко представляются разработанное алгоритмическое и программное обеспечение для компьютерной имитации работы СУД и анимации движения спутника, а также компоненты информационной технологии для полетного сопровождения СУД.

Математические модели

Используются стандартные системы координат (СК) – инерциальная (ИСК), геодезические Гринвичская и горизонтная СК, орбитальная (ОСК), связанная с КА (ССК $Oxyz$, рис. 1), а также системы координат бортового телескопа и его фокального узла. Ориентация ССК в ИСК определяется кватернионом Λ , а относительно ОСК – углами крена, рыскания и тангажа.

Пусть $\Lambda^p(t)$ и $\omega^p(t)$ представляют кватернион и вектор угловой скорости корпуса КА при его программном движении. Тогда кватернион рассогласования E формируется в виде $E = \tilde{\Lambda}^p(t) \circ \Lambda$ и матрица погрешности ориентации $C_e = I_3 - 2[ex]Q_e^t$, где $Q_e = I_3 e_0 + [ex]$. Вектор $\delta\omega = \{\delta\omega_i\}$ погрешности угловой скорости определяется в ССК как $\delta\omega = \omega - C_e \omega^p(t)$. Для моделирования движения упругого КА используется метод Релея-Ритца-Галеркина в форме метода конечных элементов с редукцией по тонам колебаний. Здесь вычисляются матрицы коэффициентов взаимовлияния движений как твердых, так и деформируемых тел, которые в совокупности составляют конструкцию КА. В контуре управления ориентацией КА используется вектор углового

рассогласования $\varepsilon = \delta\phi = \{\delta\phi_i\} = \{-2e_0e\}$, его измеренные и отфильтрованные значения ε_k^f , $k \in N_0 \equiv \{0,1,2,\dots\}$ применяются в нелинейном векторном законе цифрового управления СГК. Для моделирования логико-динамических процессов полетной диагностики структурного состояния СУД, блокирования аварийных ситуаций, обусловленных отказами компонентов БИНС, СГК и сбоями БЦВМ, а также процессов реконфигурации СУД, применяются как детерминированные, так и стохастические логические автоматы. Наличие процессов, управляемых событиями, приводит к необходимости именно имитационного моделирования [5,6].

Постановка задачи

Рассматриваются задачи и кратко представляется разработанное алгоритмическое и программное обеспечение для:

1. анализа поля скоростей движения изображения (СДИ) наземных объектов на матрицах ОЭП при трассовых, геодезических и протяженных криволинейных маршрутах с выравниванием продольной СДИ; синтеза алгоритмов углового наведения КА, обеспечивающих последовательность маршрутов съемки, в том числе формирование изображений площадей и получения их стереоизображений;
2. компьютерной имитации работы СУД мини-спутника землеобзора;
3. компьютерной анимации движения мини-спутника землеобзора с демонстрацией компонентов информационной технологии для полетного сопровождения СУД.

Анализ скоростей движения изображения и синтез законов наведения. С применением приёмов космической геодезии авторами созданы оригинальные аналитические методики для синтеза законов наведения КА при сканирующей съемке, которые основаны на методах анализа поля СДИ наземных объектов на матрицах ОЭП. Задача вычисления кватерниона Λ ориентации ССК относительно ИСК, векторов угловой скорости ω и ускорения ε , как явных функций на заданном интервале времени, решается на основе векторного сложения всех элементарных движений телескопа в Гринвичской геодезической СК с учетом текущей перспективы наблюдения при задании начальных координат наземного объекта и требуемого геодезического азимута сканирования. Созданные методы конкретизированы для трассовых съемок (рис. 2 а), протяженных криволинейных маршрутов с выравниванием продольной СДИ (рис. 2 б), площадного землеобзора с последовательностью геодезических маршрутов (рис. 2 в), а также для получения стереоизображений участков поверхности Земли.

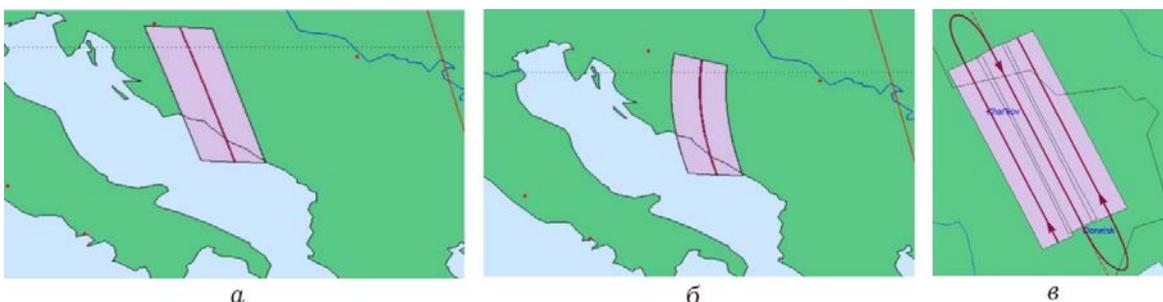


Рис. 2. Маршруты трассовой (а), с выравниванием СДИ (б) и площадной (в) съемки

Имитация работы СУД. Разработанная программная система *SIRIUS-S* [7] предназначена для проектирования систем наведения, навигации и управления движением информационных спутников. Эта система реализована с применением среды *MatLab*, содержит диалоговый монитор (рис. 3), подсистемы моделирования, синтеза и анализа, а также технологические подсистемы анимации пространственного движения КА и документирования результатов. Управление работой *SIRIUS-S*

выполняется с помощью системы иерархических меню. В результате инженер-разработчик получает функциональный облик СУД в отношении периодичности, производительности и оперативности космического наблюдения, разрешения на местности, точности наведения и стабилизации бортового телескопа с учетом возмущений, ограничений и др. факторов.

В системе *SIRIUS-S* реализованы модели Земли, конструкции КА, его поступательного и углового движений: как при объектовой, стерео- и площадной съемке, так и при поворотных маневрах. Эти модели позволяют выполнить точный расчет всех кинематических параметров движения КА и сформировать набор хт-файлов для подсистемы визуализации. Документируемые результаты представляются сценами маршрутов съемки на картографической основе, таблицами и графиками изменения координат движений корпуса в функции времени, значениями достигнутых характеристик качества наблюдения и критериев оптимальности.

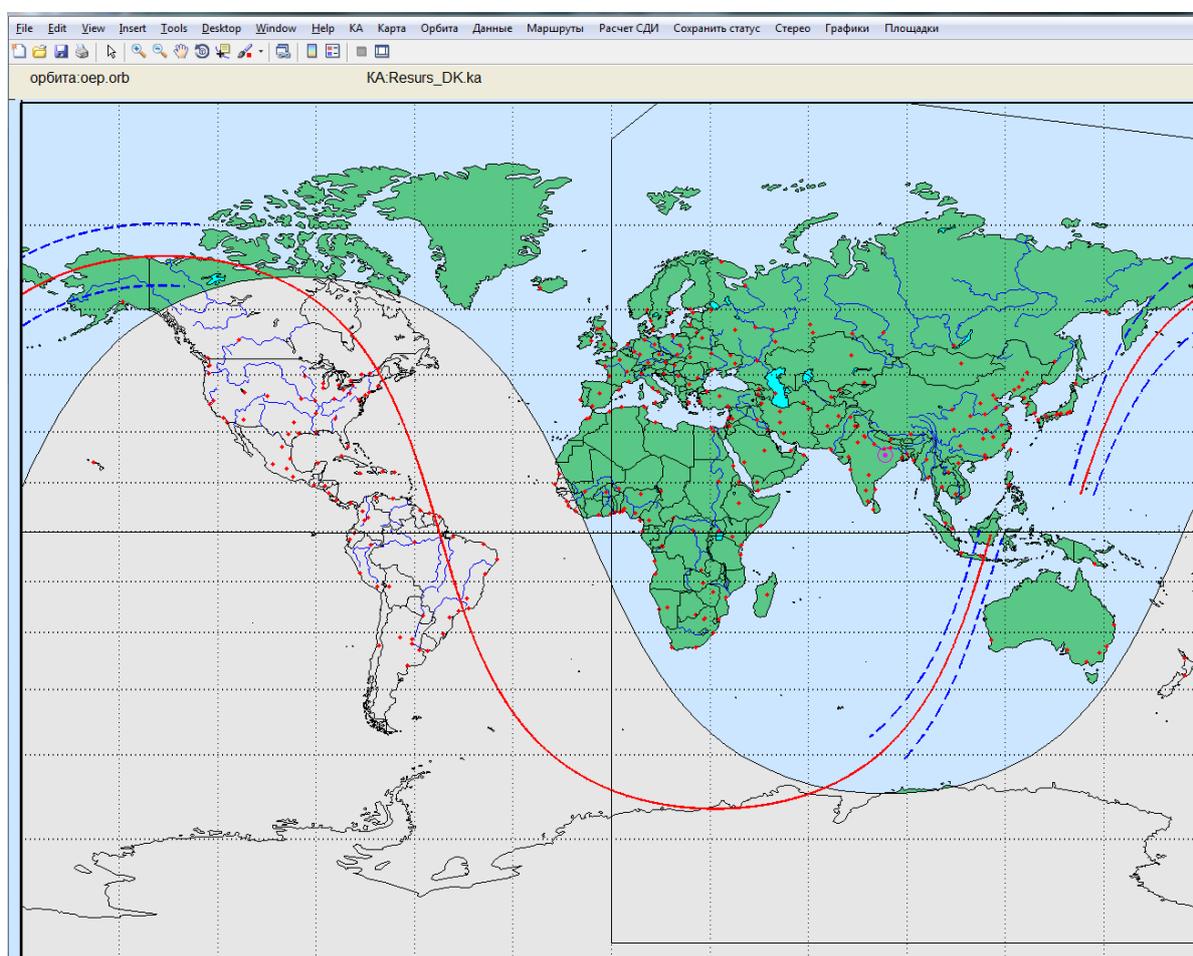


Рис. 3. Главное диалоговое окно программной системы *SIRIUS-S*

Подсистема моделирования содержит следующие компоненты: модель Земли и электронные карты с базами данных для объектов на земной поверхности; структурная модель КА – геометрические и инерционные характеристики конструкции, параметры телескопов, исполнительных органов, измерительных подсистем и др.; баллистическая модель движения центра масс КА; модели углового движения КА, методы расчета маршрутных движений и поворотных маневров с краевыми условиями общего вида, объектовой съемки и др.; модели внешней обстановки – методы расчета освещенности

наблюдаемой поверхности, облачности и др.

Подсистема анализа и синтеза предназначена для выполнения таких функций:

- отображение карт земной поверхности с объектами наблюдения;
- отображение орбиты и трассы полета КА, полосы обзора; расчет и отображение орбитального и углового движений КА при выполнении целевых задач, проверка их реализуемости при ограниченных ресурсах исполнительных органов СУД;
- синтез алгоритмов определения ориентации, законов наведения и управления ориентацией КА;
- анализ устойчивости и качества системы управления движением КА;
- расчет видимости пунктов приема информации и др.; расчет СДИ в заданных точках матрицы ОЭП и достигаемого пространственного разрешения на местности;
- анализ вариантов СУД КА по различным критериям; имитационного моделирования логико-динамических процессов диагностики СУД, блокирования аварийных ситуаций и реконфигурации СУД для восстановления её работоспособности.

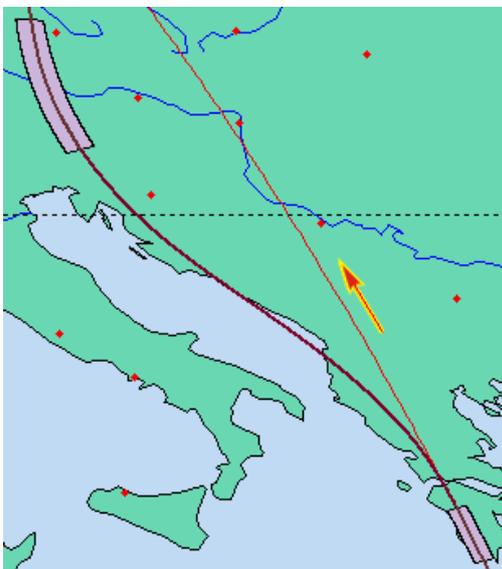


Рис. 4. Отображение маршрутов на карте

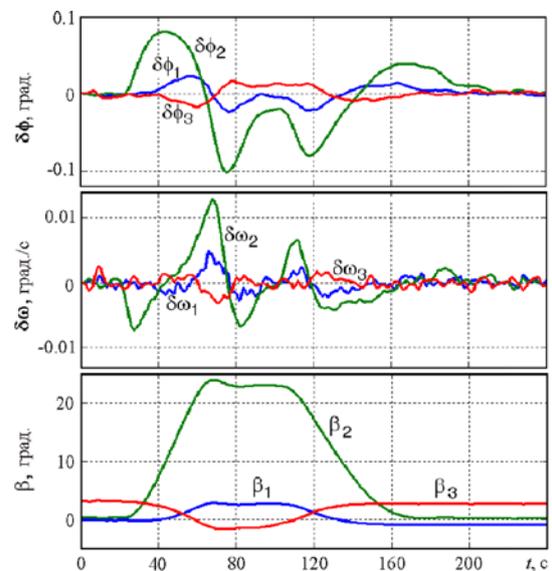


Рис. 5. Ошибки стабилизации и углы ГД

На рис. 4 представлена схема землеобзора с двумя маршрутами сканирующей оптико-электронной съемки, где отмечены трасса спутника, первый маршрут в направлении надира, след линии визирования бортового телескопа при выполнении поворотного маневра спутника и второй маршрут с выравниванием СДИ и начальным отклонением линии визирования от надира по крену на угол 30 град. Программа наведения КА была синтезирована с учетом ограничения на модуль вектора угловой скорости КА в виде $|\omega(t)| \leq 0.35$ град/с. Результаты компьютерной имитации углового движения КА при реализации указанной программы наведения представлены на рис. 5 в виде ошибок стабилизации по углам ориентации и угловым скоростям, а также значений углов трех работоспособных гироцинов.

Анимация движения мини-спутника землеобзора

В *SIRIUS-S* подсистема анимации пространственного движения КА [8] является программным средством, созданным в среде *Delphi 7* с применением графической библиотеки *OpenGL*. 3D-модель конструкции КА реализована в среде *Blender*,

отображение ее элементов с учетом освещенности Солнцем реализуется средствами *OpenGL*. Здесь выполняется стандартная процедура “наклейки” текстуры в виде карты Земли на сферическую поверхность с последующим масштабированием для учета сжатия фигуры Земли, отмечаются объекты наблюдения и рассчитываются их географические координаты, определяется положение КА с телескопом в СК сцены съемочной камеры. Отображаются конструкция КА, текущая точка трассы КА, точка пересечения линии визирования с поверхностью Земли и проекция центральной линии матрицы ОЭП на эту поверхность, если в этот момент выполняется сканирующая съемка. Программа визуализации позволяет изменять масштаб изображения при сканирующей оптико-электронной съемке поверхности вращающейся Земли, временной темп анимации и ракурс наблюдения сцены движения КА. Фрагменты кадров анимации движения спутника приведены на рис. 6.



Рис. 6. Фрагменты кадров анимации движения мини-спутника землеобзора в 2 ракурсах

Информационная технология полетной поддержки СУД. С целью повышения надежности и живучести СУД мини-спутника землеобзора при возникновении отказов бортовой аппаратуры в центре управления полетами (ЦУП) обеспечивается её полетная поддержка [9] – [13]. При этом используется поступающая с борта КА телеметрическая информация оперативного контроля (ИОК), где содержатся данные о значениях основных переменных состояния бортовых систем.

Наряду с информацией, необходимой для диагностики работы СУД, в ИОК присутствуют измеренные данные о кинематических параметрах орбитального и углового движения КА, которые получаются по сигналам GPS/ГЛОНАСС и БИНС соответственно, с «привязкой» к полетному времени. Для полетного сопровождения СУД операторами ЦУП применяется система поддержки принятия решений (СППР). В этой системе выполняются декодирование телеметрической ИОК, декомпозиция информации по принадлежности к конкретным бортовым системам, локализация отказов бортовой аппаратуры, подготовка данных, выполнение уточняющего имитационного моделирования и в диалоге с операторами по решающим правилам в составе базе знаний СППР формируются рекомендации о необходимых действиях.

Для операторов ЦУП наибольшую сложность представляет проблема восприятия фактической (по измерениям работоспособных приборов) ориентации

спутника относительно направлений на объекты внешней космической обстановки при возникновении аварийной ситуации в работе СУД, когда ее ресурсы не позволяют выполнить автоматическую диагностику отказавшего прибора и восстановление работоспособности СУД за счет реконфигурации контура управления.

Наличие в ЦУП среды анимации позволяет исключить эту проблему: на двух соседних мониторах одновременно отображаются пространственные движения спутника на основе как данных телеметрической ИОК, так и результатов компьютерной имитации движения КА с соответствующими значениями параметров, начальных условий модели СУД и гипотезами о возможных отказах приборов контура управления движением спутника.

Выводы

Представлено разработанное программное обеспечение для имитации и анимации движения мини-спутника землеобзора, описаны компоненты информационной технологии, апробированной для полетной поддержки системы управления движением спутника в ЦУП. Численные результаты, полученные средствами системы *SIRIUS-S*, демонстрируют работоспособность созданных алгоритмов и программ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 14-08-01091_а) и РФФИ/TUBITAK (российско-турецкий проект 14-08-91373 СТ_а /113E595).

Литература

1. Somov Ye., Sukhanov V., Hacizade C. Guidance and precise motion control of free-flying robots and land-survey mini-satellites // Proceedings of 13th IEEE international conference on control, automation, robotics and vision. Singapore. 2014. P. 1092-1097.
2. Somov Ye., Butyrin S., Somov S., Hajiyev C. Attitude guidance, navigation and control of land-survey mini-satellites//Proceedings of IFAC international workshop on advanced control and navigation for autonomous aerospace vehicles. Seville. 2015. P. 222-227.
3. Somova T. Digital and pulse-width attitude control, imitation and animation of land-survey mini-satellite // Proceedings of 7th IEEE/AIAA international conference on recent advances in space technologies. Istanbul. 2015. P. 765 – 770.
4. Somov Ye., Hajiyev C., Somova T. Fault tolerant digital attitude control and animation of a mini-satellite motion // Proceedings of 7th international scientific conference on physics and control. Istanbul. 2015. P. 1-6.
5. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. М.: Высшая школа. 2001.
6. Павловский Ю.Н., Белотелов Н.В., Бродский Ю.И. Имитационное моделирование. М.: Издательский центр «Академия». 2008.
7. Somov Ye.I., Butyrin S.A., Somov S.Ye., Somova T.Ye. *SIRIUS-S* software environment for computer-aided designing of attitude control systems for small information satellites // Proceedings of 20th Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems. 2013. P. 325–328.
8. Сомова Т.Е. Моделирование и анимация пространственного движения маневрирующего спутника землеобзора // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Том 14. № 6. С. 125-128.
9. Сомова Т.Е. Применение имитации и анимации для полетной поддержки систем управления информационных спутников // Проблемы управления. 2014. № 5. С.

- 70-78.
10. Бутырин С.А., Сомов С.Е., Сомова Т.Е. Моделирование, имитация и анимация пространственного движения мини-спутника землеобзора с гиросиловой системой управления // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении». Санкт Петербург: Концерн «ЦНИИ Электроприбор». 2014. С. 181-191.
 11. Сомова Т.Е. Компьютерные технологии имитации и анимации для полетной поддержки системы управления движением мини-спутника землеобзора // Материалы XI Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами». М.: ИПУ РАН. 2014. С. 857- 873.
 12. Сомова Т.Е. Применение 3D-анимации при обучении полетной поддержке систем управления информационных спутников // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. М.: ИПУ РАН. 2014. С. 9502-9514.
 4. Сомова Т. Е. Алгоритмы имитации и анимации для полетной идентификации и поддержки системы управления движением мини-спутника // Сборник докладов 10 международной конференции "Идентификация систем и задачи управления". М.: ИПУ РАН. 2015. С. 1078-1089.