

Технология аппаратно-программного моделирования датчиков ориентации космического аппарата на базе микроконтроллеров STM32

А. Ю. Кулаков¹, А. В. Смирнов²

Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН

¹russ69@bk.ru, ²smir@iias.spb.su

Аннотация. В настоящее время бурное развитие, в том числе в космической отрасли, получила концепция аппаратно-программного моделирования сложных технических объектов (СТО). Основной особенностью таких объектов является наличие систем управления реального времени со сложной и порой неоднородной структурой. В иностранной литературе при рассмотрении моделирования СТО особую популярность получила концепция «X-In-the-Loop».

Среди специализированного программного обеспечения (ПО) моделирования космических аппаратов (КА) стоит выделить ПО с открытым исходным кодом, которые имеют достаточную документацию для понимания их работы и активное сообщество в интернете.

В данном докладе предлагается технология аппаратно-программного моделирования, основанная на Проекте «42» (ПО моделирования КА) и микроконтроллере (МК) STM32. Для работы с МК STM32 в рамках данной технологии используется интегрированная среда разработки IAR Embedded Workbench.

Ключевые слова: датчики ориентации; космический аппарат; аппаратно-программное моделирование; программное обеспечение в цикле; аппаратное обеспечение в цикле; STM32

I. ВВЕДЕНИЕ

В иностранной литературе принята следующая терминология для метода аппаратно-программного моделирования, который называется «X-In-the-Loop». В работах [6, 4], посвящённых применению данного подхода в космической отрасли, упоминается о четырёх уровнях моделирования [3]:

- алгоритмы в цикле (Algorithm in the Loop) или модель в цикле (Model in the Loop – MIL);
- программное обеспечение в цикле (Software in the Loop – SIL);
- процессор/контроллер в цикле (Processor in the Loop – PIL);
- аппаратное обеспечение в цикле (Hardware in the Loop – HIL).

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№№19–08–00989, 20-08-01046), в рамках бюджетной темы №№0073–2019–0004

Каждый уровень моделирования строится на основе определённой инфраструктуры, состоящей из программных и аппаратных средств, и соответствующей этой инфраструктуре технологии и стенов моделирования.

За последние 10 лет появилось немало открытых публикаций [1,2,4,7,5,6,8,9], посвящённых разработке и использованию стенов аппаратно-программного моделирования в космической отрасли.

В работе [6] отмечается безусловные преимущества применения концепции аппаратно-программного моделирования в аэрокосмической отрасли и автомобилестроении, в приложениях, связанных с управлением мощностью, и робототехнике. Однако существует трудность в приобретении оборудования для организации стенов моделирования. Приводится цифра порядка 200 000 евро за стенд уровня HIL [6]. Поэтому среди выделенных публикаций стоит отметить программные средства моделирования с открытым исходным кодом: Проект «42» [1], NOS3 [2] и Basilisk [9], которые имеют достаточную документацию для понимания их работы и активное собственное сообщество в интернете.

Что же касается подобных публикаций в отечественной литературе, то ПО, которое упоминается в данных публикациях носит закрытый характер [10,11,12, 15]. Чаще всего даже нет ресурса, на котором размещена демо-версия проекта.

Таким образом, данная статья имеет целью ознакомить широкий круг заинтересованных пользователей (студентам, инженерам, программистам, преподавателям и научным работникам) с готовым инструментом для моделирования функционирования КА на уровне MIL, SIL и PIL в части датчиков ориентации. В первом разделе описан опыт авторов доклада при моделировании КА на уровне MIL и SIL с помощью Проекта «42». Во втором разделе предлагается технология аппаратно-программного моделирования датчиков ориентации КА на основе Проекта «42» и одного из самых популярных и доступных микроконтроллеров – STM32. Приводится пример моделирования измерителя угловой скорости.

II. МОДЕЛИРОВАНИЯ КА НА УРОВНЕ MIL/SIL

Предлагаемая технология основана на Проекте «42» [7], который является ПО с открытым исходным кодом. Преимуществом данного ПО является то, что его код реализован на языке Си (процедурный стиль программирования). Эта особенность позволяет разрабатывать, отлаживать и тестировать прототипы бортового ПО (БПО) на исходном для большинства бортовых вычислителей (БВ) языке программирования непосредственно в файлах Проекта «42», без дополнительных программных интерфейсов.

Авторами доклада для исследовательской деятельности исходный код Проекта «42» с некоторыми изменениями был собран как приложение с графическим интерфейсом, работающее на операционной системе (ОС) Windows 7/10. Для отладки и сборки кода использовалась кроссплатформенная среда разработки приложений с графическим интерфейсом Qt Creator.

Приложение предназначалось для демонстрации возможностей алгоритмов структурно-функциональной реконфигурации бортовой аппаратуры (БА) малого КА при возникновении разных типов нештатных ситуаций на его борту [13, 14]. Дополнительно к уже имеющимся моделям БА и алгоритмам были разработаны:

- модель системы электропитания;
- модель бортовой радиотелеметрической системы;
- алгоритм ориентации в орбитальной системе координат;
- алгоритм приведения и ориентации на Солнце;
- алгоритмы «стандартной» и структурно-функциональной реконфигурации БА;
- загрузчик (выполняется перед началом моделирования) и планировщик программы полёта;
- имитатор сбоев и отказов БА системы управления движением (СУД).

Важно отметить, что разработчиками Проекта «42» предоставляются модели БА и алгоритмы БПО в некоторых аспектах упрощённые.

Таким образом, при использовании Проекта «42» для моделирования функционирования бортовых систем (и аппаратуры) и КА в целом необходимо учитывать ряд ограничений. Если речь идёт о моделировании СУД КА уровне MIL, которое подходит для научно-исследовательских работ (НИР) и эскизного проекта (возможно, технического проекта) опытно-конструкторских работ (ОКР), то имеющихся в Проекте «42» моделей и алгоритмов достаточно. Также Проекта «42» может использоваться в некоторых случаях при разработке БПО КА на уровне SIL:

- определение углового положения КА;
- управление угловым положением КА в режимах одноосной и трёхосной стабилизации;

- стабилизация КА по угловой скорости;
- переориентация КА и т. п.

В остальном, что касается программ управления БА СУД и моделирования других бортовых систем, программ планировщиков, программ контроля и реконфигурации (программы FDRI - Failure Detection, Recovery and Isolation в иностранных публикациях), безусловно, необходимо учитывать особенности конкретной БА со своим протоколом информационного обмена и режимами работы, ограничениями на определение ориентации или управления. Такое моделирование имеет смысл организовывать на уровне PIL. При этом необходимо начинать с доработки уже имеющихся моделей БА, а именно: с разработки модели информационного обмена между бортовым вычислителем и БА и логики её функционирования.

III. ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ОРИЕНТАЦИИ КА НА УРОВНЕ PIL

Для реализации технологии моделирования датчиков ориентации КА на уровне PIL на персональном компьютере под управлением ОС Windows 7/10 в докладе предлагается следующий набор программных и аппаратных средств: (1) Проект «42», (2) отладочная плата микроконтроллера STM32, (3) среда разработки IAR Embedded Workbench, (4) среда разработки приложений с графическим интерфейсом Qt Creator, (5) преобразователь USB-UART на базе FT232, (6) библиотека для управления преобразователем USB-UART, (7) драйвера для преобразователя USB-UART на базе FT232.

Как видно из описания программных и аппаратных средств информационный обмен между реальной БА и бортовым вычислителем будет реализован на основе UART. Общая схема и структурные связи программных и аппаратных средств моделирования представлены на рис. 1.

Здесь в качестве примера был смоделирован блок электроники (БЭ) датчика угловых скоростей, взаимодействующий с четырьмя одноосными гироскопами (ОГ).

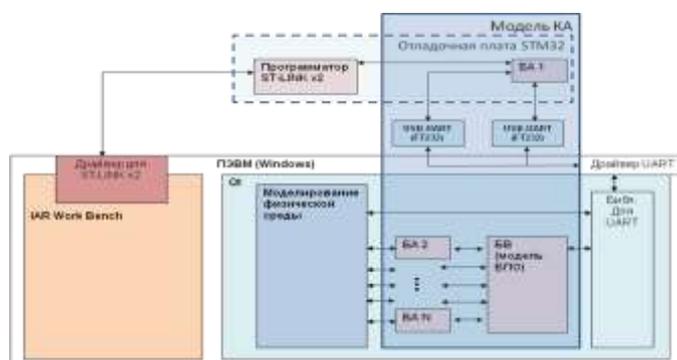


Рис. 1. Стенд аппаратно-программного моделирования

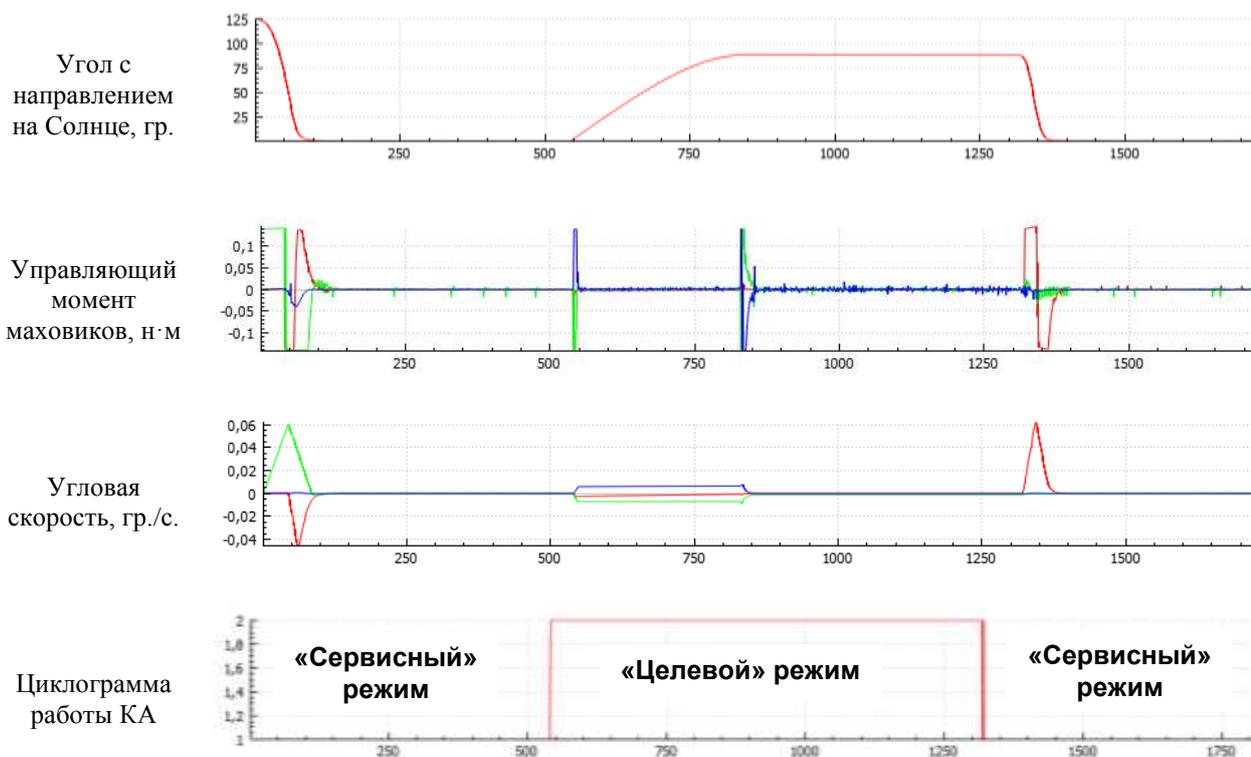


Рис. 2. Основные характеристики КА

На рис. 2 представлена смоделированная циклограмма функционирования КА, угловая скорость, поступающая с микроконтроллера STM32, изменение угла между нормалью к солнечной панели (СП) и направлением на Солнце и моменты управления по трём осям связанной системы координат КА, реализуемые системой из четырёх маховиков. На циклограмме приведена смена двух режимов функционирования КА, которые с точки зрения системы управления движением заключаются в ориентации СП на Солнце и ориентации КА в орбитальной системе координат (ОСК). Логика функционирования КА следующая: при работе целевой аппаратуры КА должен быть сориентирован в ОСК (условно «целевой» режим), на остальных участках КА производит зарядку аккумуляторных батарей посредством солнечной ориентации (условно «сервисный» режим).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в данном докладе технология моделирования на основе Проекта «42» позволяет:

- достаточно подробно моделировать функционирование КА;
- встраивать в контур моделирования собственные модели БА и создавать новые модели бортовых систем, например, систему электропитания, бортовую радиотелеметрическую систему и т. д.;
- моделировать и соответственно тестировать алгоритмы БПО на языке программирования для БВ;

- посредством моделирования на уровне РП отрабатывать алгоритмы управления БА и протоколы информационно-логического взаимодействия между БА и БВ.

Преимущества данной технологии заключаются:

- прежде всего, в доступности программных и аппаратных средств, в простоте и дешевизне её реализации;
- в возможности быстрого старта с использованием уже имеющихся моделей БА и алгоритмов управления ориентацией;
- в масштабируемости и гибкости ПО моделирования под нужды конкретного проекта;
- в наличии хорошо структурированных начальных исходных данных по ряду КА.

Представленная в данном докладе технология будет полезна студентам и преподавателям ВУЗов, научным сотрудникам исследовательских институтов, инженерам, конструкторам, программистам занятым в ракетно-космической отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] <https://software.nasa.gov/software/GSC-16720-1>
- [2] <https://arxiv.org/abs/1901.07583>
- [3] Jens Eickhoff., *Simulating Spacecraft Systems*. Berlin: Springer, 2009, 353 p.

- [4] Computational and Numerical Simulations / Editor: Jan Awrejcewicz, InTech, 2014.
- [5] Design and Development of ITU pSAT II: On orbit demonstration of a high-precision ADCS for nanosatellites / E. Koyuncu, M. Cihan, K. Ure, C. Akay, E. Baskaya, S. Sarikaya, A. Cetin, U. Eren, Y. Kaya, B. Karadag, C. Kurtulus, M.O. Kaya, İ. Ozkol and G. Inalhan // 8th International ESA Conference on Guidance, Navigation and Control Systems, GNS 2011, Karlovy vary, 5-10 June 2011.
- [6] De Farias, A.B.C., Rodrigues R.S., Murilo A., Lopes R.V., Avila S. Low-Cost Hardware-in-the-Loop Platform for Embedded Control Strategies Simulation // IEEE Access. 2019. №7. P. 111499–111512.
- [7] Kiesbye J., Messmann D., Preisinger M., Kiperman G. J. R., Nagy D., Schummer F., Mostad M., Kale T., Langer M. Hardware-In-The-Loop and Software-In-The-Loop Testing of the MOVE-II CubeSat // Aerospace. 2019. vol. 6, №12. P. 130-155.
- [8] Mendoza-Bárceñas M.A., Vicente-Vivas E., Rodríguez-Cortés H. Mechatronic Design, Dynamic Modeling and Results of a Satellite Flight Simulator for Experimental Validation of Satellite Attitude Determination and Control Schemes in 3-Axis // Journal of Applied Research and Technology. 2014. №12. P.370-383.
- [9] Kenneally P.W., Piggott S., Schaub H. Basilisk: A Flexible, Scalable and Modular Astrodynamics Simulation Framework // Journal of aerospace information systems. 2020. №17(4). P.1-13.
- [10] Гриневич Д.В., Лебедев А.В., Мороз О.В. Разработка универсального моделирующего программного комплекса для создания стендов отладки и поддержки систем ориентации космических аппаратов // Вопросы электромеханики. 2013. Т. 135. С. 21-30
- [11] Игнатьев М.Г., Копылов В.М., Кулаков А.Ю., Сотников М.В., Программный комплекс моделирования стабилизированного движения космического аппарата с трансформируемыми упругими элементами конструкции // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 3(49). С. 45-48.
- [12] Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Проектирование предметно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 538–544.
- [13] Гирорьев К.Л., Кулаков А.Ю., Осипенко С.А. Павлов А.Н., Слинко А.А., Подход к исследованию структурно-функциональной реконфигурации системы управления движением космического аппарата // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. 2016. №655. С. 17-23.
- [14] Зайченко Ю.В., Кулаков А.Ю., Соколов Б.В., Чёрный А.Н., Специализированное программно-математическое обеспечение управления реконфигурацией бортовых систем малоразмерных космических аппаратов // «Информатизация и связь». 2020. №5. С. 125-131.
- [15] Иванов Д.С., Овчинников М.Ю., Ролдугин Д.С., Ткачев С.С., Трофимов С.П., Шестаков С.А., Ширококов М.Г. Программный комплекс для моделирования орбитального и углового движения спутников // Математическое моделирование. 2019. Т. 31. №12. С. 44-56.