

Особенности разработки модульных аппаратно-программных комплексов полунатурного моделирования систем управления и навигации малоразмерных космических аппаратов

77-30569/230123

10, октябрь 2011

Игрицкий В. А., Майорова В. И.

УДК 629.7.018

МГТУ. Им. Н.Э. Баумана

igritsky_v_a@mail.ru

victoria.mayorova@online.ru

1. Введение

Одним из актуальных направлений развития космонавтики является все более широкое использование малоразмерных космических аппаратов (МКА). Основной причиной их использования для решения все более широкого круга задач является постепенная миниатюризация целевого оборудования, а также снижение расходов времени и средств на их разработку и выведение на орбиту таких космических аппаратов.

Важным направлением совершенствования МКА является создание более точных, легких, надежных и долговечных систем управления движением и навигацией (СУДН), что обеспечивается наблюдаемым сейчас непрерывным прогрессом в области применяемых датчиков и исполнительных органов. Особенно важно это для требующих точной ориентации спутников дистанционного зондирования Земли, обеспечивающих мониторинг окружающей среды и околоземного пространства, контроль чрезвычайных ситуаций и экологических бедствий, а также исследование природных ресурсов Земли, что является одним из приоритетных направлений космической деятельности согласно Федеральной космической программе России на 2006-2015 годы [1].

При этом вновь создаваемые СУДН МКА требуют тщательной наземной отработки, так как, например, некоторые реализуемые с помощью новых аппаратных средств режимы работы СУДН ранее не использовались в космической технике. Так,

например, появление новых отечественных звездных приборов с высокой частотой опроса позволяет во многих случаях организовывать точное управление движением КА без использования датчиков угловых скоростей, что ранее было невозможно. Однако применение таких режимов, безусловно, требует всесторонних испытаний работы СУДН в этих режимах, для чего необходимо создавать соответствующие испытательные стенды, традиционно используемые для отработки соответствующего программного обеспечения [2]. С увеличением сложности решаемых задач и усложнением структуры этих стендов такие стенды сейчас более правильно называть аппаратно-программными комплексами (АПК). Наиболее быстро и качественно при этом, на наш взгляд, СУДН МКА может быть отработана при применении нового поколения специальных АПК полунатурного моделирования (ПНМ), позволяющих изменять из состав и проводить испытания в конфигурациях от полностью программного моделирования СУДН на ранних этапах разработки МКА до, в идеале, полностью собранной СУДН при испытаниях летного МКА, где оборудованием АПК могут моделироваться взаимодействующие с СУДН системы и окружающая среда. Применение таких АПК позволит выявлять потенциальные проблемы в работе СУДН на как можно более ранних этапах разработки и создания МКА, что может существенно снизить затраты на устранение выявленных недостатков.

2. Назначение и задачи перспективных АПК ПНМ СУДН

Основное назначение АПК ПНМ СУДН – обеспечение моделирования процессов функционирования СУДН с учетом команд, выдаваемых бортовым комплексом управления (БКУ) с учетом возможности возникновения нештатных ситуаций (НШС) на борту МКА. В соответствии с этим АПК ПНМ СУДН должен обеспечивать решение следующих задач:

- 1) формирование начального состояния моделей СУДН и других систем МКА, а также начальных условий функционирования в космическом пространстве;
- 2) моделирование в реальном времени функционирования элементов СУДН, включая моделирование:
 - динамики управляемого движения МКА с учетом условий функционирования в космическом пространстве и деформации упругих элементов конструкции (УЭК) МКА;
 - функционирования бортовых измерительных систем (инерциальных, магнитных, оптических) и бортовых исполнительных органов СУДН

МКА с учетом условий их функционирования в космическом пространстве;

- работы специального программного обеспечения и вычислительных устройств в составе СУДН МКА;

- 3) моделирование получения СУДН команд от БКУ и наземного сегмента управления МКА, а также формирования и выдачи телеметрической информации в БКУ;
- 4) моделирование возникновения НШС в аппаратуре СУДН и моделирование процессов выполнения программ по парированию таких НШС;
- 5) обеспечивать оператору средства запуска и завершения процессов моделирования, средства контроля хода моделирования, а также сохранение и первичную обработку результатов моделирования с возможностью прерывания и возобновления процесса моделирования.

Типовыми ситуациями эксплуатации МКА, для которых АПК должен обеспечивать моделирование, являются:

- отделение МКА от ракеты космического назначения (РКН);
- предварительное успокоение после отделения МС от РКН;
- режим ориентации МКА на Солнце;
- режим инерциальной программной трехосной ориентации МКА в инерциальной системе координат;
- режим инерциальной программной трехосной ориентации МКА в орбитальной системе координат;
- режим программной ориентации МКА при выполнении целевых работ;
- режим поддержания трехосной ориентации при работе двигательной установки МКА;
- перевод МКА из одного заданного режима ориентации в другой.

3. Особенности разработки модульной структуры АПК и обеспечение работы его натуральных элементов в режиме реального времени

Основной трудностью, возникающей при создании АПК ПНМ СУДН МКА, является обеспечение работы натуральных элементов СУДН в составе АПК в режиме реального времени, что необходимо для точного воспроизведения условий их работы при проведении испытаний. Однако современная вычислительная техника общего назначения настолько опережает по производительности вычислений типичные

элементы СУДН МКА, что становится возможным даже с использованием общедоступных аппаратных и программных средств создавать полностью функциональные АПК для отработки процесса функционирования СУДН.

Архитектура построения специального программного обеспечения АПК ПНМ СУДН обычно выполняется модульной, как, например, в программном комплексе *MicrosatelliteModeler*, описанном в [2]. При этом модульный принцип может быть развит в такой степени, что замена части состава или алгоритмов работы испытуемого оборудования потребует изменения только отдельных модулей системы. Такое модульное построение аппаратного и, особенно, программного обеспечения способно обеспечить значительные преимущества при доработках АПК для применения с новыми МКА или с доработанными СУДН. Экономия при этом происходит не только за счет уменьшения объема программирования, но и за счет существенного снижения объема тестирования АПК после проведенной доработки, так как модульность дает существенные гарантии того, что те модули, которые не подвергались изменениям при очередной доработке, и после ее завершения будут функционировать правильно [3]. В нашей стране на этих принципах проводятся работы по созданию полностью универсальных систем для создания комплексов численного и полунатурного моделирования [4], однако, как известно, высокая степень универсальности системы обуславливает трудности при ее наладке применении в конкретной области, которые по затратам времени могут быть сопоставимы с созданием специализированного программного обеспечения [3]. В связи с этим создание специализированных, но обладающих широкими возможностями настройки АПК ПНМ СУДН остается актуальным вопросом развития ракетно-космической техники.

На рисунке 1 представлена возможная схема моделирования работы СУДН на одном шаге по времени специальным программным обеспечением АПК. Стрелками на схеме показана очередность передачи результатов соответствующих этапов моделирования. Каждая из представленных прямоугольниками на схеме частных моделей, выполняемых в виде отдельных модулей, может быть заменена соответствующим натурным прибором, подключенным к другим натурным устройствам в составе АПК штатным способом, а к стендовой аппаратуре АПК – с помощью соответствующих специальных программно-аппаратных средств, имитирующих поведение окружающей среды и обеспечивающих совместимость используемых интерфейсов.

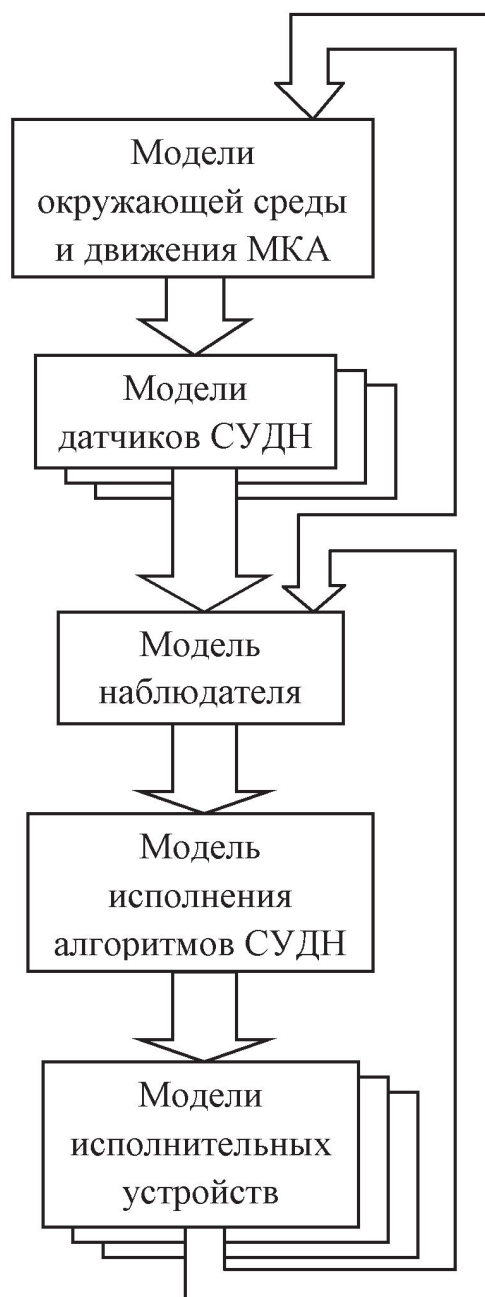


Рис. 1. Схема моделирования работы СУДН на шаге по времени.

Основным способом обеспечения надежного разделения модулей программного обеспечения, позволяющего проводить их доработку независимо, является определение четких списков входных и выходных данных, получаемых и выдаваемых соответствующими модулями программного или аппаратно-программного обеспечения. Обычно эти модули оформляются в виде соответствующих функций или процедур. При этом входные и выходные данные модуля должны быть такими, чтобы при его доработке или, например, при замене программной эмуляции

соответствующего элемента СУДН на реальный прибор, это не требовало обязательного внесения изменений в остальную часть аппаратных и программных средств АПК.

Как уже было отмечено, общедоступные вычислительные средства на базе операционных систем семейства Windows являются асинхронными, поэтому достаточно сложным вопросом является обеспечение работы натуральных средств СУДН, используемых в составе АПК, в реальном времени. Основным средством для обеспечения такой работы, на наш взгляд, является обязательное отслеживание задержек как по реальному времени при собственно вычислительном процессе, так и по виртуальному времени в моделируемой системе. Задержки по времени в асинхронной операционной системе даже при повторяющихся вычислениях могут быть различными, поэтому они должны отслеживаться с помощью системного времени. Задержки по виртуальному времени в моделируемой системе в натуральных элементах АПК будут равны реальным, а при программной эмуляции элементов, как правило, будут существенно выше, чем реальные затраты времени за счет высокой производительности используемой вычислительной техники. Это позволяет, используя соответствующие задержки при передаче сигналов в натурные элементы, организовать работу натуральных элементов СУДН в реальном времени даже с использованием асинхронной операционной системы. Поэтому данные о времени должны быть обязательны практически во всех интерфейсах между модулями программного обеспечения АПК.

Еще одним видом данных, передаваемых между модулями должны являться данные о режиме работы соответствующего модуля, что необходимо для организации проведения испытаний работы СУДН в условиях возникновения различных нештатных ситуаций, которые можно моделировать, изменяя режим работы соответствующих модулей, в том числе и функций, взаимодействующих с натурными элементами СУДН.

Также в связи с воздействием на аппаратуру СУДН МКА в условиях реальной эксплуатации космического излучения интерфейс модулей должен предусматривать моделирование ситуаций кратковременных сбоев в работе соответствующей аппаратуры, заключающихся, например, в отсутствии или неправильном формате поступившего с какого-либо датчика сигнала. При этом, так как для моделирования сам по себе формат сигнала обычно не имеет существенного значения, это может быть реализовано, например, отдельной передачей измеренной датчиком величины и логического значения, сообщающего последующим модулям о том, что измерение не проведено и само передаваемое значение величины является условным. Это относится

именно к случаю, когда измерение совсем не проводится, выбросы же в измерениях и наличие разного рода погрешностей можно имитировать, внося соответствующие случайные поправки в значение самой измеренной величины.

Важным преимуществом модульного подхода является возможность постепенной замены программных эмуляторов соответствующих элементов СУДН на их отработочные макеты и, в некоторых случаях, на натурные приборы. При этом, однако, необходимо наличие или разработка специальных аппаратных средств, позволяющих организовать обратную связь в системе через натурные датчики. Такими средствами могут быть, в частности: средства проецирования модели звездного неба в поле зрения звездных датчиков, магнитные рамки для имитации магнитного поля Земли [5], подвес спутника для обеспечения его свободного вращения по одной или нескольким осям [6] и другие. Не смотря на сложность их создания, использование таких средств позволяет значительно увеличить эффективность АПК ПНМ для наземной отработки СУДН, так как принципиально позволяет испытывать работу СУДН даже в полностью смонтированном на готовом аппарате виде. Причем возможность такой отработки характерна именно для МКА, так как создание АПК для обеспечения свободного вращения более крупных космических аппаратов, особенно в полетной конфигурации, представляет собой намного более сложную научную и инженерную задачу.

4. Особенности разработки пользовательского интерфейса АПК ПНМ СУДН

Еще одним аспектом, обязательным для обеспечения эффективной работы АПК ПНМ СУДН является создание достаточно информативного и интуитивно понятного пользовательского интерфейса. Его также по возможности следует делать модульным, чтобы при радикальной переработке или замене какого-либо модуля АПК нужно было бы вносить изменения только в ту часть интерфейса, которая связана непосредственно с ним, а общие параметры работы системы, как и настройка варьируемых параметров различных модулей должны оставаться неизменными. В целом интерфейс желательно изначально создавать с таким расчетом, чтобы его доработка не потребовалась, по крайней мере, в пределах жизненного цикла одного МКА. По возможности следует избегать необходимости выполнения сложной ручной обработки полученных на АПК данных, даже с применением общедоступных программных средств, так как это внесет дополнительный источник ошибок и задержек в процесс испытаний и, кроме того, потребует отвлечения дорогостоящего квалифицированного персонала на выполнение

достаточно рутинной работы. В этом плане при разработке таких комплексов полезно использовать принципы и наработки в области интуитивно понятного отображения информации, используемые при создании программного обеспечения центров управления полетами. Кроме того, при отработке СУДН могут использоваться специальные виды интерфейсов, например, отображение небесной сферы (с Землей, Луной и Солнцем), видимой из точки, в которой находится МКА с указанием областей видимости и областей возможной засветки Солнцем и другими небесными телами его датчиков и целевой аппаратуры (рисунок 2). Применение такой формы графического отображения информации позволяет наглядно показать влияние положения небесных тел на процессы работы датчиков СУДН и целевой аппаратуры МКА.

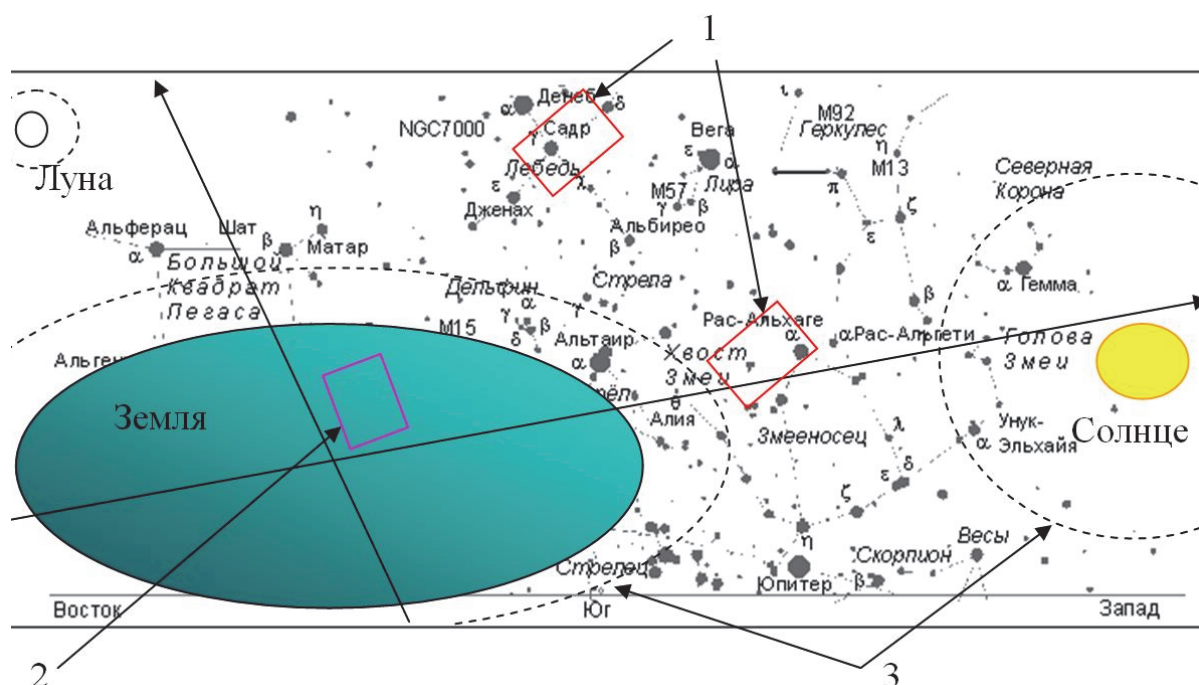


Рис. 2. Эскиз варианта графического отображения полей зрения датчиков и целевой аппаратуры МКА:

1 - поля зрения звездных приборов; 2 - поле зрения целевой аппаратуры; 3 - участки небесной сферы, на которых возможна засветка звездных приборов Солнцем, Землей и Луной (с учетом переотражения от солнечных и других элементов МКА).

5. Ограничения универсальности перспективных АПК ПНМ СУДН

Наряду с упомянутыми выше возможностями унификации АПК ПНМ СУДН, анализ показал, что излишняя универсальность таких АПК может привести к их

неоправданному удорожанию и существенному усложнению процедур его настройки. Для рационального проектирования АПК необходимо в явном виде задавать ограничения и допущения, принимаемые на соответствующем этапе создания или доработки АПК. Типичными здесь могут быть следующие ограничения:

1. Для моделирования операций, связанных с быстрым изменением частот и форм упругих элементов конструкции МКА (раскрытие складных элементов, поворот антенн) в каждом конкретном случае будет необходима разработка дополнительных программных модулей для моделирования динамики движения этих элементов и их влияния на текущие параметры математической модели движения МКА, так как моделирование такого рода динамических процессов само по себе является сложной научно-технической задачей.

2. Точность моделирования работы СУДН будет ограничена погрешностями применяемых математических моделей (магнитного и гравитационного полей околоземного пространства, модели подстилающей поверхности, моделей подсистем МКА) и неопределенностью исходных данных по реальному состоянию МКА, что ограничит, в частности, время достоверного планирования целевого применения.

3. Моделирование АПК процессов функционирования систем МКА, не относящихся к СУДН, осуществляется программно и только в части касающейся взаимодействия соответствующих устройств и систем с СУДН. Более подробное, в том числе полунатурное, моделирование БКУ, комплекса целевой аппаратуры, системы обеспечения теплового режима и других систем МКА может быть осуществлено путем замены соответствующих программных модулей, моделирующих функционирование этих систем и устройств, на интерфейсные модули, обеспечивающие связь АПК ПНМ СУДН со средствами, специально предназначенными для моделирования соответствующих систем МКА.

4. В интерфейсе АПК должна быть предусмотрена возможность моделирования функционирования СУДН в каждом из режимов, указанных в техническом задании на соответствующий МКА. При этом для введения новых режимов на последующих этапах работ может потребоваться добавление новых программных модулей к расчетной и интерфейсной частям программного обеспечения АПК, что позволит обеспечить как достаточную эффективность вычислительных процессов, так и высокую информативность специализированного интерфейса оператора.

5. В силу уникальности процессов функционирования различных устройств, при изменении состава систем МКА может требоваться создание программных модулей, обеспечивающих реализацию соответствующих математических моделей работы устройств, предоставляемых их разработчиками.

6. Область применения АПК ПНМ СУДН по высотам орбит и использованию для моделирования применения МКА за пределами сферы действия Земли определяется используемыми моделями окружающей среды (по магнитным, гравитационным полям, положению и перечню небесных тел, видимых звездными приборами и комплексом целевой аппаратуры, и других) и может быть изменена путем замены соответствующих модулей.

7. АПК ПНМ СУДН не обеспечивает учет деформаций конструкции МКА за счет перепадов температур, длительного воздействия космических лучей и деградации конструкционных материалов. В случае необходимости соответствующие поправки могут быть внесены в исходные данные заранее, в частности, при задании погрешностей соответствующих величин. В случае необходимости более точного учета каких-либо из перечисленных явлений, необходимо создание соответствующих математических моделей и расчетных модулей, но учет этих параметров сильно зависит от конкретной конструкции МКА и потребует дальнейшей научной проработки.

6. Заключение

На основании приведенных в данной статье материалов можно сделать вывод о том, что современный уровень вычислительной техники общего назначения позволяет создавать с ее помощью эффективные АПК ПНМ для отработки СУДН МКА, позволяющие за счет модульности исполнения достичь высокой эффективности их использования на различных этапах создания МКА. Кроме того, такие АПК также могут использоваться для планирования целевой деятельности МКА – например, при отработке действий СУДН находящегося на орбите аппарата перед какой-либо ответственной операцией, а также при диагностике и расследовании причин различных неполадок, возникающих на борту МКА. Это делает модульные АПК ПНМ СУДН эффективным инструментом не только при создании, но и при эксплуатации МКА. Также модульность позволяет существенно снизить затраты на доработку АПК для использования с новыми типами МКА, что в сочетании с использованием вычислительной техники общего назначения и все более широким использованием

МКА делает возможной в перспективе разработку универсальных программных инструментов для создания перспективных АПК ПНМ СУДН.

Список литературы

1. Федеральная космическая программа России на 2006 - 2015 годы. Основные положения. (Полный вариант Основных положений ФКП для открытого опубликования на веб-сайте Роскосмоса) // FEDERALSPACE.ru сайт Федерального космического агентства (Роскосмоса), 2005. http://www.federalspace.ru/download/fkp_2015_for_site.doc (дата обращения: 12.10.2011).
2. Карпенко С.О., Овчинников М.Ю. Лабораторный стенд для полунатурной отработки систем ориентации микро- и наноспутников. (Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2008, №38).
3. Duvall, Pall, Steve Matyas, and Andrew Glover. Continuous Integration: Improving Software Quality and Reducing Risk, Addison-Wesley, 2007.
4. Иванов Д.В. Технология разработки программного обеспечения встроенных систем // RUSYS.ru сайт ОАО «Корпорация «Русские системы», 2008. <http://www.rusys.ru/index.phtml-aid=50050639.htm> (дата обращения: 12.10.2011).
5. Овчинников М.Ю., Цветков Е.А. Проектирование имитатора геомагнитного поля в составе лабораторного стенда для отработки способов управления ориентацией микроспутников. Москва. (Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2005, №55).
6. Прилепский И.В. Исследование динамики спутника с магнитной системой ориентации на струнном подвесе // Труды 3-го совещания «Управление движением малогабаритных спутников». – М.; 2007. – С. 13-16.