

Средства экспериментальной обработки задач сближения и стыковки космических аппаратов для технического обслуживания и ремонта в космосе

А. В. Бережков, Р. В. Бессонов

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: anton.iki@mail.ru

В статье в краткой форме дана ретроспектива решения задач сближения и стыковки космических аппаратов в целях технического обслуживания, таких как миссии американских Space Shuttle. Дается обоснование отхода от традиционных в российской космической отрасли радиотехнических систем стыковки типа «Курс» в пользу создания отечественных оптических систем для решения задач сближения и стыковки космических аппаратов с целью технического обслуживания и ремонта в космосе. Приводится обоснование экспериментальной обработки элементов систем относительной навигации и стыковки (СОНС). Рассматриваются примеры мировой практики по созданию технологического оборудования по обработке СОНС на примере проектов Mission Extension Vehicle и Inveritas. Приводится структура отечественного автоматизированного стенда, краткое описание его составных частей: имитатора космического пространства, имитатора Солнца, имитаторов обслуживаемого и сервисного космических аппаратов, систем управления движением с приводами. Приводится описание принципов работы и логика взаимодействия его основных технических элементов и программного комплекса. Рассматриваются некоторые нюансы работы с трёхмерными образами космических аппаратов и программ визуализации. В заключении обсуждается перспектива развития стенда для обработки похожих задач, использующих относительную навигацию.

Ключевые слова: стыковка, относительная навигация, техническое обслуживание в космосе, ремонт в космосе, видеокамера, ToF-камера, лазерный дальномер

Одобрена к печати: 13.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-103-110

Введение

Практически с начала освоения человеком космоса возникли задачи по обеспечению стыковки космических аппаратов на орбите Земли. В основном это были опыты по стыковке в интересах пилотируемой космонавтики, которые в итоге превратились в достаточно обыденные операции на орбите. В начале 1980-х гг., с созданием американцами системы «Спейс шаттл» (*англ.* Space Shuttle), появилась возможность технического обслуживания орбитальных аппаратов. Было проведено множество миссий, в которых экипажи шаттлов сближались с космическими аппаратами (КА), захватывали их и проводили техническое обслуживание и ремонт. Самый знаменитый КА, с которым пришлось неоднократно работать американцам, это, пожалуй, космический телескоп имени Эдвина Хаббла (*англ.* Hubble Space Telescope). Благодаря этим миссиям телескоп успешно функционирует по сей день на протяжении уже более тридцати лет. Тем не менее шаттлы оказались дорогими в обслуживании, и, как следствие, их многочисленные полёты стали чрезмерно дорогостоящими. Понятно, что использование шаттлов в коммерческих миссиях по сервисному обслуживанию КА не представляло какой-либо выгоды. Тогда стало очевидно, что необходимо развивать автоматические аппараты, которые могли бы самостоятельно или с минимальной поддержкой с Земли выполнять сервисное обслуживание коммерческих аппаратов.

К этому моменту уже сложилось понимание по основным типам выполняемых сервисных операций, к которым можно отнести ремонт, заправку, буксировку, обследование, очистку от космического мусора и др.

Для выполнения сервисной задачи КА прежде всего надо сблизиться друг с другом. Обычно сближение разбито на два этапа. Первый — это выведение сервисного космического

аппарата (СКА) в окрестность обслуживаемого космического аппарата (ОКА), сопряжённое с изменением начальной орбиты СКА. Второй — это непосредственное сближение двух КА с использованием систем относительной навигации.

Исторически в СССР и, как следствие, в российских комических системах сближения используются радиотехнические средства. Примером такой системы служит «Курс-НА», используемый на космических кораблях «Союз-МС» и «Прогресс-МС». Несмотря на длительный срок развития подобных систем, они по-прежнему остаются довольно громоздкими и потребляют значительную мощность. А при использовании «Курса» при стыковке с Международной космической станцией выявилась и ещё одна неприятная особенность — это ложные отражения сигнала из-за сложной конструкции станции, вызывающие сбои в работе системы стыковки. Всё это послужило толчком к разработке систем относительной навигации, основанных на других принципах. Один из возможных вариантов — это системы на основе видеокамер с использованием распознавания образов КА и определения его относительных координат. Данные системы имеют малые габариты и незначительное (по сравнению с радиосистемами) потребление энергии. В настоящее время за рубежом использование видеосистем для целей сближения и стыковки КА становится типовым решением и уже применяется на практике как в пилотируемой космонавтике (космические корабли «Дрэгон» (*англ.* Dragon)), так и в сервисных миссиях (аппараты MEV-1 и MEV-2 (*англ.* Mission Extension Vehicle)). В России создание подобных систем находится на стадии научно-исследовательских работ (НИР), в ходе которых уже определены основные архитектурные решения, состав приборов и алгоритмов распознавания. Так, в рамках составной части НИР (СЧ НИР) «Астролябия» был определён облик системы сближения, использующей широкоугольную и узкоугольную телевизионные камеры (ШТК и УТК), ToF-камеры (*англ.* Time-Of-Flight) и лазерный дальномер (ЛД). Были проработаны алгоритмы распознавания и оценена их точность с применением математического моделирования. Использование ToF-систем в настоящее время представляется перспективным направлением для создания высокопроизводительных систем распознавания формы целевых объектов. В России к настоящему времени отсутствует какой-либо значительный опыт использования ToF-камер в области космического приборостроения и требуется проведение исследовательских работ по адаптации данной технологии в задачах относительной навигации КА.

Экспериментальная отработка

Как правило, перед отработкой сложной системы в железе она проходит стадию расчётов и математического моделирования. На этом этапе можно оценить поведение системы в заданных режимах и выявить многие потенциальные проблемы. Однако как бы тщательно ни задавалась математическая модель, она всё же будет иметь некоторые отличия от реальной системы. В нашем случае необходимо распознать образ КА, определив ключевые элементы конструкции, и произвести расчёты, определяющие радиус-вектор на целевой КА и его относительную ориентацию. Для математического моделирования подобного процесса нам понадобятся средства, синтезирующие 3D-образ КА с учётом оптических свойств материалов, его конструкции и воздействия внешних источников света. Также при математическом моделировании необходимо учитывать оптические характеристики используемых видеокамер. При том что в настоящее время существует значительное количество программных средств (в том числе и бесплатных) для 3D-моделирования, создание математической модели в них будет лишь некоторым приближением к реальности. Существенным фактором, определяющим необходимость экспериментальной отработки создаваемой СОНС, выступает также исследование информационных возможностей ToF-камеры, надёжные модели которой в настоящее время отсутствуют.

Создание экспериментальной базы

Подход к созданию средств наземной экспериментальной отработки с использованием оптических инструментов может варьироваться в зависимости от поставленных задач. Рассмотрим различные системы экспериментальной отработки элементов стыковки, используемые в США и Европе.

В США для отработки миссии MEV-1 использовался специализированный стенд, состоящий из пары роботизированных манипуляторов, размещённых на линейных приводах.

Такое техническое решение имеет свои преимущества и недостатки. К преимуществам можно отнести простоту конструкции и лёгкость в управлении, к недостаткам — ограниченность перемещений при отработке манёвров сближения макетов космических аппаратов и дороговизна промышленных манипуляторов.

В Европе был реализован проект Inveritas с участием компаний EADS Astrium, Jena-Optronik и Робототехнического инновационного центра (*англ.* Robotics Innovation Center — RIC) Немецкого исследовательского центра искусственного интеллекта в Бремене (*англ.* German Research Center for Artificial Intelligence, *нем.* Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz — DFKI). Основной целью была отработка базовых технологий сближения и захвата КА на орбите с целью технического обслуживания и заправки.

Разработанная система включает в себя:

- стационарный роботизированный манипулятор, который обеспечивает имитацию движения макета обслуживаемого КА;
- подсистему динамического перемещения макета сервисного КА на тросовом подвесе;
- имитатор Солнца;
- рабочее место оператора.

Европейская система проекта Inveritas имеет ряд преимуществ, заключающихся в следующем:

- отработанная технология (применяется для теле- и киносъёмочной аппаратуры — системы Spidercam);
- лёгкая масштабируемость — есть системы как для маленьких помещений, так и для больших;
- возможность перемещения в трёхмерном пространстве.

К недостаткам можно отнести невозможность оперировать полноразмерными макетами космических аппаратов.

Из рассмотренных примеров наиболее перспективной для проведения исследований в части функционирования оборудования относительной навигации представляется система проекта Inveritas. Подобная система использовалась для отработки относительной навигации не только типа «КА — КА», но и «КА — поверхность», что в перспективе даёт возможность отработки научных миссий с посадкой на малые небесные тела (таких как миссия OSIRIS-REx (*англ.* Origins Spectral Interpretation Resource Identification Security Regolith Explorer)).

Исходя из выбранного подхода и решаемых задач по моделированию процесса относительной навигации был разработан проект специализированного рабочего места отработки относительной навигации и стыковки (СРМ ОНС).

В состав стенда СРМ ОНС вошли:

- имитатор космического пространства (рама со светопоглощающим покрытием);
- имитатор обслуживаемого космического аппарата (ИОКА);
- поворотный привод ОКА;
- имитатор Солнца с поворотным и линейным приводом;
- система приводов тросового перемещения макета имитатора сервисного космического аппарата (ИСКА);
- ИСКА в составе:
 - широкоугольной камеры,

- узкоугольной камеры,
- ToF-камеры,
- лазерного дальномера,
- модуля управления;
- поворотный привод ИСКА;
- система управления (управляющий и обрабатывающий компьютеры).

Структура стенда

На рис. 1 приведена структурная схема, отражающая взаимосвязи всех функциональных элементов стенда СРМ ОНС.

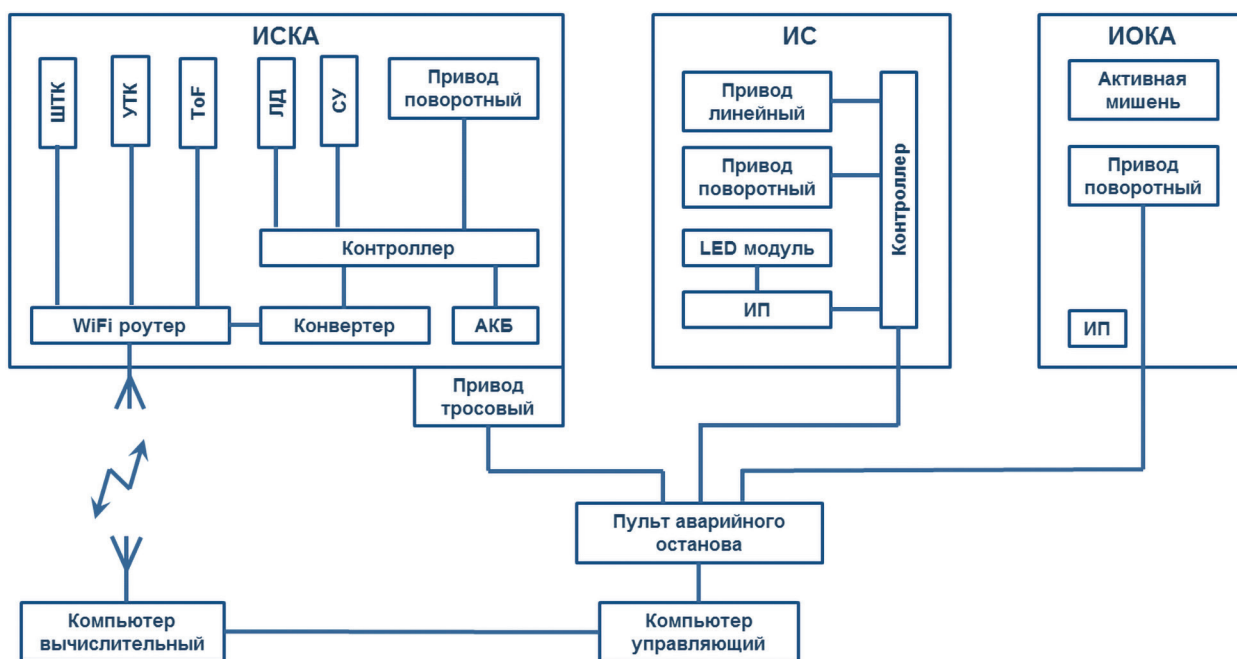


Рис. 1. Структурная схема стенда СРМ ОНС

ИСКА представляет собой автономный приборный видеокомплекс, содержащий в своём составе: набор измерительных видеокамер, в том числе и ToF-камеру, лазерный дальномер, набор вспомогательных модулей. Передача видеоданных, данных измерений и управляющих команд выполняется посредством высокопроизводительного WiFi-роутера. Локальное управление поворотным приводом осуществляет контроллер ИСКА, в функции которого входят также синхронизация съёмки и измерений приборов и контроль состояния АКБ (аккумуляторная кислотная батарея).

Перемещение ИСКА в трёхмерном пространстве осуществляется при помощи тросового привода, состоящего из четырёх лебёдок.

Имитатор Солнца (ИС) состоит из светодиодного модуля с фокусирующей оптикой, приводов и управляющего контроллера. Светодиодный модуль содержит два независимых канала, линзы которых имеют разную степень фокусировки луча, что совместно с независимой регулировкой яркости даёт возможность корректно формировать световой поток при имитации разных углов освещения, используя только одну плоскость перемещения источника света. Управление поворотом и перемещением ИС осуществляется с помощью контроллера ИС, который выдаёт необходимые сигналы на четыре шаговых сервопривода.

ИОКА представляет собой масштабную модель КА и имеет поворотный привод по двум осям.

Компьютер вычислительный осуществляет программную имитацию работы СКА на основе данных с камер и математической модели окружающей обстановки.

Компьютер управляющий выполняет функции управления положением элементов стенда в зависимости от математической модели окружающей обстановки.

Управление приводами стенда осуществляется через пульт аварийного останова, в задачу которого входит блокировка работы механизмов при возникновении аварии в оборудовании.

Программное обеспечение

На рис. 2 приведена структурная схема программного обеспечения (ПО) стенда СРМ ОНС.

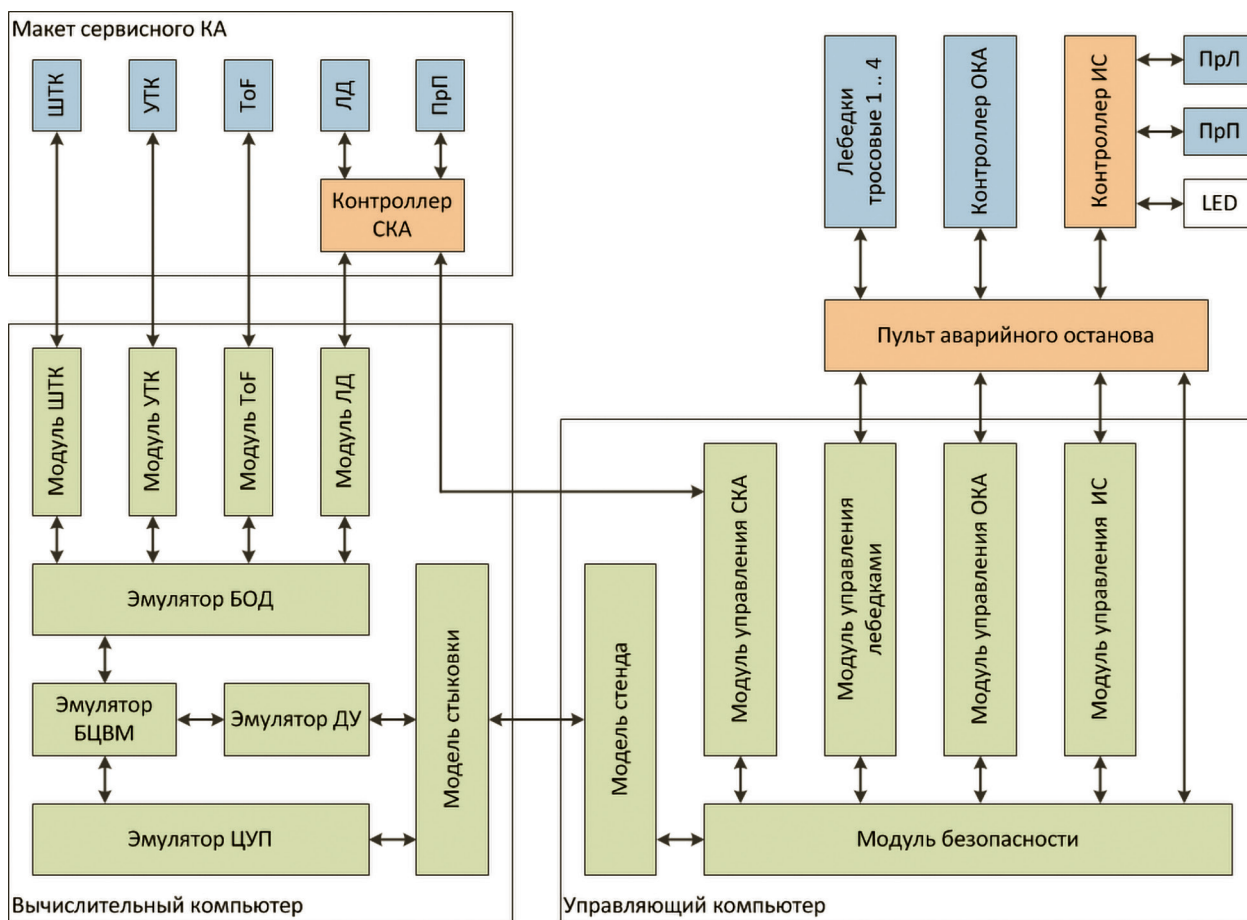


Рис. 2. Структурная схема ПО стенда СРМ ОНС

ПО контроллера СКА выполняет функции управления работой элементов ИСКА и осуществляет контроль состояния батареи.

ПО пульта аварийного останова отслеживает наличие аварийных сигналов от исполнительного оборудования и блокирует его работу в случае аварии.

ПО контроллера имитатора Солнца управляет работой приводов и светодиодного излучателя.

Модули ШТК, УТК, ToF, ЛД обеспечивают настройку функционирования и получение данных с соответствующих блоков ИСКА и передачу информации в эмулятор блока обработки данных (БОД).

Эмулятор БОД выполняет основную задачу по навигации. В нём работает главное функциональное ПО, которое распознаёт образ КА и выдаёт рассчитанный радиус-вектор на целевой КА.

Эмулятор БЦВМ (бортовая цифровая вычислительная машина) выполняет роль контроллера КА, на котором выполняется алгоритм стыковки.

Эмулятор ЦУП (центр управления полётами) выполняет выдачу на эмуляторе БЦВМ высокоуровневых команд типа «начать стыковку», «останов», «продолжить», «отстыковка» и т. п.

Эмулятор двигательной установки представляет собой программную заглушку и выдаёт параметры перемещения аппарата без учёта работы реальной двигательной установки. В будущем с помощью этого модуля можно будет эмулировать работу двигательной установки реального КА.

Модель стыковки — модуль, формирующий математическую модель положения КА, Солнца, Земли, Луны, звёзд и визуализацию данной модели.

Модуль модели стенда осуществляет преобразование положения объектов модели стыковки в параметры положения элементов стенда с учётом его механической модели.

Модуль безопасности выполняет контроль положения элементов схемы с целью предотвращения различных коллизий.

Модуль управления СКА обеспечивает передачу управляющих команд на приводе сервисного КА.

Модуль управления лебёдками обеспечивает передачу управляющих команд лебёдки привода сервисного КА.

Модуль управления ОКА обеспечивает передачу управляющих команд на приводе обслуживаемого КА.

Модуль управления ИС обеспечивает передачу управляющих команд на приводе имитатора Солнца.

Конструкция СРМ ОНС

На *рис. 3* приведена 3D-модель стенда СРМ ОНС.

В основе стенда лежит несущая рама из конструкционного профиля. Наверху располагаются четыре лебёдки, на тросах которых подвешен имитатор сервисного КА.

В верхней части находится имитатор Солнца с приводами.

Имитатор обслуживаемого КА располагается на опоре слева.

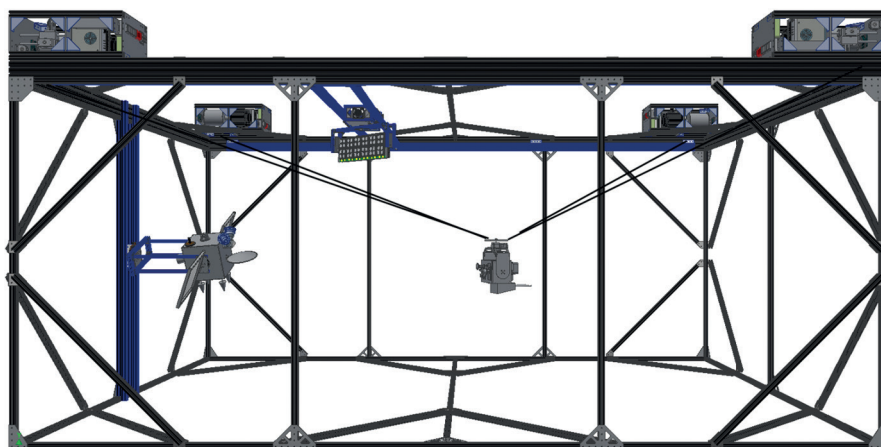


Рис. 3. 3D-модель стенда СРМ ОНС

Имитатор Солнца

На *рис. 4* (см. с. 109) приведена 3D-модель ИС.

Линейный привод ИС представляет собой четыре направляющие с каретками, обеспечивающие перемещение в горизонтальные плоскости при помощи шаговых сервоприводов.



Рис. 4. 3D-модель ИС

Поворотный привод ИС интегрирован с приборным блоком и осуществляет поворот светодиодного модуля по рысканью и тангажу.

В приборном блоке ИС размещены контроллер ИС, источники питания и средства коммутации.

Имитатор сервисного космического аппарата

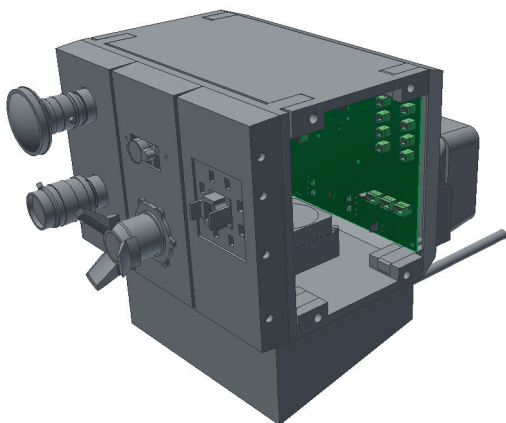


Рис. 5. 3D-модель ИСКА

На рис. 5 приведена 3D-модель ИСКА.

ИСКА представляет собой приборный модуль, содержащий набор видеокамер, размещённых на сменных панелях, что даёт возможность подбирать оптимальную конфигурацию для различных конструкций типовых КА. Поворот ИСКА по рысканью и тангажу осуществляется специализированным приводом на BLDC-моторах (*англ.* brushless DC electric motor) с интегрированными энкодерами. Перемещение в пространстве, имитирующее траекторию сближения КА, выполняется при помощи тросового привода, состоящего из четырёх лебёдок, за счёт регулировки выпуска троса каждой из них.

Имитатор обслуживаемого космического аппарата

На рис. 6 приведена 3D-модель ИОКА.

ИОКА представляет собой масштабную модель КА, несущего на своей поверхности типовые внешние элементы, такие как солнечные батареи, ЭВТИ (экранно-вакуумная теплоизоляция), антенны, приборы ориентации, элементы двигательных установок, мишени, радиаторы и т. д. Конструкция ИОКА предполагает возможность изменения конфигурации внешних элементов, что очень важно для проверки устойчивой работы алгоритмов распознавания образов КА с разнообразными поверхностями (например, глянцевая или матовая ЭВТИ).

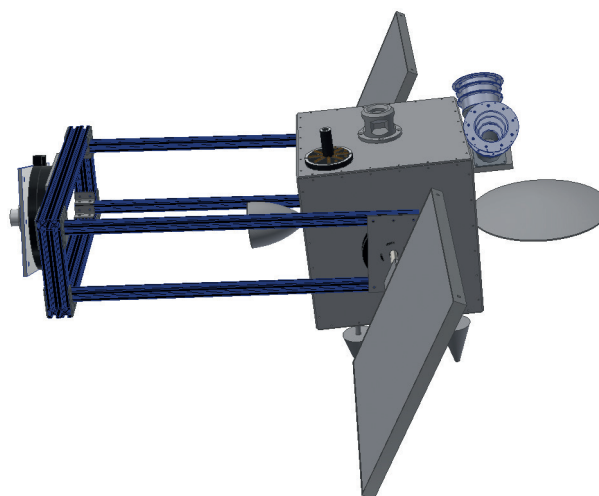


Рис. 6. 3D-модель ИОКА

Вращение ИОКА осуществляется по двум осям: крену и тангажу. В поворотном приводе используются BLDC-моторы с интегрированными энкодерами.

Заключение

Разработанный стенд СРМ ОНС имеет достаточный набор средств для успешной отработки технических решений оптических систем относительной навигации КА.

Универсальность конструкции и возможности по модернизации стенда открывают перспективы использования его в схожих задачах, таких как безопасная посадка, навигация по поверхности и др.

Means of experimental testing of spacecraft rendezvous and docking tasks for maintenance and repair in space

A. V. Berezhkov, R. V. Bessonov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: anton.iki@mail.ru

The article briefly gives a retrospective of the emergence of the tasks of rendezvous and docking of spacecraft for maintenance purposes, such as the missions of the American Space Shuttle. The rationale for the departure from the traditional in the Russian space industry radio-technical docking systems of the Course type in favor of creating domestic optical systems for solving the problems of rendezvous and docking of spacecraft for maintenance and repair in space is presented. The substantiation of the experimental development of elements of relative navigation and docking systems (RNDS) is given. Examples of world practice on the creation of technological equipment for the development of RNDS are considered on the example of the Mission Extension Vehicle and Inveritas projects. The structure of the domestic automated stand is given with a brief description of its components: a space simulator, a Sun simulator, simulators of serviced and service spacecraft, motion control systems with drives. The principles of operation and the logic of interaction of its main technical elements and the software package are described. Some nuances of working with three-dimensional images of spacecraft and visualization programs are considered. In conclusion, the prospect of developing a stand for working out similar tasks using relative navigation is given.

Keywords: docking, relative navigation, space maintenance, space repairs, video camera, ToF camera, laser range finder

Accepted: 13.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-103-110