

ОБЛАЧНАЯ ПЛАТФОРМА IWEBSIM КАК СРЕДСТВО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ¹

А.Н. Балухто (Королев), Б.В. Соколов, О.В. Карсаев (Санкт-Петербург)

Введение

Имитационное моделирование сложных динамических систем (СДС), к классу которых относятся и космические системы, является одной из важных составляющих современных технологий цифровой трансформации космической индустрии.

В этой связи следует отметить, что сегодня на смену традиционным подходам к проектированию космических систем (КС), комплексов и их компонентов приходит новый подход, в основе которого лежит создание так называемых «цифровых двойников» (Digital Twins) изделий и систем в целом.

Цифровые двойники в упрощенном их понимании (как компьютерных моделей соответствующих объектов и систем) в космической отрасли используются уже ни один десяток лет. Однако со временем концепция цифрового представления изделия (системы) постоянно развивалась, а сам термин «цифровой двойник» (ЦД) появился лишь в начале 2000-х годов.

Сегодня понятие «цифровой двойник» интерпретируется как единая виртуальная модель, достоверно описывающая все характеристики, процессы и взаимосвязи как для отдельного объекта, так и для всего производства. Формирование такой модели начинается на самых ранних этапах создания изделий (систем) и дорабатывается (уточняется) на всех последующих этапах их жизненного цикла.

Имеющийся мировой опыт применения ЦД в различных отраслях промышленности [1] дает основание утверждать, что практическое применение ЦД в ракетно-космической промышленности позволит существенно сократить сроки и стоимость создания космических систем и комплексов различного назначения, а также повысить эффективность их целевого применения. Это обусловлено многими факторами, в частности возможностью:

- отработки на самых ранних этапах проектирования космических средств основных технических решений с использованием компьютерных моделей, что позволяет значительно уменьшить число проектных ошибок, проявляемых при физической реализации указанных средств;

- замены некоторых натурных испытаний изделий или их компонентов виртуальными испытаниями (с использованием соответствующих виртуальных испытательных стендов);

- отработки, прогнозирования и упреждения различных ситуаций, в том числе нештатных, с использованием ЦД как на уровне отдельных космических аппаратов (КА), так и космической системы в целом.

Проектирование сложных систем, основанное на применении указанных выше моделей, часто именуется как «модельно-ориентированное проектирование» (МОП).

В рассматриваемой предметной области цифровые двойники, помимо всего прочего, должны обеспечивать многоуровневое моделирование космических систем, базирующееся на глубокой иерархической декомпозиции системы и задании ее семейством взаимосвязанных моделей, каждая из которых описывает поведение КС с точки зрения соответствующего уровня абстрагирования (каждый такой уровень характеризуется своими особенностями, законами и принципами, с помощью которых

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00989), Программы НТС Союзного государства «Интеграция-СГ» (проект «Интеграция-СГ-3.2.4.1») и в рамках бюджетной темы № 0073–2019–0004.

описывается поведение КС или ее компонентов на этом уровне). В частности, должно обеспечиваться моделирование:

- на уровне бортовых систем КА (служебных и целевых);
- на уровне отдельного КА как единого целого;
- на уровне частных процессов функционирования КС (моделирование процессов развертывания и восполнения орбитальной группировки (ОГ), целевого применения ОГ, управления баллистической конфигурацией ОГ, передачи данных по спутниковым каналам связи и др.);
- на уровне системы в целом.

Учитывая высокий уровень сложности процессов функционирования КС, особенно многоспутниковых, значительную роль в создании и применении ЦД играют технологии имитационного моделирования сложных динамических систем.

Важно также отметить, что имитационные модели могут использоваться в ряде случаев и для автоматической генерации обучающих выборок, необходимых для создания интеллектуальных систем космического назначения.

Сегодня существует достаточно широкий спектр программных средств, позволяющих создавать имитационные модели космических систем. Всех их можно разбить на две большие группы:

- программные средства (платформы) моделирования общецелевого назначения (такие как Simulink, GPSS Word, AnyLogic и др.);
- специализированные программные средства, ориентированные, главным образом, на моделирование космических систем и комплексов (STK, GMAT, FreeFlyer и др.).

Все они имеют свои достоинства и недостатки, подробный анализ которых приведен в работе [2]. В частности, в [2] справедливо отмечается наличие дефицита отечественных программных платформ, обеспечивающих эффективное имитационное моделирование КС различного назначения, а также их группировок, с приемлемой полнотой реализации принципа многоуровневого моделирования и с возможностью проведения широкого спектра различных имитационных экспериментов, в том числе оптимизационных.

В этой связи необходимо отметить, что с развитием современных информационных технологий появилась возможность эффективной реализации облачных решений в области создания программных средств имитационного моделирования сложных динамических систем.

Исходя из сказанного, в 2015 г. был создан первый отечественный программный комплекс имитационного моделирования СДС, реализованный на базе облачных технологий в виде веб-приложения и получивший название iWebsim (зарегистрирован в Реестре программного обеспечения РФ приказом Минкомсвязи России от 09.03.2017 №103, реестровый № 3025). Версия iWebsim 2.0 в настоящее время доступна для общего пользования в сети Интернет по адресу www.iwebsim.ru.

Дальнейшие исследования технологических решений, заложенных в основу создания данного программного комплекса, и его потенциальных функциональных возможностей показали, что на базе программной платформы iWebsim может весьма эффективно осуществляться также и моделирование космических систем (КС) различного назначения. Для этого достаточно создать необходимые библиотеки типовых компонентов (блоков), из которых в режиме визуального конструирования пользователи могут оперативно создавать модели космических систем, комплексов и их компонентов.

Ниже более подробно будут рассмотрены технологии имитационного моделирования, реализованные в iWebsim, и возможности по его развитию в интересах моделирования КС различного назначения.

Архитектура, технологии моделирования и функциональные возможности облачной платформы iWebsim

Достаточно детальное описание архитектуры программной платформы iWebsim, реализованных в ней технологиях моделирования, а также основных функциональных ее возможностях изложены в [3, 4], а также на официальном сайте www.iwebsim.ru. В интересах целостного восприятия материалов данной статьи кратко отметим лишь следующие основные положения в этой части.

iWebsim представляет собой кроссплатформенное веб-приложение, имеющее клиент-серверную архитектуру (рис. 1), в котором реализуется комплексный подход к имитационному моделированию динамических систем, базирующийся на принципах и методологии системной динамики, дискретно-событийного и агентного моделирования.

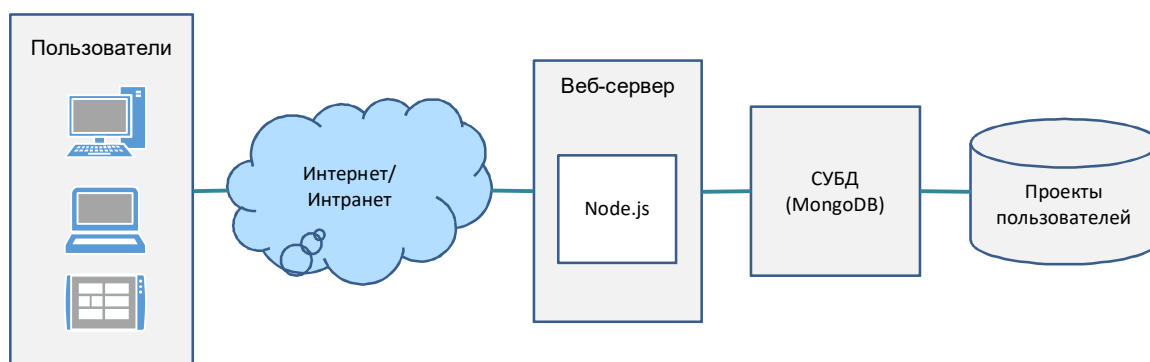


Рис. 1. Архитектурное построение iWebsim

Данная программа предоставляет пользователям среду разработки моделей динамических систем и все необходимые инструменты для проведения на их основе различных имитационных экспериментов.

Для работы с iWebsim на рабочем месте пользователя достаточно иметь современный веб-браузер, поддерживающий HTML5, и выход в Интернет (или Инtranet при установке iWebsim в локальной сети).

Пользователи iWebsim имеют возможность создавать свои проекты, сохранять их в базе данных и осуществлять на их основе различные имитационные эксперименты (включая простые имитационные эксперименты, оптимизационные эксперименты, статистические эксперименты и эксперименты по анализу чувствительности моделируемой системы к изменению тех или иных ее параметров).

Кроме того, пользователям предоставляется возможность публиковать созданные ими модели на любых сторонних сайтах и веб-приложениях с использованием API iWebsim.Publisher.

В рамках таких широко используемых на практике систем имитационного моделирования СДС, как Simulink, Anylogic и им подобных, используется подход к реализации дискретно-событийного моделирования, в основе которого лежит создание некоторой библиотеки типовых блоков, из которых могут создаваться модели различных дискретных динамических систем. Необходимость и достаточность предлагаемых в них наборов таких блоков определяется, главным образом, исходя из исторического опыта практического применения рассматриваемых технологий и некоторых эвристических соображений. Хотя для справедливости следует отметить, что указанные системы моделирования строятся на базе реализации открытой

архитектуры программных средств, что позволяет пользователям добавлять, при необходимости, свои библиотеки типовых блоков.

В iWebsim реализован другой подход к моделированию дискретных динамических систем, основанный на использовании формализма так называемых временных сетей Петри с приоритетами и ингибиторными дугами. В этой связи необходимо отметить, что, как показано в работе [5], класс сетей Петри с приоритетами (равно как и с ингибиторными дугами) по своим моделирующим возможностям равномогуществен классу машин Минского и Тьюринга, т.е. является универсально мощными.

Однако предложенная в iWebsim библиотека типовых блоков для моделирования дискретных динамических систем реализована таким образом, что ее применение не требует от пользователей каких-либо специальных знаний в области теории сетей Петри. При создании моделей с использованием указанной библиотеки пользователь оперирует такими базовыми понятиями как «событие» и «действие». При этом предполагается, что любое событие происходит мгновенно, а действие может быть протяженным во времени и иметь различные исходы.

Следует также еще раз подчеркнуть, что при разработке моделей конкретных СДС пользователи могут использовать все указанные выше технологии (дискретно-событийное моделирование, системная динамика, агентное моделирование) в комплексе.

Моделирование космических систем с использованием облачной платформы iWebsim

Опыт практического применения программной платформы iWebsim 2.0 для моделирования космических систем, в том числе многоспутниковых, показал, что для повышения оперативности разработки их имитационных моделей и снижения требований к соответствующей подготовке пользователей необходимо создание специализированной библиотеки компонентов (блоков), инкапсулирующих в себе основные знания о процессах функционирования рассматриваемого класса систем.

С целью апробации такого подхода в ходе проведенных исследований была разработана экспериментальная библиотека компонентов для моделирования космических систем оптико-электронного наблюдения (КС ОЭН). При этом, в основу создания таких компонентов была положена технология агентного моделирования. В состав стандартной библиотеки компонентов, используемой в iWebsim для агентного моделирования, дополнительно были введены следующие типы агентов:

- орбитальная группировка существующих КА ОЭН;
- проектируемая орбитальная группировка КА ОЭН;
- орбитальная группировка спутников-ретрансляторов;
- орбитальная многоспутниковая сеть передачи данных;
- группировка пунктов приема информации КА (существующих или планируемых к созданию);
- группировка произвольных объектов, которые могут входить в состав КС.

При этом предоставляется возможность моделирования многоспутниковых орбитальных группировок ДЗЗ, объединенных в единую сеть.

В качестве примера на рис. 2 приведены графические фрагменты имитационной модели КС ОЭН (с 3D-визуализацией), реализованной средствами программной платформы iWebsim на базе технологии агентного моделирования и упомянутой выше специальной библиотеки компонентов. В рамках этой модели все КА объединены в единую сеть с использованием межспутниковых каналов связи.

Комплексное тестирование указанной выше библиотеки (во взаимосвязи с другими библиотеками iWebsim) показало, что практическое ее использование

позволяет оперативно (во многих случаях в течение нескольких минут), в режиме визуального конструирования, создавать модели как существующих, так и проектируемых КС ОЭН. При этом пользователям предоставляется возможность оценки различных показателей эффективности функционирования КС ОЭН, в частности, таких как производительность, периодичность наблюдения, оперативность доставки информации и др.

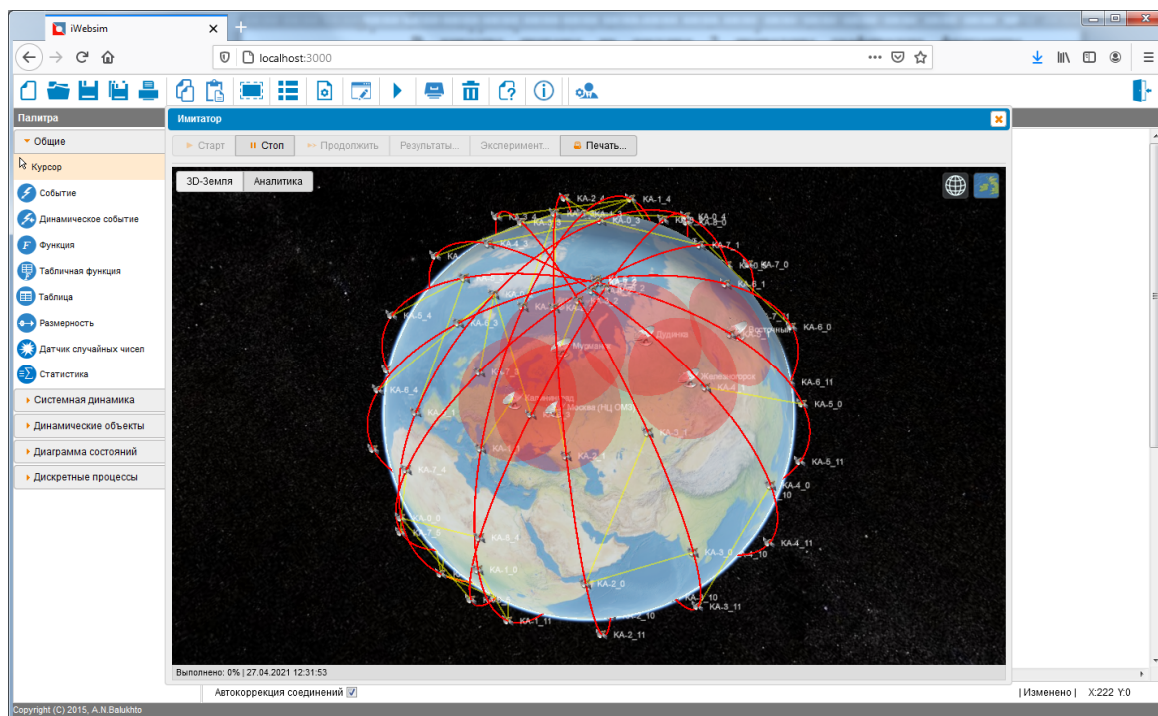


Рис. 2. Пример имитационной модели сетевой многоспутниковой группировки ДЗЗ, созданной в iWebsim на базе технологии агентного моделирования

На рис. 3 приведен пример расчета оперативности доставки пакетов данных с борта КА ДЗЗ в наземные пункты приема информации (ППИ) с использованием межспутниковых каналов связи.

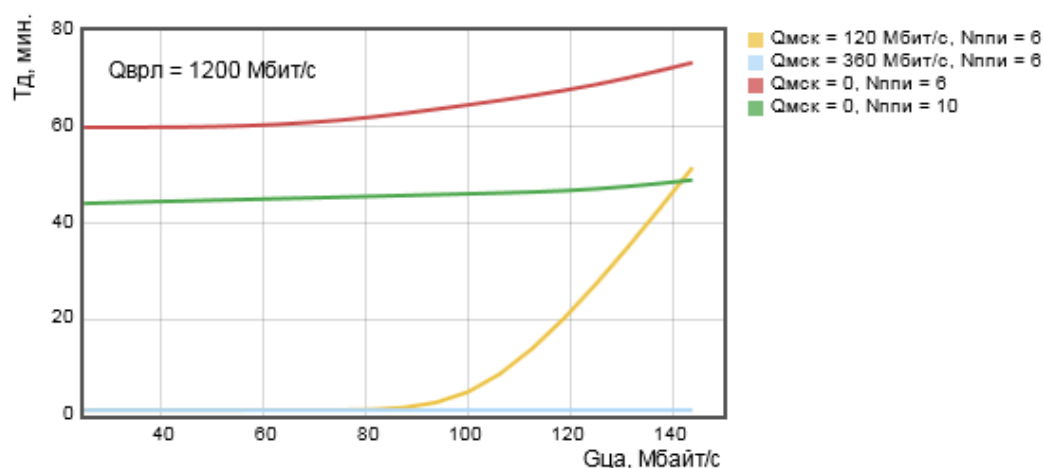


Рис. 3. Зависимость среднего времени доставки пакета данных с борта КА ДЗЗ в ППИ от производительности аппаратуры при использовании межспутниковых каналов связи (T_d – среднее время доставки пакета; $Q_{врл}$ – скорость передачи данных по каналу «борт-Земля»; $Q_{мск}$ – скорость передачи данных по межспутниковому каналу; $N_{ппи}$ – число задействованных ППИ; $G_{ца}$ – производительность целевой аппаратуры)

Одним из важных современных направлений развития космической техники является создание многоспутниковых КС с орбитальными группировками, включающими в себя десятки, сотни и более КА. Такого рода группировки предоставляют принципиально новые возможности для выполнения миссий КС. Эти возможности, главным образом, предполагают реализацию информационного взаимодействия между спутниками группировки. Целью взаимодействия, в частности, может быть распределение и перераспределение целевых операций наблюдения между спутниками группировки в зависимости от их текущего состояния и текущих планов по выполнению ранее назначенных целевых операций. Использование традиционного подхода к организации связи с группировкой спутников только на основе каналов связи между КА и наземными средствами управления существенным образом ограничивают возможности информационного взаимодействия, если не сводят их на нет вовсе, так как в этом случае информационное взаимодействие между спутниками будет происходить через объекты наземной инфраструктуры. Поэтому необходимо рассматривать иные подходы к организации связи, предполагающие использование межспутниковой связи внутри группировки спутников, реализацию информационного взаимодействия с помощью спутников-ретрансляторов или вспомогательной группировки спутников связи. В связи с этим потенциальным развитием экспериментальной библиотеки может быть разработка новых компонент для решения самых различных задач, связанных с исследованием эффективности целевого применения многоспутниковых систем, включая задачи организации эффективного их управления на базе новых подходов, основанных на сетевой реализации указанных систем.

Задача управления многоспутниковыми группировками имеет существенные особенности и отличия от задачи управления одиночными КА. Описание варианта формальной постановки задачи планирования наблюдений многоспутниковой группировкой, предложенный подход к ее решению, а также достаточно обширный обзор других подходов к формализации и решению этой задачи можно найти в работе [6]. Косвенным показателем сложности этой задачи является тот факт, что для получения экспериментальных оценок эффективности предлагаемого подхода в этой работе в экспериментах рассматривались группировки из ограниченного количества спутников, не более шести. Следует отметить, что в этой работе рассматривался вариант традиционного наземного планирования наблюдений. В связи с этим также следует обратить внимание на то, что в случае наземного планирования наблюдений возможность информационного взаимодействия между спутниками и, как следствие, принципиально новые возможности многоспутниковых группировок, по сути, не рассматриваются.

Таким образом, достаточно обоснованным представляется утверждение о том, что реализации принципиально новых возможностей многоспутниковых группировок предполагает развитие и использование возможностей автономного планирования целевых операций наблюдения на борту спутников группировки при условии использования схемы организации связи, обеспечивающей возможности информационного взаимодействия между спутниками. В связи с этим следует заметить, что имитационное моделирование представляется возможно единственным способом для апробации и оценки эффективности разрабатываемых математических моделей в данном случае. Это обстоятельство лишний раз подчеркивает актуальность среды iWebsim и определяет возможные направления ее дальнейшего развития.

В соответствии с накопленным опытом и достигнутыми результатами в части управления одиночными КА реализация возможностей автономного управления и планирования предполагает выполнение определенных вычислений на Земле и

делегирование КА возможностей принятия окончательных решений с использованием результатов таких вычислений. Следуя этому опыту развитие такого подхода представляется целесообразным и для развития возможностей автономного управления многоспутниковыми группировками. В качестве возможного варианта, например, может рассматриваться следующая схема функционирования мультиагентной системы.

1) Для каждой поступающей заявки *order* на Земле рассчитывается упорядоченный по времени список интервалов времени $Possibilities(order) = \{<TW, Sat>\}$, когда район наблюдения будет находиться в зоне видимости какого-то спутника *Sat* из состава группировки.

2) Первоначально заявка передается агенту спутника группировки с наиболее ранним окном временем *TW* видимости района наблюдения.

3) При получении заявки агент спутника оценивает возможность выполнения наблюдения в рамках данного интервала времени с учетом текущего и прогнозируемого состояния своих ресурсов, в частности, с учетом состояния аккумуляторной батареи, а также с учетом текущего плана наблюдений по ранее полученным заявкам.

4) Полагается, что заявки могут иметь различный приоритет, поэтому в результате может быть принято одно из трех возможных решений: выполнение новой заявки возможно, невозможно, или возможно за счет переназначения выполнения ранее запланированной заявки с меньшим приоритетом агенту другого спутника.

5) В двух последних случаях соответствующая заявка пересылается агенту спутника со следующим наиболее ранним окном видимости *TW* из списка $Possibilities(order)$, и далее эта заявка обрабатывается в соответствии с шагами 3-5 данной схемы.

В рамках имитационной модели космической системы, представляемой в виде мультиагентной системы, предполагается, что все агенты в процессе своего функционирования осуществляют информационное взаимодействие между собой, целями которого в обобщенном смысле являются:

- оповещение друг друга об изменении своего состояния, или
- формирование скоординированных во времени планов операций и действий, выполняемых соответствующими сущностями.

Отслеживание изменения состояния агентов осуществляется в дискретные моменты модельного времени (например, с использованием моделей агентов в виде так называемых диаграмм состояний).

Говоря о перспективах развития iWebsim в интересах моделирования КС различного назначения и их компонентов, следует отметить, что агентно-ориентированный подход может использоваться как для имитационного моделирования функционирования КС в целом, так и для моделирования функционирования ее отдельных составных частей, в том числе КА и объектов наземной инфраструктуры. При этом разработка имитационной модели КА представляется актуальной и необходимой с различных, но при этом взаимосвязанных точек зрения. С одной из них разработка такой модели, как уже было замечено ранее, представляется целесообразной на этапе проектирования и разработки спутника. С другой точки зрения эта же имитационная модель может рассматриваться в качестве основы для разработки и реализации возможностей автономного планирования на борту спутника выполнения целевых операций по поступающим заявкам и необходимого для это планирования действий и операций физических устройств и функционирования систем спутника. С третьей точки зрения использование такой модели в качестве составной части имитационной модели космической системы в целом представляется необходимой для обоснования и обеспечения точности

результатов моделирования. В частности, использование имитационных моделей спутников для реализации описанной выше схемы планирования наблюдений многоспутниковой группировкой представляется необходимой для обеспечения требуемой точности для решения комплекса задач на шаге 3.

В мультиагентной имитационной модели КА могут рассматриваться, например, группы агентов следующих типов:

- 1) агенты полезной нагрузки и системы связи;
- 2) агенты планирования полета спутника;
- 3) агенты физических устройств и систем, обеспечивающих полет спутника;
- 4) агенты измерительных приборов и систем.

Основной задачей агентов первой группы является расчет предварительного (относительно грубого) плана выполнения съемок при поступлении новых заявок с учетом плана установления каналов связи с другими спутниками и плана заряда аккумуляторной батареи. Расчет этих планов может требовать дополнительного информационного взаимодействия с агентами других устройств и систем, так как в зависимости от конструктивных особенностей спутника могут рассматриваться ограничения по одновременному выполнению различных операций, таких как:

- выполнение съемки, включая ориентацию спутника и/или нацеливание устройства наблюдения;
- зарядка аккумуляторной батареи, включая ориентацию спутника и/или солнечных панелей;
- установление канала связи, включая ориентацию спутника и/или нацеливание приемо-передающих антенн.

Результатом решения данной задачи является разбиение горизонта времени планирования на интервалы и определение требуемых параметров полета (углы ориентации спутника и/или солнечных панелей, углы нацеливания устройства наблюдения и антенн, другие параметры) в рамках каждого интервала времени.

Разбиение горизонта времени на интервалы выполняется в соответствии с запланированными по времени операциями, перечисленными выше. Границы интервалов времени определяются моментами времени начала и/или окончания этих операций.

На основании таких данных в процессе информационного взаимодействия агенты планирования полета во взаимодействии с агентами двух других групп рассчитывают план полета. При этом рассматриваются такие задачи, как определение текущего состояния физических устройств спутника, выбор рабочей конфигурации устройств, требуемых для обеспечения полета на интервалах времени, расчет планов-графиков включения-выключения этих устройств и параметров их функционирования. Расчет указанных графиков сопровождается моделированием (прогнозированием) изменения уровня заряда аккумуляторной батареи.

Результатом такого планирования может быть уточнение временных параметров выполнения запланированных целевых операций наблюдения, или отмена каких-то из них в виду текущего состояния устройств спутника и/или выявления снижения уровня заряда аккумуляторной батареи на горизонте времени планирования ниже допустимого значения. Разбиение горизонта времени на интервалы времени рассматривается в связи с тем, что на основании этого процессы планирования в рамках разных интервалов времени могут выполняться одновременно с учетом последующего сопоставления получаемых результатов и соответствующей коррекции принимаемых решений.

Таким образом, в результате планирования полета может уточняться план выполнения целевых операций наблюдения, которому сопоставляются планы-графики включения-выключения и параметры работы физических устройств спутника. На этапе

выполнения плана полета агенты физических устройств и измерительных приборов на основе информационного взаимодействия осуществляют контроль выполнения данных планов-графиков и автономно корректируют планы функционирования своих устройств в зависимости от ситуации.

Проведенные в рамках данной работы исследования показали, что программная платформа iWebsim потенциально позволяет при соответствующем ее развитии осуществлять высоко оперативную разработку, как комплексных имитационных моделей КС различного назначения, так и их отдельных компонентов (в привязке к глубокой иерархической декомпозиции указанных систем).

В качестве дополнительной иллюстрации здесь можно привести пример глобальной проблемы, являющейся объектом одних из наиболее актуальных направлений исследований в текущий момент времени, для разрешения которой может использоваться платформа iWebsim с учетом ее дальнейшего развития. С использованием многоспутниковых группировок низкоорбитальных малых космических аппаратов в ближайшей перспективе связываются большие надежды. Однако, существует значительное количество исследователей, скептически оценивающих такую перспективу. При этом обсуждения, как правило, происходят на уровне экспертных или интуитивных мнений и оценок. Перспективной основой для проведения комплексных исследований и разрешения этой проблемы может рассматриваться имитационное моделирование в целом, и платформа iWebsim в частности. Предполагается, что с помощью этой платформы можно будет моделировать различные конфигурации такой системы и получать метрические экспериментальные оценки их функционирования (производительность, оперативность выполнения заявок, и др.), в том числе – в зависимости от выбора форм факторов спутников (мини, макро или нано спутники) для формирования группировки.

Еще одно перспективное направление использования платформы iWebsim состоит в организации ее взаимодействия в рамках сервис-ориентированного подхода с аналитико-имитационными моделями функционирования бортовых систем КА и средств наземных комплексов управления, которые к настоящему времени разработаны на основе логико-динамических описаний. В работах [7-9] показано, как можно не только на программном, но, что самое главное, и на модельно-алгоритмическом уровне связать разработанные полимодельные комплексы с моделями, положенными в основу iWebsim, обеспечивая, тем самым, реализацию на практике концепции комплексного (системного) моделирования.

Заключение

Создана первая в отечественной практике программная платформа, реализованная на базе облачных технологий в виде кроссплатформенного веб-приложения, которая эффективно может использоваться для имитационного моделирования космических и других сложных динамических систем.

В основе данного программного средства лежит комплексное применение различных технологий моделирования СДС – системной динамики, дискретно-событийного и агентного моделирования.

В интересах реализации более высокого уровня автоматизации моделирования космических систем с использованием созданной программной платформы iWebsim была проведена экспериментальная отработка библиотеки типовых компонентов космических систем ДЗЗ. Предложенные решения позволяют пользователям оперативно, в режиме визуального конструирования, создавать высококачественные имитационные модели указанных систем, которые могут использоваться на различных этапах жизненного цикла объектов моделирования.

Дальнейшее развитие функциональных возможностей программной платформы iWebsim с целью создания на ее базе имитационных моделей космических систем различного назначения и их компонентов позволит внести существенный вклад в решение актуальной проблемы цифровой трансформации космической индустрии на базе современных информационных технологий, в том числе при создании цифровых двойников указанных систем.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке Программы НТС Союзного государства «Интеграция-СГ» (проект «Интеграция-СГ-3.2.4.1»), гранта РФФИ №19-08-00989 и в рамках бюджетной темы № 0073-2019-0004.

Литература

1. Цифровая трансформация космического приборостроения // Под редакцией А.А. Романова, А.А. Романова, Ю.М. Урличича. Королёв: АО «ЦНИИмаш», 2020. – 397 с
2. **Балухто А.Н., Твердохлебова Е.М.** Аналитический обзор текущего состояния и перспектив развития в области технологий и программных средств имитационного моделирования космических систем // Космонавтика и ракетостроение, № 2 (107), 2019, с. 118-133.
3. **Балухто А.Н., Соколов Б.В.** iWebsim – современная веб-технология в области комплексного моделирования сложных динамических систем // Труды Восьмой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017) 18-20 октября 2017, Санкт-Петербург. С.8–17.
4. **Палей А.Г., Поллак Г.А.** Имитационное моделирование. Разработка имитационных моделей средствами iWebsim и AnyLogic. Санкт-Петербург: Лань, 2019.
5. **Котов В.Е.** Сети Петри. М.: Наука, 1984.
6. **Lei He, Xiaolu Liu, Gilbert Laporte, Yingwu Chen, Yingguo Chen.** An improved adaptive large neighborhood search algorithm for multiple agile satellites scheduling // Computers and Operations Research, Elsevier, № 100 (2018). P.12-25.
7. **Павлов А.Н.** Методы, алгоритмы и технологии реконфигурации бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов / Павлов А.Н., Кулаков А.Ю., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. // Известия Вузов. Приборостроение. – 2018, том 61, № 7. С. 596-603.
8. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
9. **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.