

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ**

УДК 629.78 DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.65.75

Искусственный интеллект в космической технике: состояние, перспективы развития

А. Н. Балухто, *д. т. н., BalukhtoAN@tsniimash.ru*
ФГУП ЦНИИмаш, Королев, Российская Федерация

А. А. Романов, *д. т. н., профессор, romanov@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является определение и обоснование основных областей (направлений) применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в космических системах и комплексах в контексте обеспечения эффективной реализации их целевого применения.

Приводится обзор основных областей и направлений применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в космической технике. Анализируется текущее состояние и перспективы развития в этой области, приводятся конкретные примеры практического использования в ней технологий ИИ.

Делается вывод о том, что применительно к космическим приложениям в первую очередь должны развиваться:

- нейросетевые и другие технологии, обеспечивающие эффективное решение различных задач, связанных с обработкой больших массивов разнородной спутниковой информации, а также отдельных изображений и сигналов, в том числе на борту КА;
- экспертные и другие интеллектуальные системы реального времени, обеспечивающие повышение уровня автономности функционирования КА различного назначения;
- мультиагентные технологии автономного управления (в режиме самоорганизации) многоспутниковыми орбитальными группировками;
- интеллектуальные системы, обеспечивающие эффективную поддержку модельно-ориентированного проектирования космических систем и их компонентов;
- робототехнические средства, предназначенные для орбитального обслуживания КА и решения других задач.

Ключевые слова: космический аппарат, космическая техника, искусственный интеллект, технологии искусственного интеллекта

Artificial Intelligence in Space Technology: State, Development Prospects

A. N. Balukhto, *Dr. Sci. (Engineering), BalukhtoAN@tsniimash.ru*
FSUE TSNIMash, Korolev, Russian Federation

A. A. Romanov, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., romanov@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The aim of the work is to identify and substantiate the main areas (directions) of application of artificial intelligence (AI) technologies in space systems and complexes in the context of ensuring the effective realization of their intended use.

The review of the main areas and directions of application of artificial intelligence technologies in space technology is given. The current state and prospects of development in this area are analyzed, specific examples of practical use of AI technologies in it are given.

It is concluded that in the case of space applications the development of the following areas should be prioritized:

- neural networks and other technologies that provide effective solutions to various problems associated with the processing of large amounts of heterogeneous satellite information, as well as individual images and signals, including onboard processing;
- expert systems and other intelligent real-time systems that increase the level of autonomy of the SC for various purposes;
- multi-agent technologies of autonomous control (in self-organization mode) of multi-satellite orbital groups;
- intelligent systems that provide effective support for model-oriented design of space systems and their components;
- robotic devices designed to service spacecraft in orbit and solve other problems.

Keywords: spacecraft, space technology, artificial intelligence, artificial intelligence technology

Введение

Целью данной статьи является определение и обоснование основных областей (направлений) применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в космических системах (КС) и комплексах в контексте обеспечения эффективной реализации их целевого применения.

Говоря об использовании технологий искусственного интеллекта в космической технике, прежде всего необходимо отметить, что данные технологии к настоящему времени достигли такого уровня развития, который в совокупности с достижениями в области нанотехнологий, биотехнологий, аддитивных технологий, «интернета вещей» позволяет говорить о начале новой (четвертой) индустриальной революции.

Сегодня технологии искусственного интеллекта приобретают статус стратегических, поскольку потенциально способны оказывать огромное влияние на различные сферы деятельности человека, в том числе и в космической отрасли.

С годами это влияние будет только расти. Объем инвестиций в создание и развитие технологий искусственного интеллекта со стороны ведущих мировых ИТ-компаний исчисляется миллиардами долларов. Согласно прогнозу аналитической компании Tractica, в 2025 году рынок технологий искусственного интеллекта приблизится к \$60 млрд.

Существует множество определений искусственного интеллекта. Авторы данной статьи придерживаются определения, в соответствии с которым искусственный интеллект — это область научных исследований и практического применения их результатов, связанная с созданием и применением компьютерных систем, способных выполнять задачи, обычно требующие человеческого интеллекта.

Данное определение искусственного интеллекта, равно как и другие существующие определения, достаточно размыто. Вместе с тем оно интуитивно понятно. Попытки конкретизировать такие определения, как правило, сводятся к дополнительному перечислению типовых задач, традиционно относящихся к интеллектуальным задачам (таким, например, как анализ и синтез речи, обработка визуальной информации с семантической интерпретацией наблюдаемых динамических сцен, машинный пере-

вод и др.) или к описанию некоторых специальных тестов на определение степени интеллектуальности системы. Примером такого классического теста является эмпирический тест Тьюринга [1].

Многие читатели этой статьи наверняка согласятся с ее авторами в том, что когда в названии той или иной современной информационно-вычислительной системы присутствует слово «интеллектуальная», то в этом есть всегда некоторая доля рекламного «лукавства», поскольку на текущий момент более корректно их следовало бы называть системами с элементами ИИ. Хотя сегодня у ведущих специалистов в этой области нет больших сомнений в том, что в отдаленном будущем (а может быть, и в ближайшем) будут созданы в полном смысле интеллектуальные (думающие) системы. Во всяком случае, законов природы, исключающих такую возможность, пока не обнаружено.

В последние годы, наряду с термином «искусственный интеллект», все более широко используется другой близкий к нему термин — «машинное обучение». По своему смысловому содержанию данный термин связывается с направлением ИИ, изучающим методы и алгоритмы обучения различных классов систем (в том числе нейронных сетей), а также программно-аппаратные средства их реализации. По мнению авторов, наблюдаемое сегодня смещение акцента в исследованиях по проблематике ИИ в область машинного обучения в первую очередь обусловлено тем, что в ближайшей перспективе наиболее прорывные результаты ожидаются именно в этой области.

С прикладной точки зрения одной из важных особенностей интеллектуальной системы является способность находить необходимые решения сложной задачи по ее постановке на основе имеющихся у нее знаний (базы знаний) по соответствующей предметной области. При этом база знаний может формироваться и пополняться как во взаимодействии с человеком, так и системой самостоятельно, в том числе на основе когнитивного анализа доступных внешних данных (структурированных и неструктурированных), обучения и самообучения.

В настоящее время существует множество различных методов и технологий, развиваемых в рамках искусственного интеллекта. В качестве основных из них можно выделить:

- нейросетевые технологии, основанные на использовании различных парадигм нейронных сетей (НС) и методов их обучения;
- экспертные системы, основанные на использовании различных форм представления знаний (в виде нечетких правил, хорновских правил, продукций, фреймов, семантических сетей и др.) и методов работы с ними;
- эволюционные вычисления (генетические алгоритмы, эволюционные стратегии, генетическое программирование и др.);
- методы и технологии извлечения новых знаний из больших баз данных (технологии Data Mining);
- технологии «роевого интеллекта»;
- комбинированные и др. технологии.

Все они в той или иной мере могут использоваться в рассматриваемой предметной области.

Поскольку сегодня существует огромное число публикаций, посвященных обзорному и детальному описанию существующих методов и технологий ИИ, истории их возникновения, далее мы не будем подробно останавливаться на этом, а основное внимание уделим перспективным областям (направлениям) их применения в космической технике.

Основные области применения технологий ИИ в космической технике

Практическая реализация технологий ИИ в различных космических системах и комплексах, равно как и в других предметных областях, не является самоцелью. Прежде всего, эти технологии должны использоваться в тех случаях, когда их применение потенциально более эффективно по сравнению с традиционными технологиями. При этом необходимо учитывать тот факт, что с развитием технологий искусственного интеллекта расширяется и спектр возможных областей их применения в космической технике, которая также постоянно развивается.

Применительно к рассматриваемой предметной области можно выделить следующие основные

условия (факторы), определяющие целесообразность применения тех или иных технологий ИИ:

- потенциально обеспечивается решение соответствующих прикладных задач с более высоким выходным качеством и оперативностью (по сравнению с традиционными технологиями) при приемлемых для этого необходимых вычислительных и других ресурсах;
- обеспечивается более высокий уровень автономности КА и (или) орбитальной группировки в целом, в том числе в условиях существенной априорной неопределенности относительно условий их функционирования, без ущерба эффективности их целевого применения.

Исходя из сказанного, а также обобщения существующего опыта практического использования технологий ИИ в качестве основных областей (направлений) их применения в космической технике на ближайшую перспективу можно выделить:

- тематическую обработку спутниковых изображений;
- контроль, диагностику и управление техническим состоянием КА;
- бортовую обработку целевой информации;
- управление многоспутниковыми орбитальными группировками;
- интеллектуальные системы поддержки проектных решений;
- обработку больших массивов разнородной спутниковой информации;
- реализацию дальних космических миссий;
- робототехнические средства.

Ниже более подробно рассмотрим вопросы применения технологий ИИ в приведенных выше областях их применения.

Тематическая обработка спутниковых изображений

Тематическая обработка спутниковых изображений сегодня является одной из ставших уже традиционными областей применения технологий ИИ.

Наибольшее распространение в этой области получили нейросетевые технологии. Особенно интенсивное развитие они получили после появления впечатляющих результатов их применения в области обработки изображений с применением так называемых методов глубокого обучения и новых парадигм ИС, таких, например, как сверточные нейронные сети [2].

В настоящее время нейросетевые методы обработки спутниковых изображений реализованы в ряде различных программных инструментов, таких, например, как ENVI, ScanEx Image Processor, Arc-SDM (модуль в составе ArcView) и др., которые достаточно активно используются на практике.

Если проанализировать многочисленные публикации, посвященные нейросетевым методам и алгоритмам обработки различной информации, в том числе спутниковых изображений, то можно обнаружить следующую закономерность: все они демонстрируют решение соответствующих задач с более высоким качеством выходного результата (в числовом выражении определяется значениями соответствующих показателей, например, при решении задачи классификации — величиной вероятностей ошибок первого и второго рода, при решении задачи фильтрации — отношением «сигнал/шум» на выходе фильтра и т. д.). И этому есть свое объяснение. Дело в том, что при использовании классических методов решения таких, например, задач, как фильтрация и классификация, мы вынуждены делать ряд априорных предположений о свойствах входных сигналов. Однако такого рода предположения не всегда полностью соответствуют реальным характеристикам этих сигналов. В противоположность этому нейронная сеть при правильном формировании для нее обучающей выборки в процессе своего обучения максимально адаптируется к реальным характеристикам входных сигналов. За счет этого, в основном, и обеспечивается высокое качество решения различных задач с использованием нейросетевых технологий обработки сигналов и изображений. Кроме того, нейронные сети в современном их представлении являются существенно нелинейными системами обработки информации, что также способствует повышению качества решения указанных выше задач.

Сегодня можно с уверенностью утверждать, что применение нейросетевых технологий в области тематической обработки спутниковых изображений является вполне обыденным делом.

Бортовые системы контроля, диагностики и управления техническим состоянием КА

Большое внимание в последние годы со стороны предприятий и организаций космической индустрии уделяется вопросам применения технологий ИИ в бортовых системах контроля, диагностики и управления техническим состоянием (СКДУ) КА. И это не случайно, поскольку решаемые ими задачи по уровню сложности (прежде всего в силу сложности формального описания самого объекта контроля и управления) могут быть отнесены к классу так называемых трудно формализуемых задач. Кроме того, интерес к применению технологий ИИ в этой области обусловлен потенциальной возможностью существенного повышения уровня автономности КА при решении указанных выше задач (в идеальном случае — без какого-либо участия наземных средств управления). Как справедливо отмечается в работе [3], в настоящее время во многих случаях на борту КА осуществляется лишь контроль технического состояния, а диагностирование и управление техническим состоянием проводится наземными комплексами управления, что приводит к длительным задержкам по выработке необходимых управляющих воздействий и передачи их на борт КА.

Поскольку контроль, диагностика и управление техническим состоянием бортовых систем КА должны осуществляться непрерывно во времени, то среди всех технологий ИИ для решения этих задач наиболее целесообразно использовать так называемые динамические экспертные системы [4]. Такого рода системы способны в реальном масштабе времени по результатам измерения различных параметров бортовых систем КА и их обработки с использованием базы знаний (в общем случае динамически развивающейся) осуществлять управление их техническим состоянием.

Уже сейчас СКДУ некоторых КА по своему устройству и функциональным возможностям могут быть отнесены к классу интеллектуальных систем. Так, например, в работе [5] отмечается, что в ряде российских КА связи уже более двадцати лет применяются бортовые программные комплексы автономного контроля, диагностики и управления, построенные по принципу динамических экспертных систем.

Важно также отметить, что перспективные СКДУ должны обеспечивать решение не только задач контроля, диагностики и управления техническим состоянием КА, но и прогнозирования изменения указанного состояния во времени. В этой части роль технологий ИИ трудно переоценить.

В космических аппаратах NASA в качестве аналога российских СКДУ выступают так называемые системы управления живучестью, обозначаемые аббревиатурой ISHM (Integrated Systems Health Management). Достаточно полный обзор методов и алгоритмов решения типовых задач ISHM приведен в работе [6]. В ней, в частности, отмечается, что для решения задачи прогнозирования технического состояния КА могут использоваться нейросетевые методы.

Основные перспективы развития в области создания интеллектуальных СКДУ следует связывать, прежде всего, с развитием таких их функциональных свойств, как адаптивность, обучаемость и самообучаемость.

Бортовая обработка целевой информации

Реализация обработки целевой информации на борту КА во многих случаях является актуальной, в частности, когда речь идет о необходимости решения задач наблюдения в реальном масштабе времени или близком к нему. К их числу можно, например, отнести задачи, связанные с обнаружением различного рода природных и техногенных катастроф, а также событий и процессов, имеющих большое значение для обороны и экономики страны. В этих случаях целесообразно потребителям передавать не исходную измерительную информацию, а конечные результаты ее обработки, причем, как уже отмечалось ранее, в реальном масштабе времени

и минуя промежуточные центры приема, обработки и распространения космической информации.

Кроме того, проблема реализации обработки целевой информации на борту КА актуальна также для многоспутниковых сетевых систем опτικο-электронного и радиолокационного наблюдения, способных в сутки генерировать десятки тысяч и даже более терабайт информации. В этих условиях реализация обработки целевой информации на борту КА позволит существенно снизить требования к пропускной способности каналов связи, в том числе межспутниковых.

Уже сегодня отчетливо наблюдается тенденция к проведению необходимых исследований по данной проблематике, в том числе экспериментальных, включая отработку необходимых технологий ИИ. Так, например, ЕКА планирует в 2019 году запустить экспериментальный КА ДЗЗ BrainSat, на борту которого будет установлен процессор Mugiad от компании Intel с производительностью 1 триллион операций в секунду (TOPS), предназначенный для нейросетевой обработки спутниковых изображений. На взгляд авторов, это весьма перспективный и многообещающий проект.

Управление многоспутниковыми орбитальными группировками

Появление и активное развитие в последнее десятилетие многоспутниковых низкоорбитальных космических систем, основанных на использовании так называемых малых КА [7], инициировало и разработку новых подходов к управлению их орбитальными группировками (ОГ).

Особый интерес представляют подходы, ориентированные прежде всего на существенное повышение автономности решения соответствующих управленческих задач, что позволяет упростить необходимую наземную инфраструктуру, задействованную в контуре управления ОГ, и повысить живучесть системы в целом. В качестве основных таких задач можно выделить:

- управление по поддержанию баллистической конфигурации ОГ;
- планирование и управление выполнением задач наблюдения (мониторинга) за состоянием

целевой обстановки с динамическим формированием необходимых для этого кластерных структур КА (например, динамических кластеров из 3 и более КА, решающих задачу обнаружения источников радиоизлучения и определения места их расположения с использованием разностно-дальномерного метода [8]);

- выполнение других задач управления функционированием КА, в том числе в космических системах связи (одна из таких задач, связанная с контролем, диагностикой и управлением технического состояния КА, была рассмотрена выше).

Очевидно, что эффективное решение указанных задач в автономном режиме возможно в случае, если все КА орбитальной группировки связаны в единую спутниковую сеть, в том числе с использованием межспутниковых каналов, что обеспечивает возможность необходимого в таких случаях их оперативного информационного взаимодействия.

Характерным примером практической отработки технологий автономного управления многоспутниковой ОГ является программа Blackjack, реализуемая DARPA. Одной из целей данной программы является разработка автономного программного обеспечения на уровне полезных нагрузок и целых миссий, а также демонстрация автономных операций, в том числе с использованием орбитальных процессорных вычислений. Конечная цель исследований — создание орбитальной группировки из 60–200 МКА, работающих на высотах от 500 до 1300 км, с единым центром управления и способностью работать без команд с Земли в течение 30 дней.

Одним из наиболее перспективных направлений развития технологий в рассматриваемой области является реализация так называемого мультиагентного управления распределенными системами [9–11]. В рамках этого подхода КС представляется в виде самоорганизующейся совокупности интеллектуальных агентов, в роли которых выступают орбитальные, наземные и другие узловые элементы спутниковой сети [9–11], оснащенные соответствующим программным обеспечением.

Однако надо отметить, что на текущий момент методология мультиагентного управления много-

спутниковыми космическими системами находится на стадии своего формирования и требует более глубокого развития и экспериментальной отработки (до уровня, обеспечивающего возможность ее реального практического применения).

Для целей управления функционирования КА используются также экспертные и близкие к ним системы, применяемые в наземных комплексах управления. К их числу можно, например, отнести системы SHARP, SURPASS, PMS, GSOC MPS и др. [12–14].

Интеллектуальные системы поддержки проектных решений

Сегодня на смену традиционным подходам к проектированию космической техники приходит новый подход, позволяющий в более короткие сроки и с более высоким качеством формировать технический облик космических систем, создавать КА нового поколения и средства их выведения, — модельно-ориентированное проектирование [15–18] (рис. 1).

В модельно-ориентированном проектировании (МОП) процесс разработки сосредоточен вокруг системной модели объекта проектирования — от анализа предъявляемых к нему требований до ввода его в штатную эксплуатацию.

Эта модель должна быть единой для всех разработчиков КС — системщиков, специалистов по космической баллистике, целевой и служебной аппаратуре КА, связи и передачи данных, наземной инфраструктуре и др. При этом предполагается, что все они должны активно участвовать в проектировании, начиная с самых ранних его этапов.

На начальном этапе такая модель описывает некоторый общий функциональный облик системы с абстрагированием от конкретных технических решений. На последующих этапах проектирования она постепенно (в итеративном режиме) развивается по мере коррекции и принятия тех или иных системных и технических решений.

По существу, при модельно-ориентированном проектировании роль утвержденной документации переходит от чертежей к аннотированной компьютерной модели КС («цифрового двойника» КС).

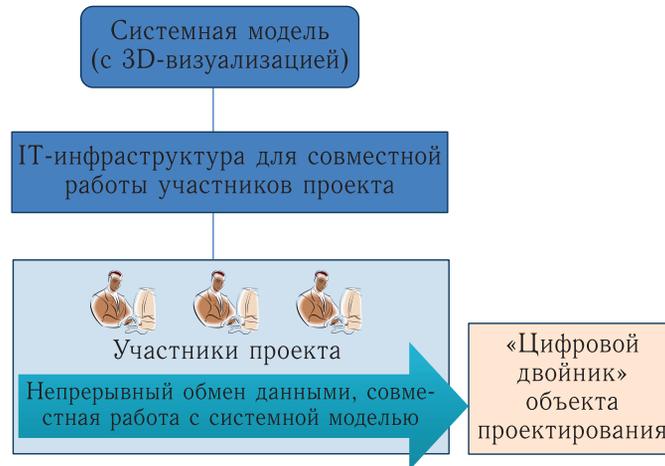


Рис. 1. Модельно-ориентированный подход к проектированию

Основное достоинство МОП заключается в том, что компьютерную модель можно тестировать, уточнять и повторно тестировать в течение всего процесса проектирования без создания физических прототипов компонентов создаваемой системы. При этом тестирование, верификация и валидация превращаются в непрерывный процесс, а не проводятся в конце разработки, что позволяет обнаруживать ошибки и устранять их на более ранних этапах проектирования (до момента физической реализации компонентов создаваемой системы или изделия). Кроме того, системная модель и ее компоненты могут быть относительно быстро адаптированы для их использования в других проектах.

Все это в конечном счете и позволяет существенно повысить качество создаваемых космических систем и комплексов, сократить сроки и стоимость их разработки. Приведенные в работе [15] результаты анализа опыта применения МОП при проектировании авиационной техники показывают, что при использовании модельно-ориентированного подхода 85 % ошибок выявляется на самых ранних этапах проектирования, а при традиционном — только 40 % (см. рис. 2).

Кроме того, модельно-ориентированный подход к проектированию создает необходимые условия для эффективной реализации технологии организации так называемого параллельного проектирования [17, 18]. Это реализуется за счет использования информационных систем, обеспечивающих информационную поддержку всех участников про-

екта на всех этапах его жизненного цикла на основе оперативного обмена данными о проекте (проектируемом изделии) между его участниками и консольдацией указанных данных в едином хранилище с последующим отображением принимаемых проектных решений в системной модели.

Потенциально сфера возможных применений технологий ИИ в МОП весьма обширна. В рамках его могут использоваться различного рода экспертные и другие интеллектуальные системы, помогающие проектировщикам быстро находить наиболее эффективные и перспективные решения по разработке КА и космических систем в целом.

Особую роль в МОП играют программные средства имитационного моделирования, которые на протяжении уже многих десятилетий достаточно активно используются при системном и техническом проектировании КС и их компонентов.

В современных программных средствах такого назначения аккумулированы все основные знания, необходимые для моделирования космических систем на разных уровнях их детализации. При этом реализуются технологии визуального конструирования соответствующих компьютерных моделей при использовании различных библиотек типовых блоков (компонентов), каждый из которых, если пользоваться терминологией из области фреймового представления знаний, представляет собой некоторый концепт — модель общего вида некоторого класса процессов, явлений или устройств. После параметризации такого концепта

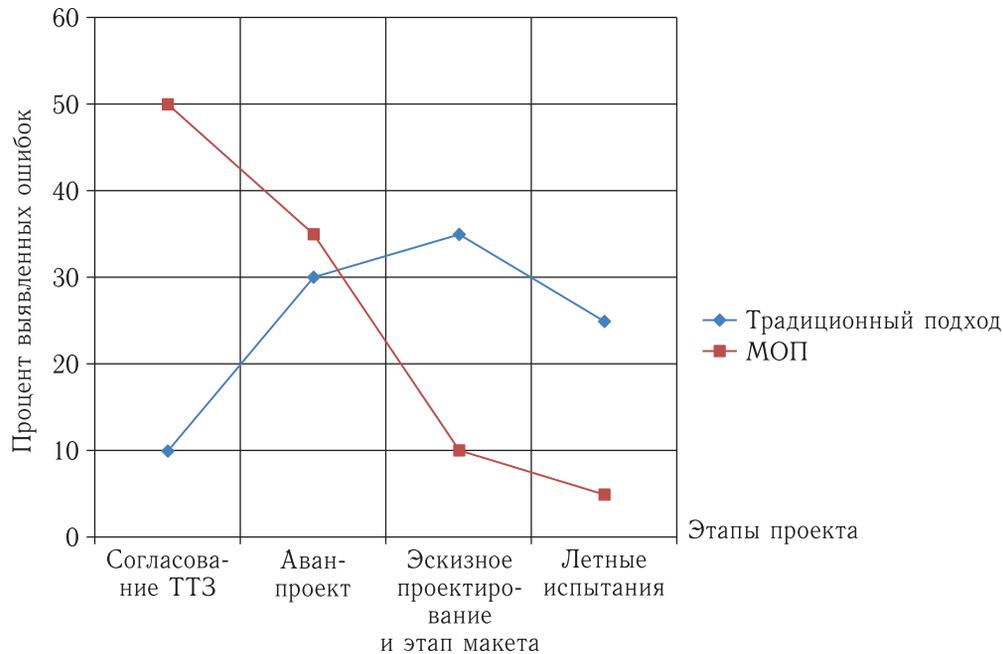


Рис. 2. Сравнение числа выявленных ошибок по этапам при проектировании авиационной техники [15]

он становится уже моделью конкретного процесса, явления или устройства. В результате такого конструирования на выходе получается некоторый графический параметризованный образ модели исследуемой системы, который затем автоматически транслируется в собственно имитационную модель, с помощью которой далее проводятся различные машинные имитационные эксперименты, в том числе оптимизационные.

В качестве наиболее продвинутого программного комплекса имитационного моделирования космических систем с точки зрения его функциональных возможностей и реализуемых в нем технологий моделирования можно выделить программный комплекс STK (System Tool Kit, ранее — Satellite Tool Kit), разработанный компанией Analytical Graphics Inc.

Обработка больших массивов разнородной спутниковой информации

В процессе функционирования космических систем наблюдения накапливаются большие массивы различной информации, включая спутниковые изоб-

ражения. По мнению авторов и многих других экспертов в этой области, глубокий и полный анализ таких массивов даже хорошо подготовленными специалистами без использования современных технологий ИИ практически невозможен. Основной целью такого анализа является обнаружение новых явлений и закономерностей, различных опасных ситуаций и их предвестников, которые невозможно выявить на основе анализа (обработки) единичных спутниковых изображений или измерений. Кроме того, при обработке больших массивов спутниковой информации актуальной является такая практически важная задача, как исследование динамики изменения состояния природных, инфраструктурных и других объектов наблюдения.

В указанных случаях применяются, как правило, методы и технологии, получившие общее название Data Mining (извлечение новых знаний из баз данных) — нейросетевые методы, ассоциативные правила, деревья решений, кластерный анализ, регрессионный анализ и др.

В случаях, когда речь идет об обработке больших массивов спутниковых изображений, весьма продуктивно могут использоваться нейросетевые методы. Эффективность их использования в этой сфере значительно возрастает при применении

соответствующих нейровычислителей, которые по соотношению «производительность/стоимость» существенно превосходят вычислительные системы с традиционной архитектурой [19] (за счет принципиальной возможности глубокого распараллеливания вычислительного процесса, реализуемого при выполнении нейровычислений).

Характерным примером применения нейросетевых технологий для обработки больших массивов видеоданных, получаемых с помощью беспилотных летательных аппаратов, является проект *Maven*, инициированный военным ведомством США. При этом сообщается (<https://thebulletin.org/2017/12/project-maven-brings-ai-to-the-fight-against-isis/>), что над собственной версией проекта *Maven* уже работает сообщество аналитиков, имеющих дело со спутниковыми изображениями. Реализация этого проекта позволит многократно повысить уровень автоматизации обработки больших массивов видеоданных и тем самым существенно повысить оперативность и качество решения соответствующих целевых задач (с минимизацией рисков, связанных с влиянием человеческого фактора).

Реализация дальних космических миссий

Не менее важной областью применения технологий ИИ в космической технике является реализация дальних космических миссий с целью проведения напланетных и других исследований. Такого рода исследования, особенно напланетные исследования, осуществляются в условиях существенной априорной неопределенности относительно условий функционирования соответствующих космических средств. При этом важно отметить, что взаимодействие таких средств с Землей осуществляется также в условиях значительных временных задержек передачи радиосигналов (например, радиосигнал с Марса достигает Земли за время, находящееся в диапазоне от 3 до 23 мин, в зависимости от расстояния между планетами).

Использование в таких миссиях космических средств, способных автономно (без участия человека) быстро принимать необходимые решения в различных ситуациях, является крайне акту-

альным. Очевидно, что в этих случаях технологии ИИ, включая технологии машинного зрения, могут весьма эффективно применяться, что, собственно, в последние годы и реализуется, в частности, в таких космических миссиях, как *Curiosity*, *Opportunity*, *Rosetta*, *Cassini-Huygens*, *OSIRIS-REx*, *InSight* и др.

Робототехнические средства

Традиционной областью применения технологий ИИ являются и робототехнические средства (РБС) различного назначения.

Применительно к космической технике можно выделить следующие основные направления применения РБС:

- орбитальное обслуживание КА (ремонт, заправка, сборка, увод с орбиты);

- робототехнические средства, используемые в составе различных космических зондов для проведения напланетных исследований (по существу такого рода зонды сами по себе представляют автономные или полуавтономные робототехнические устройства, способные в условиях априорной неопределенности относительно условий их функционирования самостоятельно принимать необходимые решения по осуществлению возложенных на них миссий);

- робототехнические линии сборки, обеспечивающие массовое серийное производство КА нового поколения в интересах создания многоспутниковых систем;

- робототехнические средства, реализующие автономное выполнение различных опасных работ, таких, например, как заправка ракеты-носителя компонентами ракетного топлива.

Особое внимание в последние годы со стороны практически всех мировых лидеров космической индустрии уделяется проблеме орбитального обслуживания КА, включая их ремонт, заправку, сборку и увод с орбиты. Это обусловлено тем, что практическая реализация такого рода технологий позволит:

- существенно повысить сроки активного существования «больших» и дорогостоящих КА, в частности космических аппаратов различного

назначения, размещаемых на геостационарной орбите (путем проведения на орбите их ремонта, технического переоснащения и заправки);

– осуществлять сборку крупногабаритных КА (например, больших телескопов) и космических конструкций, предназначенных для реализации программ освоения Луны и Марса;

– проводить увод с орбиты отработавших свой срок активного существования КА различного назначения, что внесет существенный вклад в решение проблемы борьбы с космическим мусором и обеспечения безопасности космических полетов.

В этой области достаточно отчетливо наблюдается тренд перехода от теоретических обоснований и рассуждений непосредственно к экспериментальной отработке технологий орбитального обслуживания с использованием бортовых робототехнических комплексов. Так, например, еще в 2007 г. в США были запущены экспериментальные спутники, созданные по программе Orbital Express, ориентированной на отработку проведения орбитальных ремонтно-восстановительных и заправочных операций.

В ближайшее время NASA планирует отправить на МКС оборудование для эксперимента Robotic Refueling Mission 3 (RRM3), которое позволит впервые опробовать метод хранения и пополнения запасов криогенного топлива КА. RRM3 станет продолжением двух предыдущих технологических демонстрационных миссий на МКС — RRM1 и RRM2, которые заключались в выполнении роботами действий по снятию крышек и манипуляции вентилями на макете космического аппарата. Эксперимент был доведен до стадии, предшествующей началу собственно перекачки. Способность пополнять запас криогенных жидкостей в космосе поможет минимизировать количество топлива, которое должны нести на борту космические аппараты с поверхности Земли, что делает возможными более дальние и продолжительные полеты в космос.

Компания SSL приступила к созданию центра управления по обслуживанию на геостационарной орбите для коммерческих компаний. Реализуется и ряд других подобных проектов.

Характерным примером в области создания роботизированных линий сборки и испытаний малых КА является создаваемый компанией Airbus завод,

который позволит производить не менее двух спутников в день для орбитальной группировки космической системы OneWeb. Описание подобной роботизированной линии, создаваемой компанией Raytheon, приведено в работе [20].

Заключение

В рамках одной статьи подробно осветить все основные области применения технологий искусственного интеллекта в космической технике не представляется возможным. Безусловно, каждая из них заслуживает более детального и глубокого обсуждения.

Если говорить о самих технологиях ИИ, то применительно к космическим приложениям в первую очередь должны развиваться:

- нейросетевые и другие технологии, обеспечивающие эффективное решение различных задач, связанных с обработкой больших массивов разнородной спутниковой информации, а также отдельных изображений и сигналов, в том числе на борту КА;
- экспертные и другие интеллектуальные системы реального времени, обеспечивающие автономное функционирование КА различного назначения;
- мультиагентные технологии автономного управления (в режиме самоорганизации) многоспутниковыми орбитальными группировками;
- интеллектуальные системы, обеспечивающие эффективную поддержку модельно-ориентированного проектирования КС и их компонентов;
- робототехнические средства, предназначенные для орбитального обслуживания КА, проведения напланетных исследований в дальних космических миссиях и решения других рассмотренных выше задач.

При этом необходимо еще раз подчеркнуть, что по мере развития технологий ИИ будет изменяться и спектр возможных областей их практического использования в космической технике, которая также постоянно развивается.

Авторы данной статьи убеждены, что применение технологий ИИ в рассматриваемой предметной

области позволит создавать перспективные космические системы и комплексы с качественно новыми свойствами и функциональными возможностями, способствуя тем самым более глубокому и рациональному освоению человеком космического пространства.

Список литературы

1. *Тьюринг А. М.* Вычислительные машины и разум // В сб.: Хофштадер Д., Деннет Д. Глаз разума. Самара: Бахрах-М, 2003. С. 47–59.
2. *Николенко С. И., Кадурич А. А., Архангельская Е. О.* Глубокое обучение. СПб: Питер, 2018. 480 с.
3. Инфраструктура малых космических аппаратов // Под ред. В. Ф. Фатеева. М.: Радиотехника, 2011. 432 с.
4. *Попов Э. В., Фоминых И. Б., Кисель Е. Б., Шапот М. Д.* Статические и динамические экспертные системы. М.: Финансы и статистика, 1996. 320 с.
5. *Хартов В. В.* Автономное управление космическими аппаратами связи, ретрансляции и навигации // Авиакосмическое приборостроение, 2006, № 6. С. 29–33.
6. *Schwabacher M., Goebel K.* A Survey of Artificial Intelligence for Prognostics. AAAI Fall Symposium — Tech. Rep. 2007. P. 107–114.
7. *Данилкин А. П., Козлов В. А.* Мировые тенденции развития малых спутников // Экономические стратегии, 2016, № 6. С. 136–149.
8. *Ворошилин Е. П., Миронов М. В., Громов В. А.* Определение координат источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом с использованием группировки низкоорбитальных малых космических аппаратов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2010, № 1(21), ч. 2. С. 23–28.
9. *Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В. и др.* Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Моделирование систем и процессов, 2013, № 1. С. 16–26.
10. *Городецкий В. И.* Самоорганизующиеся сети агентов — базовая модель группового и кооперативного поведения автономных объектов // Сборник трудов научно-технической конференции Минобороны РФ «Искусственный интеллект: проблемы и пути решения», 14–15 марта 2018. С. 9–15.
11. *Лихтенштейн В. Е., Коняевский В. А., Росс Г. В., Лось В. П.* Мультиагентные системы. Самоорганизация и развитие. М.: Финансы и статистика, 2018. 264 с.
12. *Atkinson D., James M.* Applications of AI for automated monitoring: The SHARP system // AIAA Pap., 1990, № 5054. 9 p.
13. *Hull L., Hansen E., Sparn T.* Distributed planning and scheduling for instrument and platform operations // AIAA Pap., 1990, № 5090. 10 p.
14. *Wickler M., Zoehinger G.* Mission planning concept and system for MOMS-2P (and PRIRODA) / Mission Planning System Documentation. DLR/GSOC, 1995. № M2P-GSO-G70-SP-001.
15. *Агафонов О. А., Вахрушев Д. Э., Прядко С. П., Щукин А. В.* Внедрение модельно-ориентированного подхода к проектированию самолетов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2012, № 5 (36). С. 44–47.
16. *Weiss K. A., Dulac N., Chiesi S., Daouk M., Zipkin D., Leveson N.* Engineering Spacecraft Mission Software using a Model-Based and Safety-Driven Design Methodology // Journal of Aerospace Computing, Information and Communication, 2006, vol. 3. P. 562–586.
17. *Ridolfi G., Mooij E., Chiesa S.* A Modeling Framework for the Concurrent Design of Complex Space Systems // AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference 2–5 August 2010, Toronto, Ontario, Canada.
18. *Bandecchi M., Melton B., Gardini B., Ongaro F.* The ESA/ESTEC Concurrent Design Facility // Proceeding of EuSEC 2000. P. 329–336.
19. *Бендерская Е. Н., Толстов А. А.* Тенденции развития средств аппаратной поддержки нейровычислений // Научно-технические ведомости СПбПУ, 2013, вып. 3 (174). С. 9–17.
20. *Клименко Н. Н.* Современные космические аппараты для информационного обеспечения войск на театре военных действий // Воздушно-космическая сфера, 2018, № 1 (94). С. 43–53.