

УДК 629.7

**ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМ ПОЛЕТОМ**

© 2020 С.В. Соловьев

ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва»,
г. Королёв, Московская обл., Россия

Статья поступила в редакцию 03.12.2020

В статье исследуются вопросы формирования принципов построения алгоритмического обеспечения интеллектуализированной системы контроля при управлении космическим полетом. Кратко проанализированы особенности применения «классических» стохастических моделей для космических аппаратов (КА). Компенсировать указанные недостатки предлагается осуществлением внедрением интеллектуализированной системы контроля. На основе современных подходов предлагается использование цифровых интеллектуальных моделей функционирования КА на основе технологических знаний, в качестве которых выступает телеметрическая информация. Изложен подход, основанный на разработке и комплексировании методов сочетающих интеллектуальную идентификацию отдельных составных частей КА с помощью различных алгоритмов анализа для имитационного моделирования функционирования КА в целом. Сформулированы основные требования к интеллектуализированным системам контроля и решаемые задачи, с учетом особенностей процесса управления космическим полетом. Укрупнено представлен принцип методики контроля с использованием цифрового двойника созданного на основе реальных данных функционирования КА.

Ключевые слова: Космический аппарат, управление полетом, система контроля, интеллектуализация, анализ состояния.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-6-72-77

ВВЕДЕНИЕ

Современный космический аппарат (КА) следует рассматривать как чрезвычайно сложную техническую систему, возможности по изменению к текущим условиям полета у которой ограничены. В этой системе идут многочисленные функциональные процессы, информация о которых, как правило, незначительна и недостаточна только для определения «нормы» или подтверждения самого функционального процесса. Изменения тем не менее присутствуют, проявляя себя весьма малозаметными факторами. С течением времени в процессе орбитального полета КА эти изменения накапливаются, отчасти взаимно влияя и усиливая друг друга, могут приводить к неожиданным масштабным последствиям, естественно негативного свойства.

Незначительные изменения в рамках диапазона допустимых изменений параметров, в течении инкубационного периода, при этом очевидно не связанных друг с другом может в совокупности привести к негативным последствиям. В настоящее время, подобное явление, именуемое «Drifting into failure» «сползание в

аварию», является актуальным для сложных технических систем. Анализ и расследования многих техногенных катастроф указывает именно подобный сценарий их зарождения и развития. Наиболее трагическим примером в космической сфере можно считать случай при последнем полете КА Space Shuttle «Columbia», когда произошла катастрофа во время его 28 полета 01.02. 2003 года.

Объективно при управлении космическими полетами анализ технического состояния, особенно оперативный в режиме реального времени, существенно затруднен. Ограниченная автоматизация процессов контроля требует решать задачи анализа специалистами службы управления. Для человеческих возможностей и восприятия, скорость протекающих процессов на КА довольно высока, что усугубляется наличием различных полетных операций, характерными особенностями отдельного КА и большим числом взаимосвязей между составными частями КА и т.д. В практике управления полетом не единичны случаи, когда заранее разработанные методы и алгоритмы анализа состояния КА не дают однозначного понимания ситуации на борту КА. В этих случаях приходится применять экспертные суждения, вероятностные оценки либо откладывать время

Соловьев Сергей Владимирович, кандидат технических наук, ведущий конструктор. E-mail: post@rscf.ru

получения результатов анализа для осуществления моделирования ситуаций.

В этих условиях для обеспечения безопасного процесса управления полетом КА и безусловной реализации программы полета за счет устранения вышеперечисленных явлений в сложных технических системах нужны принципиально новые модели, методы и средства интеллектуализированного анализа телеметрической информации (ТМИ) КА. Основные задачи при этом состоят в извлечении новых и неочевидных знаний, смысловую интерпретацию наблюдаемых данных, прогнозирование развития событий и моделирование их возможных последствий т.д.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Даже с учетом успеха развития информационных технологий, применение «классических» стохастических моделей для сложных технических объектов, к которым безусловно относятся современный КА, является проблематичным. Причиной тому служит принципиальная невозможность учета в модели не только всей априорной информации, но и настройка моделей в условиях структурных и параметрических возмущений в процессе космического полета и особенно при большой длительности эксплуатации КА, которая уже значительно превышает 10 лет для многих типов космической техники.

Решение вышеперечисленных задач предлагается осуществлять на основе системного анализа, теории управления космическими полетами, теории автоматического управления, математической статистики, теории идентификации и теории интеллектуального анализа данных. Гармоничное сочетание указанных новых интеллектуальных методов анализа данных и с традиционных, зарекомендовавшими себя на практике, математическими моделями, методами и алгоритмами является многообещающим направлением совершенствования систем телеметрического контроля и расширяет возможности анализа ТМИ.

В настоящей работе излагается принцип построения цифровых интеллектуальных моделей функционирования КА на основе ТМИ, выступающих в роли технологических знаний в том числе для обеспечения прогнозирования дальнейшего состояния КА. Для данной цели представленные алгоритмы помимо прочего реализуют и функцию прогнозного моделирования, которые основаны на индуктивном обучении, что позволяет формализовать процесс выявления аналогов текущего состояния и функционирования КА. В результате создается цифровая математическая модель КА как сложного

технического объекта, используемая для моделирования и опережающих прогнозов развития возможных аномальных или НШС. При этом данная модель реализует функцию опережения относительно эксплуатируемого КА. Интеллектуальная система, построенная на указанных принципах, реализует не только комплексный анализ текущей программы полета и состояния функционирования КА, но и осуществляет прогнозирование состояния КА на долгосрочную перспективу. При эксплуатации КА цифровая модель постоянно расширяется в части базы знаний на основе информации от выполненных полетов или этапов текущего полета КА. Так, например, в случае возникновения нового типа аномалии или НШС во время полета КА база знаний по завершению парирования аномалии или НШС расширяется, т.е. добавляются знания по признакам данной аномалии или НШС и выработанным рекомендациями по ее парированию. После включения в базу знаний данная информация будет использоваться в следующих полетах данного типа КА или на последующих этапах полета данного КА, а также будет введена в существующую эксплуатационную документацию.

Идентификационные модели сценарного прогнозирования предназначены для использования в системах поддержки принятия решений в системах оперативного управления совместно с имитационными моделями. Разработанные методы предсказательного моделирования нелинейных нестационарных объектов на основе интеллектуализированных алгоритмов анализа ТМИ и нечеткой логики представляют собой механизм использования базы технологических знаний функционирования объекта в системах управления реальным временем. Методы построения нелинейных моделей состояния сложных объектов на основе идентификационного анализа с использованием совместно с имитационными моделями, предоставляют выраженное преимущество, по сравнению с известными подходами, как по точности прогнозирования, так и по эффективности соответствующих информационно-управляющих систем и систем поддержки принятия решений.

Для ряда практических разработок систем управления на сегодняшний день характерным является подход, когда формирование управляющих воздействий осуществляется с большим ресурсным запасом. При этом, если в данный момент (на данном такте) решение не удовлетворяет заданному критерию качества управления, начинается формирование следующего управляющего воздействия – в изменившихся условиях – как внешней среды, так и состояния КА. При этом не гарантируется, что новое решение будет удовлетворительным (если оно вооб-

ще будет существовать). Представляется более эффективным реализовать схему управления на основе предсказательного моделирования. Основой функционирования интеллектуальной системы управления становится динамическая оценка и интеллектуальное прогнозирование состояния КА с целью адаптивного управления и динамической поддержки принятия решений. Однако для сложных объектов классический подход к построению прогнозирующих идентификационных моделей может быть сопряжен с трудностями непреодолимого характера.

СИНТЕЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ И ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ

В настоящей работе для формирования цифровой идентификационной модели КА предлагается подход, основанный на разработке и комплексировании методов сочетающих интеллектуальную идентификацию отдельных составных частей КА с помощью различных алгоритмов анализа для имитационного моделирования функционирования КА в целом.

КА как объект управления и составная часть сложной технической системы как правило не допускает проведение активных экспериментов. Кроме того, говорить об идентификации с целью исследований (а не управления) для обеспечения процесса управления полетом допустимо только на основе анализа данных их реального функционирования и содержащихся в ТМИ этого КА.

Идентификационную математическую модель не следует путать с математическим описанием функционирования КА или его составной части, полученным на основе применения известных законов (физических, химических, и т.д.), либо на основе расчетов (технологических, инженерных и т.п.). Хотя все перечисленные модели также являются математическими.

Понятие данные подразумевает совокупность различных объективных фактов о предметной области. Под данными функционирования КА или его составной части будем понимать данные реального функционирования содержащиеся в ТМИ, а также извлекаемые из архива ТМИ – индуктивные знания. Постоянное пополнение знаний в ходе наблюдений за реально функционирующей системой позволяет создать альтернативу итеративной настройке идентификационной модели, что особенно актуально для нелинейных и нестационарных систем, к которым и относятся КА. В результате анализа данных всеми возможными способами получают знания или информация, используемая в процессе управления космическим полетом, в данном случае, знания являются результатом работы интеллектуализированной системы контроля.

С учетом задач контроля и особенностей процесса управления космическим полетом, а также необходимости осуществления анализа в режиме реального времени непрерывно в течение всего периода орбитального полета, основные требования к интеллектуализированным системам контроля можно сформулировать следующим образом:

- способность определять аномалии и НШС, нерассмотренные в документации и не прогнозируемые аналитически;

- адекватность результатов, т.е. в процессе анализа ТМИ должны получаться достоверные данные, соответствующие реальному функционированию КА и его составных частей;

- решение задачи анализа ТМИ должно осуществляться в масштабе времени, максимально близком к реальному;

- высокая чувствительность, т.е. максимально возможное заблаговременное определение предвестника возникновения НШС или какого-либо проявления аномалии или отклонения в функционировании или состоянии составных частей КА;

- автоматическая реализация процесса анализа, при котором оператор непосредственно не участвует, а получает только результат работы предлагаемого метода.

Задачи, решаемые интеллектуализированной системой контроля состояния КА:

- автоматизированное выявление скрытых событий, аномалий и НШС;

- автоматизированное выявление причин появления аномалий и НШС;

- количественная оценка ресурса прибора, агрегата, составной части КА;

- прогноз «располагаемого времени» до наступления критического события;

- установление закономерностей, деградаций и тенденций в изменении характеристик оборудования составных частей КА.

В основу построения системы контроля в части решения задач анализа ТМИ КА, должны быть заложены принципы автоматизации и интеллектуализации. Их реализация связана с созданием методов анализа, сводящей к минимуму участие человека. При построении подобной интеллектуальной системы контроля должны быть использованы положения теории ситуационного управления, применяемой для автоматизации интеллектуальных функций управления сложными системами организационно-диспетчерского типа.

Большое число разнообразных методов интеллектуального анализа данных, используемых в настоящее время в различных технических и технологических сферах деятельности человека, продемонстрировали свои качественные преимущества. Задачи анализа ТМИ, непрерывно

решаемой в течении всего периода орбитально-го полета КА, являются характерным примером использования интеллектуального анализа для прикладных технических задач.

Состояние ресурсов и фактическая величина технических характеристик КА является важными факторами при осуществлении управления космическим полетом и в значительной степени определяет возможность реализации программы полета. Представляется целесообразным в качестве идентификационной модели комплекса ресурсов рассматривать цифровой двойник КА. Под цифровым двойником будем понимать результат обработки ТМИ, актуальный для текущего момента времени. Этот результат позволит оценить, как состояние отдельных ресурсов и уровень деградации определенных технических характеристик, так и степень взаимовлияния ресурсов. По сути, актуальный результат обработки ТМИ представляет собой динамический слепок (текущий набор) аналитических выводов о состоянии комплекса на основе анализа реальных данных ТМИ (текущих и архивных). В этом коренное отличие от имитационной модели, которая может лишь приближенно моделировать реальное функционирование КА на основе математического описания свойств элементов реального КА или его составных частей.

Это также позволит автоматически, без участия специалистов разработчиков составных частей КА построит математическую модель нормального/номинального или среднестатистического поведения КА, которую в дальнейшем использовать как эталонную. Применяя эталонную модель КА и анализируя фактическую ТМИ можно выявить скрытые закономерности данных, которые позволят задним числом проанализировать неисправность и определить симптомы и причины ее возникновения.

Базовые принципы формирования цифровой идентификационной модели КА, на основе данных от интеллектуализированной системы контроля следующие:

- использование достоверной информации, особенно на этапе обучения;
- постоянное пополнение данными цифрового двойника КА в процессе работы системы;
- применение различных математических аппаратов для алгоритмов, реализующих процедуры извлечения знаний из поступающих данных.

Важной отличительной особенностью интеллектуального анализа, является ее универсальность, то есть возможность применения для различных КА без существенных изменений. Это следствие того, в основе лежат математические инструменты и алгоритмы, которые не привязаны к конструктивным особенностям КА, а работа осуществляется с данными поступаю-

щими при их работе. Традиционное применяемое специализированное ПО предназначенное для контроля и анализа полета КА, в значительной степени индивидуально для каждого отдельного КА. Аналогичные задачи для другого по конструкции КА, решаются соответственно другими автоматизированными системами, имеющими другие алгоритмы, контролируемые параметры и допустимые значения параметров. Интеллектуализированные методы анализа как бы не видит объекта, который генерирует данные, а осуществляет только анализ нормального «виртуального» состояния в сравнении с текущим состоянием. Иначе есть «портрет здорового КА», который подтвержден или проверен, в том числе исходя из анализа традиционными методами. Подобную систему можно «научить» анализировать данные с любого КА, не прибегая к изменениям алгоритмов анализа. Это качество особенно ценно ввиду того что современные КА становятся все более разнообразными в части используемого бортового оборудования и конструктивно сложными.

Анализ возможностей математического аппарата обработки данных и обобщения опыта управления полетом КА с учетом потребностей специалистов управления можно выделить следующие направления в построении интеллектуализированной системы контроля:

- оперативная, обобщенная, комплексная оценка состояния КА и его составных частей на базе методов кластерного анализа данных;
- выявление, локализации и определение аномалий и НШС в функционировании отдельной составной части КА на базе методов использования вейвлет-преобразований;
- прогнозирование параметров состояния КА, его характеристик и их деградации во времени на основе методов анализа временных рядов.

Решение различных и многочисленных задачи контроля состояния КА в процессе управления космическим полетом приводит к необходимости синтеза различных алгоритмов контроля на основе интеллектуализированных методов анализа ТМИ.

Принципиальным моментом любых методов интеллектуализированного анализа данных является двухэтапный режим работы. На первом этапе «обучения/моделирования», по данным ТМИ, собранным при номинальной работе КА, с использованием различных алгоритмов строится база данных номинальных состояний, соответствующих нормальному (среднестатистическому) или штатному функционированию КА. Соответствие этой базы верифицируется применением стандартных, традиционных процедур по анализу технического состояния КА. Данные для этого очевидно берутся на предыдущих этапах полета или на аналогичных КА. Обрабо-

танные с помощью алгоритмов интеллектуального анализа данные ТМИ при этом формируют базу знаний – номинальных состояний КА.

Для впервые эксплуатируемых КА или КА функционирующих по уникальной программе полета или с иными явными и неявными отличиями, создание базы данных номинальных состояний реализуются отдельным способом. Любой без исключения КА проходит этап летных испытаний, который осуществляется в начале полета КА после выведения на рабочую орбиту и перед его эксплуатацией по назначению. Основная цель данного этапа всесторонняя проверка и подтверждение характеристик КА и его составных частей, заданных в техническом задании. Поэтому на данном этапе к анализу ТМИ получаемой с испытуемого КА подключается большое количество специалистов, в том числе и разработчиков отдельных составных частей КА. Программа летных испытаний, как правило, включает подтверждение свойств и технического состояний КА при всех режимах работы, реализуемых КА и его составными частями. Это позволяет подробно и углубленно понять реальное техническое состояние КА в эксплуатационных условиях орбитального полета. В случае завершения этапа летных испытаний КА с положительным заключением, можно принять, что сформирована и верифицирована база номинальных состояний КА.

На втором этапе, «рабочем» производится анализ технического состояния КА. В режиме реального времени поступает текущая ТМИ от КА, производится анализ (на основе соответствующих алгоритмов) и результаты обработки соотносятся с данными из базы номинальных состояний. Если устанавливается соответствие (по определенному критерию) данных из базы с поступившими данными, то входящие данные пополняют «номинальную» базу данных. При несоответствии фиксируется отклонение и происходит предупреждение оператора о выявленной аномалии.

Основу методики составляет последовательное применение трех вышеуказанных математических инструментов для обработки данных ТМИ, полученной при эксплуатации КА. В настоящей работе назначением метода кластерного анализа является выявление аномалий в работе составных частей КА, назначением метода вейвлет-анализа является локализация аномалий в составной части КА, метод анализа временных рядов предназначен для определения тренда изменения значений отдельных ТМП и определения располагаемого времени. Вся первичная информация о состоянии и изменениях приборов, агрегатов составных частей хранится в виде файлов архива ТМИ, полученной на земле с борта КА являясь объектом для обработки.

Архив изучается и анализируется специалистами, однако вопросы взаимовлияния систем, труднообъясняемых внешних или посторонних воздействий, накопление влияющих факторов подлежат дальнейшему исследованию с использованием современных математических возможностей.

На основе изложенных принципов реализуется создание универсального аналитического инструмента для контроля состояния КА и его составных частей. Верификация данного аналитического инструмента предусматривается на реальной ТМИ однотипных КА. Тем самым решается задача формирования цифрового двойника составных частей КА и поиск аномалий, отклонений, в том числе труднообъяснимых тривиально, «наглядно», имеющие причиной более глубокие или пока не установленные взаимосвязи. После выявления аномалий проводится их локализация в составных частях. Определение тенденций изменений ресурсов и технических характеристик КА на любой временной базе, а также установление возможной корреляции аномалий с внешними факторами, воздействующими на КА, и корреляции причин между собой. Это позволит выявить причины возникновения аномалий.

ВЫВОДЫ

Существует разнообразный современный математический аппарат, реализующий способность «думать» или выявлять неочевидные и скрытые явления в объеме данных, что позволит повысить качество или интеллектуализировать процедуры контроля состояния КА.

Современный инструментальный интеллектуализированного анализа данных дает очень широкий выбор возможностей для различных применений, со своими преимуществами и недостатками, поэтому для практического применения в задачах контроля необходимо задействование принципиально различных методов анализа данных, что в целом дает синергетический эффект и существенно повысит эффективность.

Синтез алгоритмов интеллектуального анализа в задачах контроля при управлении полетом КА позволяет сформировать комплексную методику автоматизированного анализа и прогнозирования состояния КА, способную решить все основные задачи анализа, включая обнаружение и локализацию аномалий, отклонений и НШС в составных частях КА и КА в целом, прогнозирования состояния в части развития выявленных аномалий, отклонений и НШС и автоматического формирования располагаемого времени в случае их обнаружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полётами. Часть 2. Учебное пособие // Изд-во. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2010. – 428 с.
2. Кравец В.Г. Автоматизированные системы управления космическими полетами. М.: Машиностроение, 1995.
3. Ведерникова М.М., Скурский Ю.А., Спиринов А.И. Контроль работы сложных технических систем. Средства информационной поддержки // Труды XVII международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». 2015. С. 115-125.
4. Соловьев В.А., Любинский В.Е., Жук Е.И. Текущее состояние и перспективы развития системы управления полетами космических аппаратов // Пилотируемые полеты в космос. 2012. - №1(3). С. 15 – 26.
5. Бахтадзе Н.Н., Лотоцкий В.А. Современные методы управления производственными процессами // Проблемы управления. 2009. №3.1. С. 56-63.
6. Микрин Е.А., Пелихов В.П. Анализ нештатных ситуаций и критичности программного обеспечения в проекте международной космической станции // Проблемы управления. 2003. №4. С. 52-54.
7. Микрин Е.А. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2003. - 335 стр.
8. Пупков К.А., Коньков В.Г. Интеллектуальные системы. Исследование и создание. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана 2003. 348 с.
9. David L. Iverson. Data Mining Applications for Space Mission Operations System Health Monitoring. NASA Ames Research Center, Moffett Field, California, 94035. DOI: 10.2514/6.2008-3212.
10. Цыпкин Я.З. Информационная теория идентификации. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 336 с.
11. Теория управления. (Дополнительные главы). Учебное пособие [под редакцией Новикова Д.А.]. – М.: ЛЕНАНД. 2019. – 552 с.

**PRINCIPLES OF CONSTRUCTING ALGORITHMIC SUPPORT
FOR AN INTELLECTUALIZED CONTROL SYSTEM FOR SPACE FLIGHT CONTROL**

© 2020 S.V. Soloviev

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia, Korolev, Moscow area, Russia

The article examines the issue of forming the principles of constructing algorithmic support for an intellectualized control system during space flight control. The features of the application of “classical” stochastic models for spacecraft (SC) are briefly analyzed. It is proposed to compensate for these shortcomings by introducing an intellectualized control system. On the basis of modern approaches, it is proposed to use digital intelligent models of spacecraft functioning on the basis of technological knowledge, which is telemetric information. An approach based on the development and integration of methods combining intelligent identification of individual components of a spacecraft using various analysis algorithms for imitating the functioning of the spacecraft as a whole is presented. The basic requirements for intelligent control systems and the tasks to be solved are formulated, taking into account the peculiarities of the space flight control process. The principle of the control technique using a digital twin created on the basis of real data of the spacecraft functioning is enlarged.

Key words: Spacecraft, flight control, control system, intellectualization, state analysis.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-6-72-77