

МЕТОДИКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ РС МКС НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

С.В. Соловьев

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им С.П. Королева
Россия, 141070, МО г. Королев, ул. Ленина, 4
E-mail: sergey.soloviev@scsc.ru

Д.В. Сысоев

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им С.П. Королева
Россия, 141070, МО г. Королев, ул. Ленина, 4
E-mail: denis.sysoev@rsce.ru

Ключевые слова: управление полетом, международная космическая станция, телеметрическая информация, контроль состояния, интеллектуальный анализ, прогнозирование, идентификация.

Аннотация: В докладе изложены основы методики интеллектуального анализа и прогнозирования состояния, применимой для задач контроля при управлении полетом международной космической станции. Рассмотрены основы математических методов на базе которых строится идентификационная модель. Представлены основные задачи, решаемые с помощью предложенной методики и принципиально описан алгоритм прогнозирования состояния. Сформулированы основные результаты тестовой апробации, проведенной на основе анализа архивной телеметрической информации.

1. Введение

Международная космическая станция (МКС), орбитальное строительство которой началось 20 лет тому назад, в настоящее время является самым грандиозным международным научно-техническим проектом. В перспективе до 2024 года МКС продолжит создаваться, обновляться и расширяться. По состоянию на начало 2019 год в состав МКС входит 15 основных орбитальных модулей (ОМ). Российский сегмент (РС) МКС, включает в свой состав 5 ОМ и транспортные корабли типа «Союз» и «Прогресс». Для обеспечения эксплуатации РС МКС непрерывно осуществляется процесс управления полетом. Неотъемлемой частью данного процесса значиться задача контроля состояния с целью реализации программы полета. С учетом масштабов, технической сложности и постоянного изменения функциональных действий на борту МКС, задача контроля решается с использованием большого объема разнородной информации и с переменными изменяющимися внешними воздействующими факторами.

Результаты контроля состояния служат основой для принятия всех управленческих решений по реализации программы полета или, при выявлении отклонений в состоянии переходе в режим полета с ограниченной функциональностью. С точки зрения временной последовательности действий и логики управления контроль полета условно мож-

но разделить на две составные части: оперативный контроль состояния бортовых систем и послесезонный анализ. Основными задачами последнего является детальное изучение происходящих на борту процессов и выявление их взаимосвязи с контролируруемыми параметрами, включая также их изменения во времени для выявления отказов, аномалий и тенденций к их возникновению. Для решения задач контроля состояния БС РС МКС в условиях увеличения количества контролируемых телеметрических параметров в настоящее время создаются средства дополнительной информационной поддержки специалистов управления полетом. Необходимость создания именно автоматизированной системы определяется значительным суммарным объемом располагаемой информации, вследствие чего обработка «вручную» даже для относительно простых процессов и взаимосвязей не представляется возможной.

Для целей управления полетом столь сложного и большого объекта как РС МКС, весьма привлекательным выглядит применение различных направлений интеллектуализации или глубинного анализа данных для решения задач контроля. В настоящее время в технических приложениях существуют интересные предложения и решения по применению интеллектуальных способов обработки информации для решения тех или иных технических задач.

Анализ возможностей и обобщения опыта управления МКС с учетом потребностей специалистов ГОГУ показал, что для решения поставленной задачи можно применить следующие математические инструменты: кластерный анализ данных, вейвлет-преобразования и анализ временных рядов.

2. Математическая модель

Практика работ по управлению полетом показывает, что применение единого метода анализа не позволяет получать достоверные и всеобъемлющие данные о состоянии РС МКС и выполнении программы полета. Поэтому для решения задач контроля используется вся доступная информация (телеметрическая, доклады экипажа, телевизионная и т.п.) так различные методы, алгоритмы и способы ее анализа.

В рассматриваемой методике математическая модель строится на основе трех базовых математических способов интеллектуальной обработки информации.

Учитывая сложность космической техники, ее состояние контролируется с использованием большого числа телеметрических параметров (ТМП). С целью обеспечения полноты решения задач анализа, ТМП группируется по определенным правилам и принята определенная иерархия в работе с ними. Базовый принцип это привязка ТМП к каждой составной части РС МКС. Таким образом состояние отдельной составной части характеризуется совокупным набором ТМП. В основе математической модели с использованием кластерного анализа данных лежит многомерный вектор, который построен по полученным значениям ТМП для отдельной составной части РС МКС. Например, если составная часть контролируется по 156 ТМП, полученный вектор будет 156 мерным. Поскольку ТМП разнородны по своей природе, производится линейная нормализация с целью приведения к одному диапазону.

Так как задачу кластеризации можно ставить как задачу дискретной оптимизации: необходимо так приписать номера кластеров объектам, чтобы значение выбранного функционала качества приняло наилучшее значение. В предлагаемой модели принято среднее внутрикластерное расстояние минимально, сумма средних внутрикластерных расстояний минимальна и среднее межкластерное расстояние максимально. В модели использован метод кластеризации – K-средних (k-means).

На первом этапе, обучения, анализируются данные ТМИ, собранные в период нормальной работы РС МКС на начальных этапах полета, для построения идентификационной модели. Для этого значения ТМП при текущем значении времени, образуют вектор в N -мерном пространстве. В модели параметры связаны друг с другом во время нормальной работы, образуя область в векторном пространстве, где содержатся номинальные данные. На втором этапе, рабочем, производится собственно интеллектуальный анализ. Архивная ТМИ КА преобразуется в вектора в векторном пространстве. Для каждого входного вектора, вычисляется расстояние от ближайшей номинальной рабочей области полученной на этапе обучения. Данные, которые соответствуют нормальным будут иметь отклонение расстояние, равное нулю. Если один или более расстояний немного за пределами ожидаемых значений, небольшой ненулевой результат анализируется повторно для новых поступающих данных. Как входящие данные отклоняется дальше от нормальных данных полученных при обучении, фиксируется это отклонение и появляется признак аномалии привязанный к временной шкале.

Математическая модель вейвлет-преобразований основана на искусственном построении «сигнала» по значениям ТМП следующими в потоке ТМИ периодически и привязана к шкале времени. В результате сплайновой аппроксимации значений получается кривая, которую можно рассматривать как «сигнал» для дальнейшего математического преобразования и анализа. То-есть в данном методе идентификационная модель строится по отдельным ТМП, что позволяет локализовать аномалии или отклонения в работа составной части РС МКС.

Для проведения анализа выполняется построение семейства вейвлет-функций, скалярное произведение которых с исходным сигналом составляет поле коэффициентов преобразования, имеющего возможность отразить как частотные, так и временные изменения сигнала. Для построения семейства применяются параметры: масштабный коэффициент a и сдвиг по времени τ . Масштаб представляет частотную меру, определяющую детализацию преобразования и обратно пропорциональную частоте. Масштабирование, как математическая операция, расширяет или сжимает сигнал. Если при заданном значении масштаба и сдвига значение преобразования оказалось большим, следовательно, при этом масштабе и сдвиге в исходном сигнале существует участок, похожий на анализируемый вейвлет. Из этого следует возможность обнаружения в заданном ряде значений ТМП изменений, похожих на вейвлеты. В итоге получаем частотное наполнение сигнала и моменты времени возникновения соответствующих этим частотам изменений в сигнале, то есть – обнаруживаем факт появления аномалии в локальном месте составной части РС МКС.

Поскольку формирование ТМИ происходит за счет последовательной фиксации значений ТМП, через равные промежутки времени, такую последовательность можно рассматривать как классический временной ряд и применять в этом случае разнообразный и многофакторный математический аппарат.

В текущем методе используется, изменение свойств случайной последовательности в случае неизвестного распределения момента изменения. Момент изменения свойств случайной независимой последовательности ТМП ($Y_1 \dots Y_t$), которая до момента наступления нехарактерного/неноминального тренда описывается распределением с плотностью $f_{\theta_0}(Y_t)$, а после – распределением с плотностью $f_{\theta_1}(Y_t)$ и определяется как решение оптимизационной задачи. После чего, получаем последовательность, которая до момента t_a представляет собой гауссовский процесс с нулевым средним и единичной ковариационной матрицей, а с момента начала нехарактерного/неноминального тренда вид регрессии. До момента начала тренда последовательность будет выбеленной и декоррелированной, все собственные значения которой равны единице. Свойства ковариационной матрицы, вычисленной после вступления сигнала, изменяются.

3. Основа методики

В основу методики составляет последовательное применение трех вышеуказанных математических инструментов для обработки архивной ТМИ полученной при эксплуатации РС МКС. В настоящей работе назначением кластерного анализа является выявление аномалий, назначением вейвлет-анализа является локализация аномалий в составной части РС МКС, анализ временных рядов предназначен для определения тренда изменения значений отдельных телеметрических параметров. Вся первичная информация о состоянии и изменениях приборов, агрегатов составных частей хранится в виде файлов архива ТМИ полученной на земле с борта РС МКС 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.

Комплекс работ по интеллектуальному анализу архивной ТМИ РС МКС имеет целью детальное количественное определение фактического состояния и прогнозирование ресурсных свойств объекта на основе идентификационных моделей. Для этого создается универсальный программно-аналитический аппарат (аналитический инструмент) для послесансного анализа архивной ТМИ, на основе имеющейся архивной ТМИ сформировать идентификационные модели (провести «обучение» аналитического инструмента) и провести интеллектуальный анализ архивной (за длительный период) и поступающей в настоящее время ТМИ.

Результатом работы по данному направлению будет создание универсального аналитического инструмента для послесансного анализа ТМИ за длительный (вплоть до полного времени полета) период. Верификация данного аналитического инструмента предусматривается на модельных сценариях (когда файл с ТМИ формируется искусственно) и на реальных ситуациях появления аномалий в системах РС МКС. Тем самым решается задача поиска аномалий, отклонений, в том числе труднообъясняемых тривиально, «наглядно», имеющие причиной более глубокие или пока не установленные взаимосвязи. После выявления аномалий проводится их локализация в составных частях. Определение тенденций изменений ТМП на любой временной базе и с любыми коэффициентами масштабирования по времени. Это делает возможным оценку располагаемого времени до появления аномалий. Установление возможной корреляции аномалий с внешними факторами, воздействующими на РС МКС, и корреляции причин между собой. Это позволит выявить причины возникновения аномалий.

4. Тестовая апробация

Перечисленные методы интеллектуального анализа и прогнозирования состояния РС МКС на основе идентификационных моделей, в настоящее время, проходят апробацию на тестовых задачах. Предварительные результаты продемонстрировали положительные результаты.

Для метода на основе кластерного анализа была использована ТМИ от одной из бортовых систем транспортного пилотируемого корабля (ТПК) типа «Союз». Контроль состояния и функционирования данной системы осуществляется на основе 8 телеметрических параметров, которые измеряются независимыми аналоговыми датчиками температуры (4 шт.) и давления (4 шт.). Идентификационная модель строилась с использованием архивной ТМИ, полученной при полете трех ТПК типа «Союз». Далее в

модель заводилась ТМИ, полученная от другого ТПК типа «Союз», при полете которого, традиционными способами анализа, были зафиксированы аномальные значения температур. В результате кластерного анализа были получены данные которые однозначно качественно демонстрировали данную аномалию с корреляцией по времени ее появления, нарастания и спада.

Апробация метода анализа с помощью вейвлет-преобразований выполнялась для параметра температуры хладона на входе компрессора, системы кондиционирования воздуха одного из модулей РС МКС. Для анализа использованы данные в период, когда произошла нештатная ситуация (НШС) в указанной бортовой системе. Математическое преобразование четко фиксирует изменение параметра на том самом временном участке, где происходит НШС, что позволит автоматически фиксировать подобные события.

5. Заключение

Постановка задачи о поиске закономерностей в работе систем и комплекса РС МКС в целом в смысле, оговоренном выше, является своевременной, обоснованной и актуальной по следующим основным причинам:

- наличие уникальной базы информации за 20 лет эксплуатации РС МКС;
- продолжающаяся в настоящий момент эксплуатация комплекса и предполагаемое в дальнейшем продолжение полета;
- с увеличением длительности полета РС МКС число аномалий, отклонений и скорости деградации в подверженных влиянию времени системах будет естественным образом увеличиваться;
- необходимость прогнозирования поведения системы в будущем с учетом возрастания ВВФ, что позволяет не только пассивно наблюдать за старением системы, но и активно влиять на уменьшение факторов старения в случае успешного их выявления;
- автоматизированное определение скорости деградации позволяет иметь автоматическое определение остаточного ресурса или располагаемых запасов.

Имеющийся математический аппарат и архивные данные позволяют приступить к решению поставленной задачи.

Список литературы

1. В.А. Соловьев, Л.Н. Лысенко, В.Е. Любинский. Управление космическими полетами: учеб. пособие: в 2 ч. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. Ч. 2. 426 с.
2. Сакрутина Е.А., Бахгадзе Н.Н.. Идентификация систем на основе вейвлет-анализа // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 2868-2889.
3. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: Солон-Р, 2002. 448 с.
4. Muggleton S., De Raedt L. Inductive Logic Programming: Theory and methods // The Journal of Logic Programming 1994. Vol. 19-20, Suppl. 1. P. 629-679
5. Woodward W.A., Gray H. L., Elliott A.C. Applied Time Series Analysis // CRC Press. 2012. P. 197-230.