

*Александр Николаевич Загорулько
Сергей Михайлович Кучерук*

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

Постановка проблемы. Анализ последних исследований и публикаций

Система управления космическими аппаратами (КА), находящимися на геостационарной орбите (ГСО), обладает рядом отличий от систем управления аппаратами на низких околоземных орбитах.

Основными из них являются [11-12]:

отсутствие перерывов в сеансах связи из-за взаимного перемещения КА и наземной станции управления;

возможность применения следящего метода управления в реальном масштабе времени с использованием, в основном, команд немедленного исполнения.

При этом система управления КА на ГСО работает в условиях [1,11-12]:

большой протяженности радиолинии, что приводит к задержкам (до 250-600 мс) и ослаблению (до 200 dB) сигналов;

территориальных ограничений (зона видимости спутника с наземной станции управления ограничена 76,5 град. северной и южной широты при угле возвышения 5 град.).

повышенных требований по точности удержания на орбите для совместного размещения в одной точке стояния нескольких КА (на геостационарной орбите определено на сегодня около 425 точек стояния спутников. Угловые расстояния между этими точками различны и лежат в довольно широком интервале 0,1...7 град. В каждой точке может находиться несколько спутников – даже более 10);

высоких требований к системе ориентации КА для формирования узких лучей диаграммы направленности бортовых антенн;

необходимости контроля уровней излучения стволов транспондеров на больших территориях;

обработки больших объемов информации (измерительной, телеметрической) в реальном масштабе времени для принятия решений;

длительных сроков эксплуатации как наземного, так и космического сегментов (до 10-15 лет).

Отсюда следует, что без автоматизации всех звеньев системы управления, в первую очередь системы контроля функционирования бортовых систем КА, достичь требуемых показателей оперативности, надежности и достоверности управления КА не представляется возможным.

В работах отечественных и зарубежных ученых [1-7] достаточно подробно освещены общие вопросы автоматизации процесса управления сложными техническими системами, методология и требования к системам контроля. Стремительное развитие средств вычислительной техники, информационных технологий, с одной стороны и тенденции усложнения космического сегмента – с другой, диктуют необходимость поиска новых идей и подходов в развитии форм и методов оценки технического состояния и результатов работы бортовых систем.

Формулирование цели статьи.

Изложение основного материала

Исходя из вышеизложенного, целью работы является анализ тенденций развития методологии контроля и диагностики состояния бортовых систем КА и разработка путей усовершенствования многоуровневого распределенного оценивания состояния бортовых систем КА в реальном масштабе времени для условий геостационарной орбиты.

К задачам контроля и диагностики состояния бортовых систем КА можно отнести [2,4-6]:

определение параметров движения центра масс КА и параметров движения КА вокруг центра масс;

анализ функционирования бортовых систем КА при выполнении ими целевых функций;

диагностика состояния бортовых систем КА, выявление аномальных и предельных ситуаций.

В общем случае, система контроля – совокупность технических устройств, осуществляющих измерение параметров и контроль состояния и поведения объекта по заданному алгоритму в соответствии с программой управления U [1].

Формирователь преобразует пространство технических состояний КА S^T в пространство выходных сигналов Y

$$Y(S^T \rightarrow Y).$$

Классификатор на основе поступивших с формирователя пространства выходных сигналов Y указывает на принадлежность технического состояния КА соответствующему классу состояний ($Y \rightarrow S^T$).

Информатор на основе поступающих с формирователя Y и классификатора X сигналов

выдает информацию о техническом состоянии КА, преобразуя пространства выходных сигналов Y и X в пространство сообщений C:

$$C(Y, X \rightarrow C).$$

Для систем контроля общими являются процессы формирования информации о контролируемых объектах, классификация их технических состояний, выдача информации о техническом состоянии объекта и его управлении [1-6].

Оценка качественных и количественных характеристик текущих значений показателей работоспособности и качества выполнения функций служебной и специальной аппаратуры КА производится путем соответствующей обработки и анализа телеметрической информации (ТМИ).

Обработка телеметрической информации связана с выбором и раскоммутацией параметров из общего входного потока, определением их числовых (физических) значений с привязкой к шкале времени, выделением из всех поступивших измерений лишь существенных и достоверных отсчетов параметров (устранение синтаксической избыточности).

Повышение достоверности телеметрических данных производится путем n-кратного подтверждения измерений [2-3].

Измерение x_i считается достоверным в цикле проверки, если для всех n-измерений выполняется условие:

$$\left| \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \right| < \Delta d, \quad i=1 \dots n,$$

где Δt – период опроса параметра;

Δd – ценз достоверности.

Сокращение избыточности телеметрических данных (выделение существенных измерений) производится путем интерполяции данных полиномом нулевого порядка (сравнения предыдущего измерения с последующим) по алгоритму:

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i \text{ при } |x_{i+1} - x_i| \leq \Delta c, \\ x_{i+1} &= x_{i+1} \text{ при } |x_{i+1} - x_i| > \Delta c, \end{aligned}$$

где Δc – ценз существенности.

После соответствующей обработки телеметрические параметры представляет собой ограниченные по времени дискретные реализации процесса функционирования бортовых систем КА и должны включать тройку <наименование параметра; время; физическое значение>.

Анализом ТМИ называется процесс интеллектуального анализа ТМИ (Data Mining), связанный с формированием данных, необходимых оператору или системе для принятия решений по состоянию бортовых систем КА и управлению в полете [7-10].

Основными подзадачами анализа ТМИ являются следующее [5,8-10]:

определение времен начала и окончания технических состояний бортовых систем (БС);

распознавание и идентификация технических состояний БС;

подсчет числа состояний определенного типа на контролируемом интервале времени;

определение порядка следования технических состояний по оси состояний или времени и его

соответствия заданной программе функционирования БС;

вычисление обобщенных параметров для состояний и определение их соответствия требуемым значениям;

выделение подмножеств незапланированных (аномальных) технических состояний;

идентификация аномальных состояний;

выявление элементов БС, являющихся причиной возникновения аномальных состояний;

прогноз технических состояний БС;

выделение интервалов времени, на которых нельзя оценивать техническое состояние БС;

архивация технических состояний БС;

визуализация и документирование результатов обработки и др.

Для решения задач автоматизации анализа ТМИ широкое применение, находят следующие алгоритмы [2]:

алгоритмы, основанные на методе допускового контроля;

алгоритмы, основанные на матрицах состояний;

алгоритмы, основанные на «деревьях» поиска состояний;

алгоритмы, основанные на использовании математической модели КА.

На сегодня используют как понятие контроля параметра, так и понятие контроля подсистемы. Но если процесс контроля параметра (группы параметров) достаточно хорошо теоретически исследован и практически автоматизирован, то процесс контроля подсистем, в силу множества параметров, характеризующих их поведение и состояние, и взаимосвязей между ними, представляет сложную задачу.

К задачам контроля параметра следует отнести допусковый контроль, т.е. контроль соответствия параметра области допустимых значений (ОДЗ). Часто на практике используется метод двухуровневого допускового контроля [2-4,10], предусматривающего задание по каждому из параметров двух диапазонов допуска: предельно допустимого и среднестатистического для ожидаемых значений параметра (или рабочего диапазона).

Остальные алгоритмы скорее можно отнести к алгоритмам контроля подсистем.

Алгоритм, основанный на матрицах состояний использует тот факт, что техническое состояние системы на любой момент времени можно определить совокупностью значений $|x_i|$ и

$|A_i|$ телеметрируемых параметров и промежуточных вычислений [2]

$$y_i(t) = F(x_1 \dots x_n, A_1 \dots A_n).$$

В основе матрицы состояний лежит прогноз состояния – логические соотношения между планируемыми управляющими воздействиями (командами и программами управления, алгоритмами работы подсистем, внешними учтенными воздействиями) и ТМ-параметрами, характеризующими состояние БС КА, рассчитанные на дискретные моменты времени. Он представляет собой кусочно-постоянную функцию на контролируемом отрезке времени (текущие образы состояния) [9,10].

При этом исходим из того, что реакция КА на управляющее воздействие представляет уникальный набор телеметрических параметров, однозначно характеризующих (описывающих) изменение структурных, функциональных и пространственных состояний КА: Алгоритм, основанный на «деревьях» поиска состояний наиболее близок к логике неавтоматизированного анализа. В его основе лежит последовательный анализ отдельных ТМ-параметров, характеризующих конкретную подсистему КА. Поиск состояния разветвляется в зависимости от полученных результатов и завершается идентификацией состояния и формированием интегральной оценки ТС КА.

Алгоритм, основанный на использовании математической модели КА, позволяет в реальном масштабе времени, параллельно с реальными процессами в бортовых системах КА, генерировать поток телеметрической информации в соответствии с выдаваемыми управляющими воздействиями.

В штатном режиме оценка функционирования КА проводится на соответствие реальной ТМИ детерминированной модели КА (прогнозу состояний), представляющей последовательность эталонных значений ТМИ в зависимости от управляющих воздействий.

В качестве основного принят метод имитационного моделирования с формированием прогноза состояния [1,9,10], суть которого заключается в том, что заблаговременно, с заданным шагом по времени моделируются орбитальный полет КА, функционирование целевой аппаратуры и бортовых обеспечивающих систем с учетом условий применения. При этом в каждый момент времени отслеживается состояние интересующей бортовой системы КА.

Возникновение нештатных ситуаций (НС) предполагает оперативную корректировку первоначального плана и выдачу управляющих воздействий, целью которых является минимизация потерь и сокращение сроков действия НС.

В этом случае прогноз состояния теряет свою актуальность, и автоматизированный анализ осуществляется путем тактового сравнения реакций модели и подсистем КА на управляющие воздействия, которые выдаются параллельно на борт и имитатор в реальном (квазиреальном, с учетом задержки на проверку) масштабе времени.

Формирование прогноза состояния и темповая имитация процесса функционирования бортовых систем КА осуществляется с помощью имитатора космического аппарата (Dynamic Satellite Simulator – DSS) – компьютерной математической модели космического аппарата, функционирующей как в реальном, так и функционируемом времени. Имитатор генерирует поток телеметрической информации в соответствии с управляющими воздействиями (командами управления) согласно логике работы реального космического аппарата как заблаговременно (прогноз состояния), так и в реальном масштабе времени.

Выводы

Как следует из проведенного анализа, основные тенденции развития систем контроля технического состояния КА направлены на повышение уровня автоматизации обработки и анализа ТМИ. Предложенные методологические подходы целесообразно использовать при разработке перспективных группировок отечественных связных КА на ГСО, работающих в жестких условиях реального времени при однопунктной технологии управления.

Литература

1. Космические радиотехнические комплексы / Под общ. редакцией Г.В. Стогова – М.: МО СССР, 1986 – 626 с. 2. Кравец В. Г. Основы управления космическими полетами / В. Г. Кравец, В. Е. Любинский // М.: Машиностроение, 1983 – 224 с. 3. Агаджанов П. А. Основы радиотелеметрии / П. А. Агаджанов, Б. М. Горшков, Г. Д. Смирнов // М.: Воениздат, 1971 – 248 с. 4. Степкин В. С. Автоматизированная обработка и анализ телеметрической информации. / В. С. Степкин, С. С. Шмыголь // М.: МО СССР, 1980 – 516 с. 5. Программно-математическое обеспечение автоматизированной системы управления космическими аппаратами / Под общ. редакцией Д.А. Ловцова – М.: ВА им. Ф.Э. Дзержинского, 1995 – 456 с. 6. Рось А. А. Логическое программирование и его применение для моделирования поведения сложных систем // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. Сборник научных трудов. Х.: Вища школа.

1987. – С13-21. 7. Еом S.B. Decision support systems research: reference disciplines and a cumulative tradition // The International Journal of Management Science. 1995. № 5. Р. 511-523. 8. Горский П. Уточнение понятия «система поддержки принятия решений». – Режим доступа : <http://gorskiy.ru>. 9. Загорюлько А. Н. Системы поддержки принятия решений при управлении космическими аппаратами. // Системы управління, навігації та зв'язку. Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління. К.: – 2009. – №3(11). – С.28-31. 10. Загорюлько А. Н. Методы и модели контроля и диагностики бортовых систем космического аппарата // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – Х.: ХУПС. – 2009. – Вип. 3(21). – С.80-85. 11. Калашников Н.И. Системы связи через ИСЗ – М.: Связь, 1969 – 384 с. 12. Кантор Л. Я. Спутниковая связь и проблема геостационарной орбиты / Л. Я. Кантор, Тимофеев В.В. // М.: Радио и связь, 1988 – 250 с.

У приведеній статті розглянуті питання автоматизації процесу управління складними технічними системами, методологія та вимоги до систем контролю.

Ключові слова: контроль, телеметрія, управління, космічний апарат.

In this paper consider automating the management of complex technical systems, methodology and requirements for control systems.

Key words: control, telemetry, space apparatus.