

Использование «деревьев» поиска состояний для поддержки принятия решений при комплексной оперативной оценке бортовых систем космического аппарата

05, май 2011

авторы: Саркисян Х. В., Матюшин М. М.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

mykes1986@mail.ru

matushin@scsc.ru

Введение

Любая бортовая система космического аппарата, как и космический аппарат в целом, относится к классу сложных технических систем. Для таких систем разбиение всего класса состояний на два - «работоспособна» и «неработоспособна» представляется слишком упрощенным. Наоборот, идеальное работоспособное состояние системы КА, как и полностью неработоспособное состояние встречаются достаточно редко. На практике, идеальное работоспособное состояние и полностью неработоспособное состояние являются лишь некими граничными значениями на шкале возможных состояний космического аппарата в текущий момент времени.

Оценка состояния космического аппарата в полете играет роль обратной связи, с помощью которой оценивается соответствие состояния космического аппарата, как объекта управления, плановому состоянию на определенный момент времени. Поскольку управление полетом представляет собой непрерывный динамический процесс, то оценка состояния также носит непрерывный характер.

Оценка состояния космического аппарата проводится на основе анализа совокупности параметров, получаемых с борта космического аппарата: по телеметрическому тракту, по докладам экипажа, по командным квитанциям. Основным источником информации были и остаются данные, получаемые в составе телеметрической информации. Объем телеметрической информации для современных пилотируемых кораблей составляет десятки тысяч телеметрических параметров. Каждый такой параметр характеризует состояние узла, блока, агрегата, подсистемы какой-либо бортовой системы, или какой-либо аспект функционирования этого узла, блока, агрегата. И каждый такой параметр специалистам группы управления полета необходимо оценить по определенной

технологии [1]. Однако, для принятия решений по дальнейшему управлению полетом космического аппарата важна комплексная оценка состояния его бортовых систем. Сложность подобной оценки состоит в большом числе анализируемых параметров и в ограниченном отрезке времени, за который при оперативном управлении полетом должна быть дана эта оценка. Далее рассматривается один из подходов, позволяющих облегчить процесс принятия решений группой управления полетом при комплексной оценке состояния космического аппарата.

Оценка состояния бортовой системы космического аппарата группой управления

Группа управления полетом космического аппарата, как правило, организуется таким образом, чтобы контроль и анализ состояния каждой отдельной системы выполнялся отдельной подгруппой. Однако, число телеметрических параметров, которые должны анализировать специалисты подгрупп, даже с учетом анализа только «своей» системы остается достаточно большим.

Для решения этой проблемы используются несколько взаимосвязанных направлений. Одним из таких направлений является организация в соответствии с определенными правилами порядка работы специалистов по оценке множества параметров, характеризующих бортовую систему.

Все множество получаемых с борта параметров разбивается на несколько подмножеств в зависимости от значимости изменения этих параметров, с точки зрения выявления важных изменений в работе бортовой системы. В зависимости от режима работы, анализируемой подсистемы, рассматриваются те или иные подмножества из имеющегося множества параметров.

Например, для оценки функционирования работы определенной системы в дежурном состоянии достаточно контролировать подмножество параметров $P_{деж}$, характеризующее работу системы в этом состоянии. При этом подмножество P_i контролируемых специалистами в момент времени t_i можно характеризовать следующим образом

$$P_i = P_{деж} ,$$

$$P_{деж} \subset P_{sys} ,$$

$$P_{деж} \gg P_{sys} ,$$

где P_{sys} - полное множество параметров, характеризующих систему.

Если по какой-либо подсистеме значения контролируемых параметров приближаются или даже выходят за допустимые пределы, то для контроля берется дополнительное подмножество параметров, характеризующее работу этой подсистемы P_{sub-1}

$$P_i = (P_{деж} + P_{sub-1}),$$

$$P_{sub-1} \subset P_{sys}.$$

В пределе дополнительное подмножество параметров может расширяться до полного множества параметров, характеризующих систему. Однако в этом случае оперативный анализ параметров и оперативное принятие решений сильно затруднено.

Приблизительно таким же образом поступают и тогда, когда ожидаются активные операции с контролируемой системой. В этом случае множество дополнительных параметров, характеризующих работу системы в ходе активной операции, определяется заранее.

Специалист группы управления при оценке определенной бортовой системы действует в соответствии со следующим обобщенным порядком.

При подготовке к сеансу связи с космическим аппаратом или при подготовке к проведению активных работ со «своей» бортовой системой, специалист должен проанализировать предстоящую программу управления полетом космического аппарата и выделить наиболее важные операции со «своей» системой с привязкой ко времени. Для полученных моментов времени специалист должен оценить наличие телеметрической информации и вариантов ее сбора и обработки, например, программ опроса системы бортовых измерений. Для каждого момента времени специалист должен выделить подмножество параметров, которые он будет контролировать, из общего множества параметров, описывающих данную систему. Для выбранных множеств параметров специалист должен спрогнозировать их состояние на выбранные моменты времени.

Во время сеанса связи или проведения активных работ с системой специалист проводит сравнительную оценку заранее спрогнозированных значений контролируемых параметров для текущего момента времени и параметров, полученных с борта в потоке телеметрической информации. Так же проводится контроль соответствия значений параметров плановому состоянию системы. В случае выявления отклонений в показаниях параметров, относительно прогнозируемых, специалист должен проанализировать качество получаемой телеметрической информации. При условии получения достоверной телеметрической информации специалист анализирует дополнительный массив данных и,

если, факт отклонения подтвердился, он вырабатывает рекомендации по работе с системой: прекратить работу, перейти на резервный комплект, реконфигурировать систему и т.д.

Для принятия окончательного решения специалисту может потребоваться более тщательный анализ, который проводится вне сеанса связи, то есть вне темпа реального времени. Такой анализ позволяет использовать значительно больший объем информации и рассматривать бортовые процессы, отраженные в телеметрической информации, с привязкой к временной оси. В подобном анализе могут принимать участие также разработчики системы, различные группы инженерной поддержки и т.д.

При завершении процесса анализа специалист должен сформулировать сущность изменения в состоянии бортовой системы, признаки изменения (параметры, отклонившиеся от нормы), предполагаемые причины, ожидаемые последствия, варианты возможных действий по управлению системой, необходимый для этого перечень работ.

Таким образом, основной задачей специалиста по анализу работы бортовой системы космического аппарата является принятие решения о состоянии этой системы на текущий момент и прогноз возможного состояния системы в будущем. Принятие такого решения представляет собой достаточно сложную проблему, включающую в себя проблемы определения оптимального множества оцениваемых параметров, необходимых для выявления текущего состояния бортовой системы; проблемы определения классов возможных состояний рассматриваемой бортовой системы; методы и способы отнесения полученного состояния бортовой системы к одному из классов возможных состояний; прогноз состояния на различные интервалы времени и т.д.

Формализация операции контроля бортовой системы космического аппарата

Формализуем описание операции контроля бортовой системы космического аппарата. Пусть, на момент времени t специалист группы управления полетом космического аппарата по анализу бортовой системы имеет в своем распоряжении вектор состояния бортовой системы, представляющий собой выбранное заранее подмножество единичных параметров $P = \{p_i\}$, полученных с борта космического аппарата. Кроме того состояние данной системы оценивается с помощью обобщенных параметров $C = \{c_i\}$, вычисляемых по значениям параметров, полученных с борта космического аппарата. Совокупность параметров характеризует определенное состояние бортовой системы $S_{тек}$. Как результат решения, специалист должен оценить это текущее состояние.

Таким образом, на основе информации о внешних воздействиях на объект управления, используя технологии контроля полета космического аппарата $\mathfrak{R}_{\text{конт}}$, специалист по контролю над данной системой формирует оценку результатов управления полетом на i -том цикле функционирования

$$\mathfrak{R}_{\text{контр}} : I_{\text{борт}}(D_{\text{внеш}}^{I-i}, R_{\text{бс}}^i, R_{\text{экипаж}}^i, D_{\text{спн}}^i) \rightarrow G_i,$$

где $D_{\text{внеш}}^{I-i}$ - бортовая система космического аппарата на i -том цикле функционирования, $R_{\text{бс}}^i$ - состояние бортовой системы космического аппарата на i -том цикле функционирования, $R_{\text{экипаж}}^i$ - состояние экипажа на i -том цикле функционирования, $D_{\text{спн}}^i$ - возмущающие воздействия, влияющие на средства приема информации на i -том цикле функционирования.

По результатам контроля принимается решение по дальнейшему управлению полетом. Здесь происходит оценка достижения текущих целей управления полетом космического аппарата G_i^* для i -того цикла функционирования

$$\partial : \{G_i^*, r, G_i\} \rightarrow \{\delta\},$$

где G_i – результаты управления полетом космического аппарата, описанные языком целей, r – бинарные отношения соответствия на множества $G_i^* r G_i$, устанавливаемые в ходе оценки результатов управления, ∂ - оператор, реализуемый через технологии контроля и управления полетом.

При этом заранее задается Δ_i - вектор возможного для i -того цикла функционирования отклонения реально полученных результатов от заданных целей. В случае если выполняется условие $\{\delta\} \leq \Delta_i$, - управление полетом продолжается по существующему плану. Если $\{\delta\} > \Delta_i$, то происходит корректировка плана, т.е. текущие цели полета G^* меняются.

Таким образом, если текущее состояние бортовой системы соответствует ее состоянию, определенному в плане полета космического аппарата, то состояние бортовой системы является штатным и план реализуется без изменений. В других случаях имеется нештатное состояние бортовой системы. Как правило, при управлении полетом космического аппарата имеется перечень так называемых рассмотренных нештатных ситуаций для космического аппарата в целом и для бортовых систем в частности. Это те нештатные ситуации, которые отражены в наземной и бортовой документации по управлению полетом и содержащиеся в программном обеспечении автоматизированной

системы управления полетом и бортового контура управления, с указанием рекомендуемых действий по их устранению. Остальные нештатные ситуации относятся к классу нерассмотренных нештатных ситуаций. Поэтому, одним из аспектов решения специалиста оперативной группы управления является отнесение текущего состояния бортовой системы к штатному состоянию, рассмотренному нештатному состоянию или нерассмотренному.

Использование метода «деревьев» поиска состояний

Выявление признаков штатного, рассмотренного нештатного или нерассмотренного нештатного состояния является одной из основных задач комплексной оперативной оценки бортовой системы космического аппарата. Одним из способов решения этой задачи выступает метод деревьев поиска состояний. Суть метода состоит в следующем.

Пусть текущее состояние $S_{тек}$ бортовой системы характеризуется множеством единичных параметров $P = \{p_i\}$, полученных с борта космического аппарата, кроме того состояние также может оцениваться с помощью обобщенных параметров $C = \{c_j\}$, вычисляемых по значениям параметров, полученных с борта космического аппарата. Для каждого из параметров p_i или c_i заранее задана оценочная функция, в соответствии с принципами, рассмотренными в работе [2]. Это функция определяет степень соответствия параметра планируемому, штатным значениям и «значимость» отклонений значений этого параметра на представленном интервале значений. Пример оценочной функции одного параметра представлен на рис. 1.

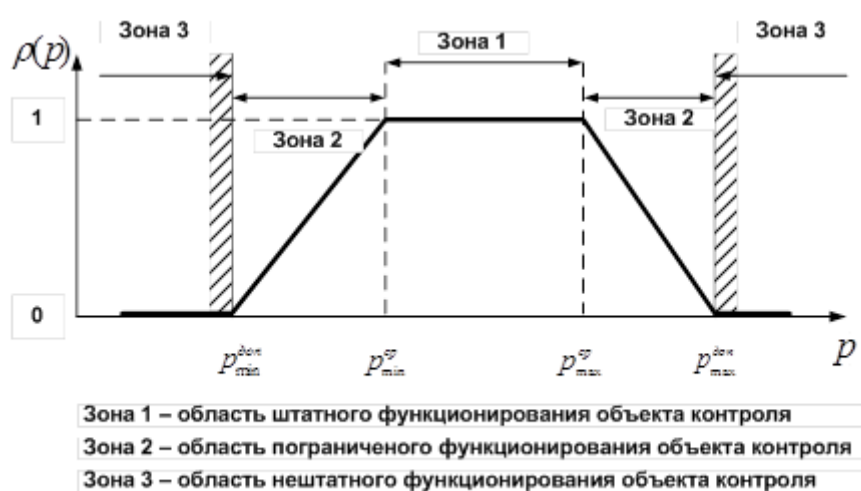


Рис. 1. Пример оценочной функция для параметра, с учетом средних значений

Метод деревьев поиска состояния состоит в последовательном, начиная, например, с параметра p_i , соотнесении реальных значений параметров $p_i^{тек}$ или $c_i^{тек}$ на текущий момент времени со значением оценочной функции

$$\rho(p_i): p_i^{тек} \rightarrow S_{pi}^{тек},$$

$$\rho(c_i): c_i^{тек} \rightarrow S_{ci}^{тек},$$

где $\rho(p_i)$ или $\rho(c_i)$ - оценочные функции параметров p_i или c_i соответственно, $S_{pi}^{тек}$ или $S_{ci}^{тек}$ аспект состояния или функционирования оцениваемой системы по параметру p_i или c_i соответственно.

При этом делается вывод о состоянии или функционирования оцениваемой системы по рассматриваемому аспекту

$$S_{pi}^{тек} \in S_{pi}^{штат} \left(S_{ci}^{тек} \in S_{ci}^{штат} \right),$$

$$S_{pi}^{н/с-рассм} \in S_{pi}^{н/с-рассм} \left(S_{ci}^{н/с-рассм} \in S_{ci}^{н/с-рассм} \right),$$

$$S_{pi}^{н/с-нр} \in S_{pi}^{н/с-нр} \left(S_{ci}^{н/с-нр} \in S_{ci}^{н/с-нр} \right),$$

где $S_{pi}^{штат}$ ($S_{ci}^{штат}$) – штатное состояние или функционирования оцениваемой системы по представленному аспекту; $S_{pi}^{н/с-рассм}$ ($S_{ci}^{н/с-рассм}$) – рассмотренная нештатная ситуация оцениваемой системы по представленному аспекту; $S_{pi}^{н/с-нр}$ ($S_{ci}^{н/с-нр}$) - нерассмотренная нештатная ситуация оцениваемой системы по представленному аспекту. Дерево состояний бортовой системы космического аппарата представлено на рис.2.

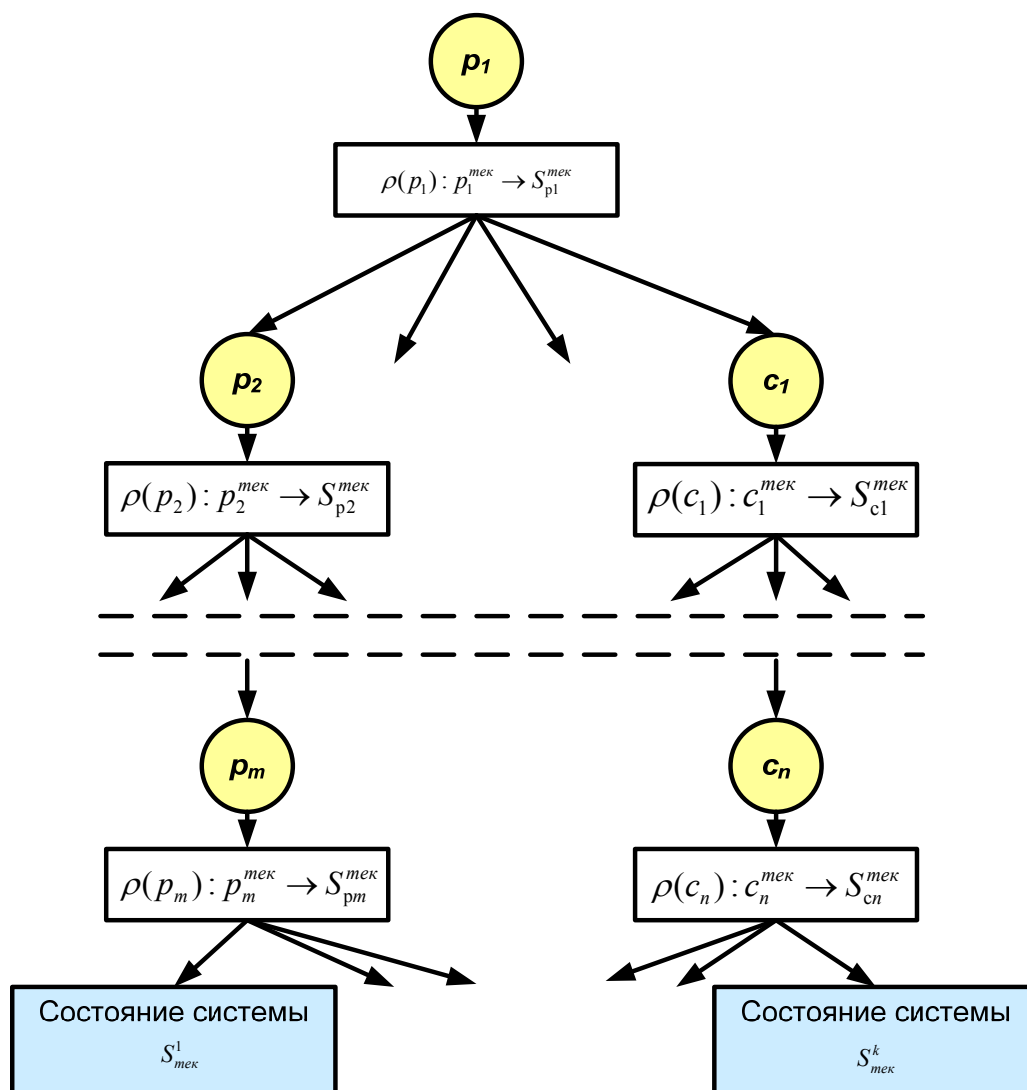


Рис. 2. Дерево состояний бортовой системы космического аппарата

В результате анализа всех параметров состояния p_i и c_i возможно построение ориентированного графа $G(p_i, c_i)$, в котором правилом перехода от одной вершины к другой является соотнесении реальных значений параметров p_i^{mek} или c_i^{mek} на текущий момент времени со значением оценочной функции. Число выходов из каждой вершины определяется видом оценочной функции, используемой в этой вершине и уровней оценки параметров в данной оценочной функции.

Для оценки состояния системы на момент времени t используются значения параметров p_i^t и c_i^t и на орграфе $G(p_i, c_i)$ находится единственный путь, характеризующий состояние систем. Так текущее состояние оцениваемой системы можно представить как совокупность аспектов состояния или функционирования

$$S_{mek} = \left(\bigcup_{i=1}^m S_{pi}^{mek} \right) \cup \left(\bigcup_{j=1}^n S_{cj}^{mek} \right).$$

При этом система находится в штатном состоянии, если выполняется условие

$$\forall S_{pi}^{тек} (S_{ci}^{тек}) \in S_{тек}, S_{pi}^{тек} (S_{ci}^{тек}) \oplus S_{pi}^{штат} (S_{ci}^{штат}) = 0 \rightarrow S_{тек} \subset S_{штат},$$

где $S_{штат}$ - штатное состояние системы; $S_{pi}^{штат} (S_{ci}^{штат})$ - штатное состояние или функционирования оцениваемой системы по представленному аспекту; $\oplus$ - знак, предписывающий принимать решение

$$S_{pi}^{тек} \oplus S_{pi}^{штат} = \begin{cases} 0, & \text{если } S_{pi}^{тек} = S_{pi}^{штат} \\ 1, & \text{если } S_{pi}^{тек} \neq S_{pi}^{штат} \end{cases}.$$

Система находится в состоянии нерассмотренной нештатной ситуации, если выполняется условие

$$\exists S_{pi}^{тек} (S_{ci}^{тек}) \in S_{тек}, S_{pi}^{тек} (S_{ci}^{тек}) \oplus S_{pi}^{н/с-нр} (S_{ci}^{н/с-нр}) = 0 \rightarrow S_{тек} \subset S_{н/с-нр},$$

$S_{н/с-нр}$ - состояние нерассмотренной нештатной ситуации; $S_{pi}^{н/с-нр} (S_{ci}^{н/с-нр})$ - нерассмотренная нештатная ситуация оцениваемой системы по представленному аспекту; $\oplus$ - знак, предписывающий принимать решение

$$S_{pi}^{тек} \oplus S_{pi}^{н/с-нр} = \begin{cases} 0, & \text{если } S_{pi}^{тек} = S_{pi}^{н/с-нр} \\ 1, & \text{если } S_{pi}^{тек} \neq S_{pi}^{н/с-нр} \end{cases}.$$

За определением текущего состояния следует соответствующая реакция группы управления полетом, т.е. работа по имеющемуся плану полета и его изменение, исходя из сложившихся условий.

Использование «деревьев» состояний бортовой системы для комплексной оценки функционирования бортовой системы космического аппарата не единственный из возможных вариантов и он имеет свои особенности.

К этим особенностям относятся:

- 1) Достаточная наглядность и «прозрачность» процесса получения текущей оценки бортовой системы, которая способствует более полному пониманию специалистов группы управления полетом сложившейся полетной ситуации. Необходимо отметить, что наглядность уменьшается при очень больших числах параметров $p_i^{тек}$ или $c_i^{тек}$.
- 2) В процессе подготовки к ответственным полетным операциям, а также при задании возможных альтернативных состояний космического аппарата, характеризующихся различными векторами состояния параметров $p_i^{тек}$ или $c_i^{тек}$, возможно использование

известных математических методов, например работы [3,4], для поиска оптимальных с различных точек зрения путей на орграфе.

3) Сложность создания унифицированных «деревьев» для всех бортовых систем космического аппарата, т.е. для каждой бортовой системы необходимо построение «дерева» в отдельности, так как количество используемых для анализа каждой системы параметров p_i или c_i и количество операций сравнения для идентификации состояний различны.

4) Необходимо изменять процедуру оценки при изменении исходных данных по использованию параметров p_i или c_i и числа операций сравнения. Так динамическая настройка процесса формирования орграфа потребует при переходе анализа дежурного подмножества параметров к расширенному.

Можно сделать вывод, что метод «деревьев» состояний бортовой системы с использованием оценочных функций единичных параметров может быть использован для комплексной оценки функционирования бортовой системы космического аппарата в случае, если количество параметров, описывающих работу данной системы, не превышает определенных пределов и при формировании «дерева» состояний бортовой системы предусмотрена динамическая настройка орграфа.

Заключение

Естественно, что основным направлением оптимизации процесса анализа состояния бортовых систем является автоматизация этого процесса. Хотя программно - математическое обеспечение не способно заменить специалиста группы управления полетом космического аппарата в процессе анализа бортовых систем. Однако, распознавание состояния отдельного, единичного параметра и системы в целом, вполне возможно и, в большинстве случаев, необходимо с использованием вычислительной техники.

Представленный подход к формированию комплексной оценки бортовой системы для поддержки принятия решения по ее состоянию является в известной степени универсальным. Он может быть реализован различными программными, аппаратными и даже организационными средствами, в зависимости от специфики управления полетами конкретным космическим аппаратом. Однако, для перспективных космических аппаратов, исходя из требований максимальной автоматизации процессов управления полетом, данный подход может позволить сформировать для определенного класса бортовых систем достаточно эффективные алгоритмы их автоматизированной комплексной оценки.

Литература:

1. Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полётами. Ч2. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009. – 426с.
2. Матюшин М.М., Саркисян Х.В. Построение оценочной функции для поддержки принятия оперативных решений при контроле параметров состояния космического аппарата // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. №4
3. Ловас Л. Прикладные задачи теории графов – М.: Мир, 1998.- 653 с.
4. Дистель Р. Теория графов. – Новосибирск: Изд-во Института математики, 2002.-336 с.