

Модели информационной нагрузки на наземную компоненту автоматизированной системы управления полетом космического аппарата

77-30569/223840

10, октябрь 2011

Матюшин М. М.

УДК.629.7

МГТУ им. Н.Э. Баумана

matushin@scsc.ru

Введение

Важным аспектом управления полетом современных пилотируемых космических аппаратов (КА) является то, что контроль полета КА предполагает оценку значительного объема весьма разнородных параметров состояния. Так, на российском корабле «Союз», в модификации ТМА, их число составляет величину порядка 1000, на американском корабле Шаттл – 12000, на станции «Мир» (6 модулей) составляло 14000, на российском сегменте МКС в его конфигурации на конец 2010 г (5 модулей), без учета пристыкованных кораблей, - около 60000 параметров.

Одним из направлений повышения эффективности контроля всего массива параметров состояния космического аппарата является создание определенной иерархической структуры очередности контроля информации, поступающей с борта в наземный контур управления полетом. На верхних уровнях такой системы контроля обрабатывается и анализируется информация о космическом аппарате как комплексной сложной технической системе, а на более низких уровнях детально обрабатывается и анализируется информация о состоянии систем, подсистем, узлов, агрегатов и приборов космического аппарата. Соответственно, нижние уровни принимают решение о состоянии систем, подсистем, узлов, агрегатов и приборов космического аппарата, а верхние – о состоянии космического аппарата в целом.

При создании подобной иерархической системы контроля встает задача распределения информационной нагрузки на урону и структурные элементы этой системы. Для эффективного управления полетом космического аппарата,

информационная нагрузка не должна превышать определенные уровни, поскольку основным элементом, принимающим решение в автоматизированной системе управления полетом (АСУП), является человек, а человек имеет достаточно жесткие ограничения по возможностям направленной переработки информации [6].

Кроме того для эффективного функционирования АСУП, распределение информационной нагрузки между структурными элементами системы контроля должно быть равномерным, обеспечивая тем самым условия эффективной и надежной работы АСУП.

При принятии решений в процессе создания и модификации иерархической системы контроля, естественно, крайне желательно использование результатов, полученных с помощью формальных методов и математического моделирования. Такой подход позволяет снизить влияние субъективизма при принятии решений и более ясно отразить процесс формирования показателей, на основе которых такие решения принимаются.

Одним из основных компонентов процесса формализации распределения информационной нагрузки является моделирование иерархической системы контроля.

1. Иерархическая система контроля как объект анализа

Определение 1. Под объектом контроля будем понимать космический аппарат как сложную техническую систему, в которой возможно выделить подсистемы, в которых в свою очередь можно выделить блоки, агрегаты и т.д.

Определение 2. Под иерархической [4] структурой контроля будем понимать упорядоченную систему контроля информации, поступающей с борта КА, организованную в соответствии со следующими принципами:

- 1) Возможно проведение вертикальной декомпозиции подсистем контроля, т.е. последовательное выделение подсистем, расположенных вертикально относительно друг друга. Эта декомпозиция обусловлена необходимостью контроля комплексного состояния КА на верхнем уровне иерархии и детального контроля систем, подсистем и агрегатов на более низких уровнях иерархии.
- 2) Приоритет в принятии решений о состоянии КА имеют подсистемы верхнего уровня. Т.е. ответственность за принятие решение по распознаванию состояния космического аппарата как сложной технической системы лежит на подсистеме верхнего уровня.
- 3) Подсистемы верхнего уровня зависят в своих оценках от функционирования подсистем низшего уровня. Т.е. при принятии решений о состоянии космического аппарата как сложной технической системы в подсистеме верхнего уровня напрямую зависит от

результатов распознавания состояния систем, подсистем, агрегатов космического аппарата.

Определение 3. Под реакцией космического аппарата как объекта контроля, в общем случае как объекта управления для авторизированной системы управления полетом в целом, будем понимать отклик на управляющие воздействия на такте управления $i + 1$, которые, в том числе, стали результатом контроля состояния космического аппарата на такте управления i . Т.е. при правильном распознавании состояния космического аппарата на такте управления i и, соответственно, корректном формировании управляющих воздействий, на $i + 1$ такте управления наблюдается адекватная реакция космического аппарата. При этом принимается следующее ограничение - нештатные ситуации под воздействием внешних и внутренних возмущающих факторов в данном контексте в первом приближении не рассматривается.

Определение 4. Под реакцией системы контроля понимается стремление отдельных звеньев иерархической структуры контроля или всей системы контроля в целом усилить или снизить уровень контроля состояния космического аппарата или его отдельных систем из-за изменений космического аппарата, например, при установке новой версии бортового программно-математического обеспечения или отказов тех или иных бортовых систем.

Иерархическая структура контроля в данном случае состоит из n уровней контроля, каждому из которых определяется номер i , при этом $1 \leq i \leq n$. Верхний, самый общий уровень контроля имеет номер 1, низший, самый детальный – номер n . Таким образом, результаты детального контроля состояния блоков и агрегатов на низших уровнях используются при контроле состояния космического аппарата в целом на верхних уровнях. На каждом из уровней для получения результата контроля происходит обработка некоторого количества информации. Как правило, на каждом уровне иерархии, может существовать m_i структурных элементов, каждому из которых определяется номер j , при этом $1 \leq j \leq m_i$.

Для измерения этого количества информации могут быть использованы различные подходы, например, [1, 2, 6]. В любом случае, не зависимо от используемого подхода, для каждого структурного элемента в иерархии контроля может быть определено количество информации, с которой работает структурный элемент, т.е. определена информационная нагрузка на этот элемент.

Анализируя систему контроля в общем случае, без учета реализуемой программы или плана полета космического аппарата, достаточно затруднительно выделить точное

значение информационной нагрузки на каждый структурный элемент в общем виде. Однако в этом случае вполне возможно оценить максимальные и минимальные значения такой информационной нагрузки.

Максимальный уровень информационной нагрузки определяется возможностями по целенаправленной переработке информации системы «человек-техника», функционирующей в качестве рассматриваемого структурного элемента [6]. Минимальный уровень информационной нагрузки может определяться как проблемами монотонности, так и экономической целесообразностью.

Таким образом, будем считать, что для каждого уровня иерархии контроля вполне можно априори получить максимальное и минимальное количество информации, перерабатываемое на этом уровне. Эти максимальные и минимальные значения определяются исходя из возможностей средств системы бортовых измерений, каналов передачи данных, средств наземного контура управления, соответствующего программно-математического обеспечения, рассмотренных штатных и нештатных ситуаций, возможных при управлении полетом, планов проведения типовых полетных операций и т.д.

В формальном описании иерархической системы контроля максимальная информационная нагрузка может быть задана некоторой положительной функцией $I_{\max}(i, j, t)$, где $1 \leq i \leq n$ и $1 \leq j \leq m_i$.

Необходимо обозначить следующее требование. Как правило, оптимум по показателям «затраты - безошибочность» для автоматизированной системы управления полетом как для систем сложной структуры достигается, если все структурные элементы этой системы имеют примерно равный уровень безошибочности, т.е. отсутствуют явные «узкие» места в системе [3]. Хотя частично разница в безошибочности функционирования структурных элементов может быть скомпенсирована особенностями построения структуры, в первом приближении примем для системы контроля требование близкой безошибочности всех структурных элементов.

Поскольку одним из основных факторов, влияющих на безошибочность является информационная нагрузка, примем также требование приблизительного равенства информационной нагрузки для всех структурных элементов системы контроля.

Т.е. возвращаясь к оценке максимальной информационной нагрузки, функция ее описывающая для любого момента времени t должна быть равна для всех элементов системы контроля, т.е.

$$I_{\max}(i-1, j, t) \approx I_{\max}(i, j-1, t) \approx I_{\max}(i, j, t), \text{ при } 1 \leq i \leq n \text{ и } 1 \leq j \leq m_i \quad (1)$$

Минимальная информационная нагрузка также может быть задана некоторой положительной функцией $I_{\min}(i, j, t)$, где $1 \leq i \leq n$ и $1 \leq j \leq m_i$, при этом функция ее описывающая для любого момента времени t должна быть также равна для всех элементов системы контроля, т.е.

$$I_{\min}(i-1, j, t) \approx I_{\min}(i, j-1, t) \approx I_{\min}(i, j, t), \text{ при } 1 \leq i \leq n \text{ и } 1 \leq j \leq m_i \quad (2)$$

Для определенного момента времени t , в который реализуется вполне определенный план полета, с использованием определенным набором средств, инструментов управления полетом, известен срез работоспособности бортовой аппаратуры и внешних условий полета вполне возможна оценка текущей информационной нагрузки. Т.е. в формальном описании иерархической системы контроля текущая информационная нагрузка на некоторый структурный элемент может быть задана некоторой положительной функцией $I_{\text{real}}(i, j, t)$, где $1 \leq i \leq n$ и $1 \leq j \leq m_i$, при этом, если соблюдается условие штатной работы системы контроля полета, то

$$I_{\min}(i, j, t) < I_{\text{real}}(i, j, t) \quad (3)$$

$$I_{\text{real}}(i, j, t) < I_{\max}(i, j, t) \quad (4)$$

Если данные неравенства не выполняются необходимо говорить о нештатном или неплановом функционировании системы контроля. Таким образом, $I_{\max}(i, j, t)$ и $I_{\min}(i, j, t)$ задают граничные значения возможной информационной нагрузки на i -тый структурный элемент контроля, а $I_{\text{real}}(i, j, t)$ - реальное текущее значение информационной нагрузки на этот уровень.

Для дальнейшей построения формального описания иерархической системы контроля необходимо остановиться на некоторых моментах:

1) Именно особенности объекта управления - космического аппарата диктуют необходимость построение системы контроля тем или иным образом. Т.е. именно космический аппарат и особенности его управления являются первопричиной для создания, функционирования и изменения системы контроля.

2) Информационная нагрузка на всю систему контроля может с течением времени может с течением времени изменяться в зависимости от различных факторов, влияющих на управление полетом космического аппарата. Например, при проведении динамических полетных операций – коррекция орбиты, стыковка с другим космическим аппаратом и т.д. информационная нагрузка на систему контроля в целом возрастает и, наоборот, в

некотором дежурном режиме информационная нагрузка на систему контроля в целом снижается.

3) В процессе функционирования, в зависимости от содержания и хода реализации тех или иных полетных операций, информационная нагрузка может перераспределяться внутри системы контроля между структурными элементами. Например, в случае информационной перегрузки более верхний уровень иерархии контроля может отдать часть своих функций на нижние уровни, а сам сосредоточится на решении комплексных вопросов анализа состояния космического аппарата и наоборот, при необходимости, более верхний уровень сам проводит детальный анализ функционирования агрегатов и узлов, тем самым снижая информационную нагрузку на нижние уровни иерархии.

4) Результаты контроля состояния и функционирования космического аппарата напрямую влияют на сам космический аппарат через управляющие воздействия, выдаваемые на него автоматизированной системой управления полетом.

Необходимость усиления или снижения контроля на некотором такте функционирования будет, помимо всего прочего, зависеть от текущего распределения информационной нагрузки в системе контроля. Это обуславливается с одной стороны реакцией космического аппарата на функционирование системы контроля в текущих условиях распределения информационной нагрузки, с другой стороны - реакцией самой системы контроля на текущее распределение информационной нагрузки, т.е. необходимость повышения или снижения информационной нагрузки для отдельных структурных элементов в текущий момент.

Для учета реакции космического аппарата на функционирование системы контроля в текущих условиях распределения информационной нагрузки вводится некоторая функция $R_{sk} = R_{sk}(i, j, I_{real}, I_{min}, I_{max})$, которая зависит от уровня иерархии, номера структурного элемента в этом уровне, реального и пороговых значений уровня информационной нагрузки.

Также для учета реакции самой системы контроля в текущих условиях распределения информационной нагрузки вводится некоторая функция $R_{cs} = R_{cs}(i, j, I_{real}, I_{min}, I_{max})$, которая также зависит от уровня иерархии, номера структурного элемента в этом уровне, реального и пороговых значений уровня информационной нагрузки.

Хотя система контроля обязана реагировать на изменения состояния объекта контроля, на практике она может иметь разную степень восприимчивости к изменениям состояния космического аппарата, поэтому введем «коэффициент чувствительности» k_{cs} ,

такой что $0 \leq k_{cs} \leq 1$. В этом случае, если $k_{cs} = 1$, то система контроля полностью учитывает изменения состояния космического аппарата, если $k_{cs} = 0$, то система контроля полностью не учитывает изменения состояния космического аппарата (такой случай возможен чисто гипотетически).

Обобщая изложенное выше, суммарная реакция на текущее распределение информационной нагрузки будет зависеть от реакции системы контроля, реакцией космического аппарата и коэффициента чувствительности:

$$R_{\Sigma} = f(k_{cs}, R_{sk}, R_{cs}) \quad (5)$$

В качестве одного из подходов, для расчетов может быть предложено, например, следующее выражение:

$$R_{\Sigma} = k_{cs} \times R_{sk} + R_{cs} \quad (6)$$

Таким образом, объект «космический аппарат – система контроля» представляет собой замкнутый самоорганизующийся, в определенном смысле, контур, имеющий прямые и обратные связи. Уровень информационной нагрузки на любой структурный элемент существующий в рассматриваемый период времени является результатом системного взаимодействия всех компонент объекта: начального состояния системы, топологии системы контроля, реакции бортовых систем космического аппарата и т.д.

2. Топология иерархической системы контроля

Иерархическая система контроля может иметь достаточно сложную топологию. Разные уровни иерархии могут использовать информацию от различного количества уровней, лежащих ниже. Некоторые структурные элементы иерархии могут выдавать информацию в несколько вышестоящих уровней и т.д. Поэтому структура иерархии контроля достаточно сильно зависит от решаемых ею задач контроля и от особенностей управления полетом конкретного космического аппарата.

Тем не менее, можно выделить несколько обобщенных принципов, применимых для подавляющего большинства иерархических систем контроля. К этим принципам относятся.

1) В иерархии системы контроля выделяются иерархические уровни, как горизонтальные страты, в которые включаются номинально равные между собой уровни, хотя это равенство может быть иногда чисто теоретическим. Структурные элементы одного уровня системы иерархии получают и обрабатывают информацию от элементов одного и того же уровня структурной точности [1] космического аппарата. Каждый

уровень содержит менее одного структурного элемента ($m_i \geq 1$). Каждый структурный элемент иерархии относится к какому-либо уровню.

2) Каждый структурный элемент, кроме элементов верхнего слоя, имеет хотя бы один элемент верхнего уровня обработки информации. Любой структурный элемент, кроме элементов нижнего слоя, может иметь элементы нижнего уровня обработки информации.

3) Верхние уровни обрабатывают информацию более комплексно по сравнению с нижними уровнями, поэтому верхние уровни несут большую ответственность при принятии решения о состоянии объекта контроля – космического аппарата. Поэтому, при перераспределении информации, приоритет решения задач ее перераспределения закреплен за верхними уровнями.

4) В иерархии определен порядок перераспределения информации между уровнями, т.е. возможно выделение цепочек распределения информации внутри системы иерархии.

5) Любой структурный элемент может быть задан координатами $[i, j]$, где i - номер уровня иерархии системы контроля, при этом $1 \leq i \leq n$, j - номер структурного элемента, при этом $1 \leq j \leq m_i$, m_i - количество структурных элементов в i -м уровне иерархии системы контроля.

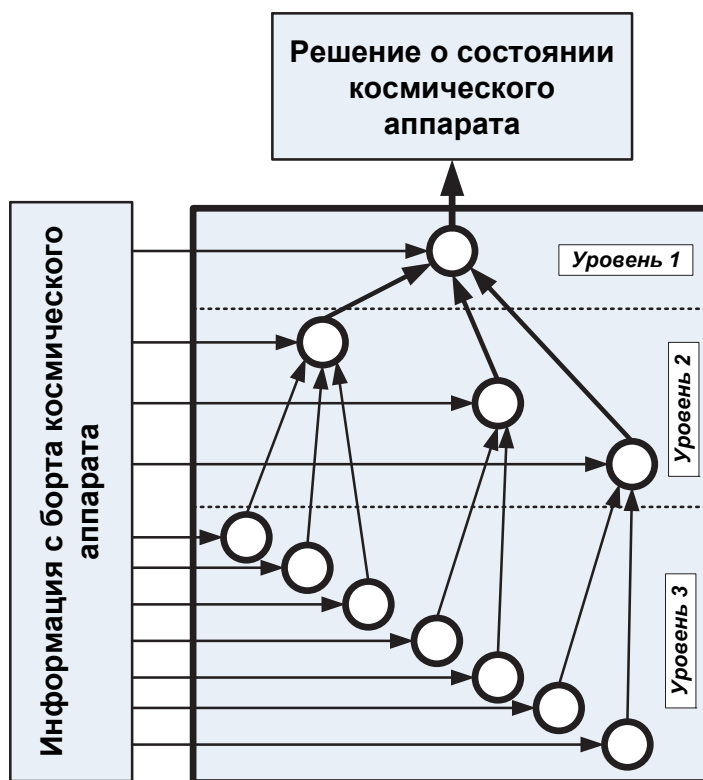


Рис. 1. Пример трех уровневой иерархии системы контроля

Для иерархии в целом m_i может быть задано в виде некоторой положительной функции, при этом $m_i \geq 1$. Как правило, выполняется правило:

$$m_{i+1} \geq m_i \geq 1 \quad (7)$$

Т.е. можно говорить о дивергентности [7] структуры системы контроля, которая, однако, может быть различна для различных уровней. Локальная дивергентность, как один из показателей структуры, может быть оценена как:

$$\partial(i) = \frac{m_{i+1}}{m_i} \quad (8)$$

При этом, локальная дивергентность с ростом координаты i может: 1) возрасть, например для случая:

$$m_i = i^2 + c, \quad (9)$$

где $c \geq 1$ - целое число

2) убывать, например для случая:

$$m_i = c + i, \quad (10)$$

где $c \geq 1$ - целое число

3) оставаться неизменной, например для случая:

$$m_i = c \times k^i, \quad (11)$$

где $c \geq 1$, $k > 1$ - целые числа

Остановимся подробнее на некоторых других показателях, с помощью которых можно охарактеризовать иерархическую систему контроля в целом.

Общее число структурных элементов в иерархии контроля можно оценить как:

$$N = \sum_{i=1}^n m_i \quad (12)$$

При этом, если $m_i \equiv 1$, то иерархия состоит из единственной цепочки.

Учитывая, что в общем случае максимальная информационная нагрузка может быть задана некоторой положительной функцией $I_{\max}(i, j, t)$, где $1 \leq i \leq n$ и $1 \leq j \leq m_i$, и минимальная информационная нагрузка также может быть задана некоторой положительной функцией $I_{\min}(i, j, t)$, где $1 \leq i \leq n$ и $1 \leq j \leq m_i$, среднюю информационную нагрузку на структурный элемент иерархии можно определить как:

$$\bar{I}(i, j, t) = \frac{1}{2} [I_{\max}(i, j, t) - I_{\min}(i, j, t)] \quad (13)$$

Для i -го уровня иерархии среднюю информационную нагрузку на структурный элемент этого уровня можно определить с помощью показателей:

- 1) Средняя максимальная информационная нагрузка по уровню:

$$\bar{I}_{\max}(i, t) = \sum_{j=1}^{m_i} \frac{I_{\max}(i, j, t)}{m_i} \quad (14)$$

- 2) Средняя минимальная информационная нагрузка по уровню:

$$\bar{I}_{\min}(i, t) = \sum_{j=1}^{m_i} \frac{I_{\min}(i, j, t)}{m_i} \quad (15)$$

- 3) Средняя суммарная информационная нагрузка по уровню:

$$\bar{I}_i(i, t) = \sum_{j=1}^{m_i} \bar{I}(i, j, t) \quad (16)$$

Соответственно, суммарная информационная нагрузка на всю систему контроля может быть охарактеризована, например, с помощью следующих показателей:

- 1) Суммарная максимальная информационная нагрузка:

$$I_{\max \Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} I_{\max}(i, j, t) \quad (17)$$

- 2) Суммарная минимальная информационная нагрузка:

$$I_{\min \Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} I_{\min}(i, j, t) \quad (18)$$

- 3) Средняя суммарная информационная нагрузка по иерархии:

$$\bar{I}_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \bar{I}(i, j, t) \quad (19)$$

Таким образом, имеется возможность оценить информационную нагрузку, которая приходится или ожидается в будущем на всю систему контроля в целом. Исходя из полученных результатов возможно принятие решений об изменении структуры системы контроля путем увеличения или, наоборот, уменьшения количества структурных элементов системы.

При подготовке к определенной ответственной операции на определенной момент времени t , может быть оценена реальное значение информационной нагрузки на некоторый структурный элемент иерархии, такая оценка проводится с помощью некоторой положительной функцией $I_{real}(i, j, t)$, где $1 \leq i \leq n$ и $1 \leq j \leq m_i$. В этом случае возможна оценка средней суммарной текущей информационной нагрузки по i -му уровню иерархии:

$$I_{real-i}(i, t) = \sum_{j=1}^{m_i} I_{real}(i, j, t) \quad (20)$$

И полную текущую суммарную информационную нагрузку по иерархии:

$$I_{real-\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} I_{real}(i, j, t) \quad (21)$$

Кроме того, можно определить среднюю информационную нагрузку на j – тый структурный элемент i -го уровня иерархии:

$$\bar{I}_{real-i}(i, t) = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} I_{real}(i, j, t)}{m_i} \quad (22)$$

Так же среднюю информационную нагрузку по иерархии в целом:

$$\bar{I}_{real-\Sigma}(t) = \frac{I_{real-\Sigma}(t)}{N} \quad (23)$$

Представленные выше показатели необходимы для поиска наиболее напряженных мест в структуре иерархии системы контроля.

Например, при сравнении информационной нагрузки $I_{real}(i, j, t)$ на j – тый структурный элемент i -го уровня иерархии и средней информационной нагрузки по иерархии в целом $\bar{I}_{real-\Sigma}(t)$, можно оценить загруженность конкретного элемента по отношению к иерархии в целом. Такую оценку можно проводить, например, с помощью расстояния по Хеммингу:

$$\Delta[I_{real}, \bar{I}_{real-\Sigma}(t)] = |\bar{I}_{real-\Sigma}(t) - I_{real}(i, j, t)| \quad (24)$$

Или для определенной цепочки элементов как части иерархии, которые решают общую задачу по контролю некоторой части информации с борта космического аппарата:

$$\Delta' [I_{real}, \bar{I}_{real-\Sigma}(t)] = \sum |\bar{I}_{real-\Sigma}(t) - I_{real}(i, j, t)| \quad (25)$$

Учитывая, что информационная нагрузка на структурные элемент контроля в большинстве случаев должна распределяться по-возможности равномерно, должно выполняться условие ранонагруженности структурных элементов, т.е. $\Delta \rightarrow 0$ и $\Delta' \rightarrow 0$.

3. Перераспределение информационной нагрузки внутри системы контроля.

Основное предназначение именно иерархического построения системы контроля полета космического аппарата в том, что информационная нагрузка может перераспределяться внутри системы контроля. При этом процесс перераспределения может идти не только заранее, при определении максимальных и минимальных значений функции информационной нагрузки для отдельных элементов, но перераспределение информационной нагрузки вполне возможно при реализации текущей программы полета космического аппарата, т.е. необходимо говорить о перераспределении текущей информационной нагрузки $I_{real}(i, j, t)$. При нормальном режиме функционирования системы контроля перераспределение информационной нагрузки идет от более нагруженных структурных элементов к менее нагруженным.

Для того перераспределения могут выделены два механизма – перераспределение между соседними уровнями иерархии и перераспределение между отдаленными уровнями иерархии. Остановимся на этих механизмах подробнее.

При перераспределении информационной нагрузки между соседними уровнями иерархии системы контроля происходит следующее. В условиях повышения информационной нагрузки на верхние уровни иерархии, например, в условиях реализации усложненной программы полета, при выполнении активных операций часть задач по контролю может быть передана на более низкие уровни иерархии контроля и решаться на уровне контроля блоков и агрегатов. Или, наоборот, в условиях управления полетом в некотором дежурном режиме, часть задач по контролю состояния отдельной аппаратуры может быть отдана верхним уровням иерархии, с учетом их недогруженности. Таким образом, может возникнуть некоторый поток информационной нагрузки между уровнями (соответствующими структурными элементами на этих уровнях). Наличие такого потока свидетельствует об адаптации системы контроля к изменениям объекта управления. Достаточно большие величины такого потока могут оказывать существенное влияние на устойчивость работы системы контроля. Поэтому такой поток требует своего описания формальными средствами и принятия специальных мер, например, на этапе планирования

полетных операций для ограничения интервала времени существования этого потока и его величины.

Для формального описания потока информационной нагрузки от структурного элемента j -го элемента i -го уровня к k -тому элементу $i+1$ -го уровня в момент времени t определим как $F((i, j), (i+1, k), t)$.

Определим, что:

$$F((i, j), (i+1, k), t) > 0 \text{ при } I_{real}(i, j, t) > I_{real}(i+1, k, t), \quad (26)$$

т.е. поток информационной нагрузки идет от верхнего элемента к нижнему

$$F((i, j), (i+1, k), t) < 0 \text{ при } I_{real}(i, j, t) < I_{real}(i+1, k, t), \quad (27)$$

т.е. поток информационной нагрузки идет от нижнего элемента к верхнему

$$F((i, j), (i+1, k), t) = 0 \text{ при } I_{real}(i, j, t) = I_{real}(i+1, k, t), \quad (28)$$

т.е. потока информационной нагрузки между элементами нет

Тогда поток информационной нагрузки в общем виде можно определить как:

$$F((i, j), (i+1, k), t) = \left\langle \frac{(\alpha' \times (I_{real}(i, j, t) - I_{real}(i+1, k, t)), (\beta' \times (I_{real}(i+1, k, t) - I_{real}(i, j, t)))}{(I_{real}(i, j, t), I_{real}(i+1, k, t), i, j, i+1, k, t)} \right\rangle_{где}$$

α' и β' :

$$\alpha' = \begin{cases} \alpha & \text{при } I_{real}(i, j, t) > I_{real}(i+1, k, t) \\ 0 & \text{при } I_{real}(i, j, t) < I_{real}(i+1, k, t) \end{cases} \quad (29)$$

$$\beta' = \begin{cases} 0 & \text{при } I_{real}(i, j, t) > I_{real}(i+1, k, t) \\ -\beta & \text{при } I_{real}(i, j, t) < I_{real}(i+1, k, t) \end{cases} \quad (30)$$

при этом α и β - некоторые положительные функции, т.е. всегда $\alpha > 0$ и $\beta > 0$ при всех значениях аргументов, от которых они зависят.

В соответствии с этим выражением, если в какой-то момент времени t верхнее звено нагружено больше, чем нижнее, т.е. $I_{real}(i, j, t) > I_{real}(i+1, k, t)$ должно произойти балансирование системы и информационный поток положительного знака $F((i, j), (i+1, k), t)$ должен идти от $I_{real}(i, j, t)$ к $I_{real}(i+1, k, t)$. Если в какой-то момент времени t верхнее звено нагружено меньше, чем нижнее, т.е. $I_{real}(i, j, t) < I_{real}(i+1, k, t)$ должно произойти балансирование системы и информационный поток отрицательного знака $F((i, j), (i+1, k), t)$ должен идти от $I_{real}(i+1, k, t)$ к $I_{real}(i, j, t)$. Соответствующий знак

потока обеспечивается функциями α и β . Кроме того, величина потока растет с ростом разницы от $I_{real}(i, j, t)$ к $I_{real}(i+1, k, t)$, т.е. чем больше разница в информационной нагрузке между звеньями системы, тем больше информационный поток между ними и, соответственно, больше потенциально возможные отрицательные влияния данного потока на систему контроля.

Кроме разницы информационных нагрузок $(I_{real}(i, j, t) - I_{real}(i+1, k, t))$ конкретное значение информационного потока может зависеть от загруженности самих рассматриваемых структурных элементов $I_{real}(i, j, t)$ и $I_{real}(i+1, k, t)$, места их расположения в системе контроля - $i, j, i+1, k$ и рассматриваемого момента времени t . Ведение функций α и β позволяет отражать некоторые свойства исследуемой иерархии системы контроля. В качестве примера можно привести моделирование иерархии системы контроля в условиях разного отношения к перераспределению информационной нагрузки в направлении «сверху – вниз» и «снизу – вверх». Пусть $\alpha = const$ и $\beta = const$, т.е. функции α и β не зависят от времени или других величин, при этом $\beta > \alpha$. В этом случае поток информационной нагрузки легче распределяется от верхних звеньев к нижним звеньям, т.е. с ростом разницы β и α , в данном случае, верхнее звено иерархии все более «неохотно» может принимать на себя информационную нагрузку с нижних звеньев. На практике это может обусловлено не только организационными особенностями автоматизированной системы управления полетом, но и сложностью подготовки звеньев комплексного анализа состояния космического аппарата.

В качестве другого примера использования функций α и β можно привести необходимость учета интервала теоретически возможной информационной нагрузки на структурный элемент иерархии. Например, функцию α можно задать как

$$\alpha = \left| \frac{c}{\bar{I}(i, j, t) - \bar{I}(i+1, k, t)} \right|, \quad (31)$$

где $c = const$

$$\bar{I}(i, j, t) = \frac{I_{\max}(i, j, t) - I_{\min}(i, j, t)}{2} \quad (32)$$

$$\bar{I}(i+1, k, t) = \frac{I_{\max}(i+1, k, t) - I_{\min}(i+1, k, t)}{2} \quad (33)$$

Таким образом, при перераспределении информационной нагрузки между звеньями учитывается средняя разность теоретически возможной их информационной нагрузки.

При перераспределении информационной нагрузки между удаленными уровнями иерархии системы контроля происходит следующее. В некоторых случаях перераспределение информационной нагрузки может идти между различными уровнями иерархии. В качестве примера можно привести ситуацию, при которой информация для анализа передается с уровня комплексного анализа космического аппарата на уровень разработчиков отдельной аппаратуры, минуя при этом уровни анализа систем и подсистем космического аппарата.

В этом случае формально описать поток информационной нагрузки от структурного элемента j -го элемента i -го уровня к k -тому элементу q -го уровня в момент времени t можно как $f((i, j), (q, k), t)$.

Определим, что:

$$f((i, j), (q, k), t) > 0 \text{ при } I_{real}(i, j, t) > I_{real}(q, k, t), \quad (34)$$

т.е. поток информационной нагрузки идет от верхнего элемента к нижнему

$$f((i, j), (q, k), t) < 0 \text{ при } I_{real}(i, j, t) < I_{real}(q, k, t), \quad (35)$$

т.е. поток информационной нагрузки идет от нижнего элемента к верхнему

$$f((i, j), (q, k), t) = 0 \text{ при } I_{real}(i, j, t) = I_{real}(q, k, t), \quad (36)$$

т.е. потока информационной нагрузки между элементами нет

Тогда поток информационной нагрузки в общем виде можно определить как:

$$f((i, j), (q, k), t) = \left\langle \begin{matrix} (\gamma' \times (I_{real}(i, j, t) - I_{real}(q, k, t)), (\delta' \times (I_{real}(q, k, t) - I_{real}(i, j, t))), \\ (I_{real}(i, j, t), I_{real}(q, k, t), i, j, q, k, t) \end{matrix} \right\rangle, \quad (36)$$

где γ' и δ' :

$$\gamma' = \begin{cases} \gamma & \text{при } I_{real}(i, j, t) > I_{real}(i+1, k, t) \\ 0 & \text{при } I_{real}(i, j, t) < I_{real}(i+1, k, t) \end{cases} \quad (37)$$

$$\delta' = \begin{cases} 0 & \text{при } I_{real}(i, j, t) > I_{real}(i+1, k, t) \\ -\delta & \text{при } I_{real}(i, j, t) < I_{real}(i+1, k, t) \end{cases} \quad (38)$$

при этом γ и δ - некоторые положительные функции, т.е. всегда $\gamma > 0$ и $\delta > 0$ при всех значениях аргументов, от которых они зависят.

Так же как для случая соседних уровней иерархии, в соответствии с этим выражением, в общем случае, если в какой-то момент времени t верхнее звено нагружено больше, чем нижнее, т.е. $I_{real}(i, j, t) > I_{real}(q, k, t)$ должно произойти балансирование системы и информационный поток положительного знака $f((i, j), (q, k), t)$ должен идти от $I_{real}(i, j, t)$ к $I_{real}(q, k, t)$. Если в какой-то момент времени t верхнее звено нагружено меньше, чем нижнее, т.е. $I_{real}(i, j, t) < I_{real}(q, k, t)$ должно произойти балансирование системы и информационный поток отрицательного знака $f((i, j), (q, k), t)$ должен идти от $I_{real}(q, k, t)$ к $I_{real}(i, j, t)$. Величина потока растет с ростом разницы от $I_{real}(i, j, t)$ к $I_{real}(q, k, t)$, т.е. чем больше разница в информационной нагрузке между звеньями системы, тем больше информационный поток между ними и, соответственно, больше потенциально возможные отрицательные влияния данного потока на систему контроля.

Функции γ и δ играют точно такую же роль, как функции α и β для случая соседних уровней иерархии. Кроме того, с помощью функций γ , δ , α , β можно отразить некоторые свойства иерархии. Например, отразить тезис о том, что величина информационного потока может уменьшаться с увеличением расстояния между уровнями при нисходящем потоке и зависеть от α уровней находящихся между анализируемыми уровнями можно предложить описывать с помощью выражения:

$$\gamma = \frac{1}{\frac{\sum_{m=1}^n \alpha(m)}{n} + |i - q|^\epsilon}, \quad (39)$$

где n – число уровней между i и q .

То есть передача информационной нагрузки тем сложнее, чем отдаленнее друг от друга находятся элементы в структуре контроля и лучше организована передача избыточной информационной нагрузки элементам соседних уровней. Еще раз необходимо подчеркнуть, что (39) – не обязательное правило, а лишь иллюстрация возможности использования функции γ .

4. Балансовая модель информационной нагрузки структурного элемента

Для штатного функционирования системы контроля важно, чтобы информационная нагрузка на каждый структурный элемент находилась в допустимых рамках. Как уже указывалось, информационная нагрузка зависит многих факторов, например, планов полета космического аппарата, особенностей и режимов работы средств

бортовых измерений, наличия и загруженности каналов передачи данных, средств наземного контура управления, соответствующего программно-математического обеспечения, наличия штатных и нештатных ситуаций на борту и т.д. Все эти факторы могут динамически изменяться во времени, и, соответственно, также может динамически меняться информационная нагрузка на структурный элемент. Динамическое распределение информационной нагрузки для каждого структурного элемента иерархической системы контроля возможно промоделировать, используя балансовые модели информационной нагрузки.

На основе представленных выше определений и моделей, для каждого j -го структурного элемента i -го уровня в любой момент времени t может быть сформулировано следующее правило: скорость изменения величины информационной нагрузки определяется потоками информационной нагрузки приходящими в рассматриваемый элемент, а также выходящими из рассматриваемого элемента, а кроме того, она зависит от суммарной реакции системы. Оценить скорость изменения величины информационной нагрузки можно при помощи балансовой модели информационной нагрузки структурного элемента.

Рассмотрим изменения информационной нагрузки на j -й структурный элемент i -го уровня за интервал время Δt как промежуток между $t-1$ и t . Дискретность модельного времени обусловлена в общем случае особенностями функционирования системы контроля полета космического аппарата, поскольку процесс контроля определяется необходимостью распознавания определенных состояний космического аппарата [5], которые хотя и могут достаточно быстро меняться во времени, все же представляют собой отдельно различаемые, т.е. дискретные объекты. В некоторых частных случаях вполне возможен переход к непрерывному времени, но при этом режимы и особенности работы системы контроля должны быть оговорены дополнительно.

Итак, информационная нагрузка на j -й структурный элемент i -го уровня за интервал время Δt можно определить как:

$$I_{real}(i, j, t) = I_{real}(i, j, t-1) + \Delta I_{real}^{\Sigma}(i, j, t) \quad (40)$$

где $\Delta I_{real}^{\Sigma}(i, j, t)$ формируется из следующих составляющих:

1) поток информационной нагрузки, которым структурный элемент обменивается с элементами непосредственно вышестоящего уровня иерархии:

$$\Delta I_{real}^{\uparrow}(i, j, t) = F((i-1, k), (i, j), t) \Delta t \quad (41)$$

2) поток информационной нагрузки, которым структурный элемент обменивается с элементами непосредственно нижестоящего уровня иерархии:

$$\Delta I_{real}^{\downarrow}(i, j, t) = F((i, j), (i+1, m), t) \Delta t \quad (42)$$

3) поток информационной нагрузки, которым структурный элемент обменивается с элементами отдаленного вышестоящего уровня иерархии:

$$\Delta I_{real}^{\uparrow}(i, j, t) = \sum f((q, k), (i, j), t) \Delta t \quad (43)$$

4) поток информационной нагрузки, которым структурный элемент обменивается с элементами отдаленного нижестоящего уровня иерархии:

$$\Delta I_{real}^{\downarrow\downarrow}(i, j, t) = \sum f((i, j), (p, m), t) \Delta t \quad (44)$$

5) снижение/увеличение потока информационной нагрузки за счет суммарной реакции системы:

$$\Delta I_{real}^R(i, j, t) = R_{\Sigma}(i, j, I_{real}, I_{min}, I_{max}) \Delta t \quad (45)$$

Таким образом, суммарное изменение информационной нагрузки, в первом приближении, без учета взаимовлияния, можно определить как:

$$\Delta I_{real}^{\Sigma}(i, j, t) = \left[F((i-1, k), (i, j), t) + F((i, j), (i+1, m), t) + \sum f((q, k), (i, j), t) + \right. \\ \left. + \sum f((i, j), (p, m), t) + R_{\Sigma}(i, j, I_{real}, I_{min}, I_{max}) \right] \Delta t \quad (46)$$

В качестве допущения примем, что интервал времени Δt является сравнительно малым, чтобы величины $F(\bullet), f(\bullet), R_{\Sigma}(\bullet)$ можно было считать постоянными. Кроме того, предполагается, что вся дополнительная информация, поступающая в структурный элемент принимается к работе, а не игнорируется, т.е. самопроизвольные «стоки» информационной нагрузки в элементах системы в первом приближении не учитываются.

Для того, чтобы получить скорость изменения информационной нагрузки на j -й структурный элемент i -го уровня, разделим обе части на Δt :

$$\frac{\Delta I_{real}^{\Sigma}(i, j, t)}{\Delta t} = \left[F((i-1, k), (i, j), t) + F((i, j), (i+1, m), t) + \sum f((q, k), (i, j), t) + \right. \\ \left. + \sum f((i, j), (p, m), t) + R_{\Sigma}(i, j, I_{real}, I_{min}, I_{max}) \right] \quad (47)$$

Таким образом, оценивая по (47) скорость изменения величины информационной нагрузки, вполне возможно проанализировать динамическое распределение информационной нагрузки для каждого структурного элемента иерархической системы контроля. Данное уравнение записано для произвольного уровня иерархии i , при

выполнении условия $1 < i < n$. Очевидно, что для самого верхнего уровня иерархии $\Delta I_{real}^{\uparrow}(i, j, t)$ и $\Delta I_{real}^{\uparrow\uparrow}(i, j, t)$ - обращаются в ноль, поскольку не существуют более верхние уровни, точно также для самого нижнего уровня иерархии $\Delta I_{real}^{\downarrow}(i, j, t)$ и $\Delta I_{real}^{\downarrow\downarrow}(i, j, t)$ - обращаются в ноль, поскольку не существуют более нижние уровни. Т.е. поток информационной нагрузки на границах иерархии равен нули и можно записать граничные условия:

$$\Delta I_{real}^{\uparrow}(i, j, t) = 0, \quad \Delta I_{real}^{\uparrow\uparrow}(i, j, t) = 0 \quad (48)$$

$$\Delta I_{real}^{\downarrow}(i, j, t) = 0, \quad \Delta I_{real}^{\downarrow\downarrow}(i, j, t) = 0 \quad (49)$$

Кроме того, определим, что для некоторого начального момента времени $t = t_0$

$$I_{real}(i, j, t_0) = I_{real}^0(i, j), \quad \text{при } 1 \leq i \leq n \text{ и } 1 \leq j \leq m_i \quad (50)$$

Уравнения (46) и (47) с условиями (48), (49) и (50), а также заданными функциями $I_{\max}(i, j, t)$, $I_{\min}(i, j, t)$, α , β , γ , δ , k_{cs} , R_{sk} , R_{cs} представляет собой замкнутую дискретную модель распределения информационной нагрузки. Эта модель позволяет для любого момента времени $t > t_0$ и для любых структурных элементов при $1 \leq i \leq n$ и $1 \leq j \leq m_i$ найти распределение информационной нагрузки в системе. Приведем пример некоторых направлений, в которых используется данная модель:

1) Получение условий существования перераспределения информационной нагрузке в системе контроля состояния космического аппарата в зависимости от реализуемой программы полета.

2) Анализ и синтез прогноза опасных явлений при перераспределении информационной нагрузки, например, превышение допустимых значений информационной нагрузки на некоторые структурные элементы, явления дисбаланса информационной нагрузке в системе и т.д.

3) Изучение результатов влияния на систему контроля изменений объекта управления – космического аппарата, например, отказы бортовых систем, доработка бортового программно-математического обеспечения и т.д.

4) Анализ несовершенства структуры системы контроля и поиск «узких» мест в иерархии контроля, поиск вариантов структуры, удаляющей имеющиеся недостатки.

Возможны исследования разных комбинаций перечисленных проблем, при этом, решение любых проблем с помощью данной обобщенной модели должен сопровождаться

тщательной постановкой задач и аккуратной интерпретацией результатов в терминах используемой модели.

5. Использование моделирования иерархии для разработки структуры форматов отображения телеметрической информации

В качестве одного из практических приложений представленного метода описания и моделирования иерархии системы контроля можно привести создание иерархических форматов отображения телеметрической информации. Структура иерархических форматов отображения телеметрической информации представлена на рис.2.

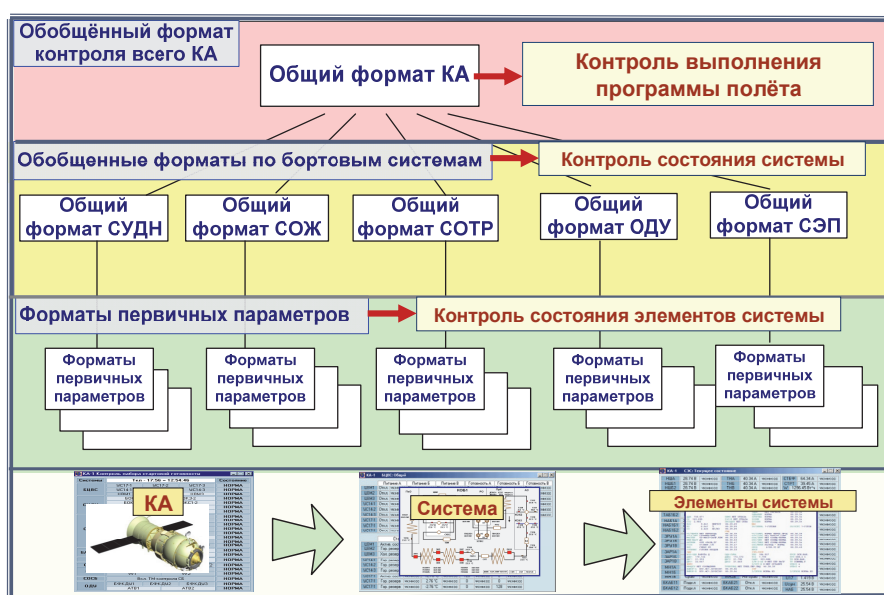


Рис .2. Структура иерархических форматов отображения телеметрической информации

Исходя из условий эффективности работы группы управления космического аппарата, каждый телеметрический формат должен нести определенную информационную нагрузку. Эта нагрузка в данном случае определяется количеством отображаемых телеметрических параметров, метом их отображения на форматах, условиями различимости информационного образа для группы управления полетом.

Использование представленных выше методов позволяет оптимальным образом скомпоновать телеметрические форматы исходя из особенностей бортовых систем космического аппарата и предполагаемой к реализации программы его полета.

Заключение

Задача оптимального распределения информационной нагрузки по структурным элементам контроля является в практическом отношении достаточно сложной и далеко не исчерпывается представленным выше направлением. Наоборот, представленные выше модели отражают один из возможных подходов к практическому решению этой задачи. Кроме того, использование формальных моделей и методов не гарантирует само по себе, автоматически полное решение данной задачи, поскольку эффективность использования любых формальных методов во много зависит от исходных данных.

Однако, применение формально описанных моделей в процессе обсуждения и принятия решений в процессе создания и модификации иерархической системы контроля, безусловно, позволяет достаточно четко отследить процесс формирования показателей, на основе которых такие решения принимаются, дает возможность выявить недостатки и внести дополнения в исходные данные, подобрать объективные критерии сравнения разных вариантов систем.

Литература:

1. Дмитриев А.К., Юсупов Р.М. Идентификация и техническое диагностирование. Л.: Изд-во ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1987.
2. Глазов Б.И. Методологические основы информационно-кибернетической системотехники. М.: Изд-во Академии им. Дзержинского, 1992.
3. Матюшин М.М. Использование логико-вероятностной модели для оценки значимости структурных элементов оперативного контура управления РС МКС. // Космонавтика и ракетостроение. 2007. Вып. 1(46) . С.144 -153.
4. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Изд-во «Мир», 1973.
5. Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полётами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009.
6. Справочник по инженерной психологии /под ред. Б.Ф. Ломова. М.: Изд-во «Машиностроение», 1982.
7. Russel S., Norvig P. Artificial Intelligence. A Modern Approach. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458