

СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦЕНТРА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТАМИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ПОЛУЧЕНИЯ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Н. Л. Соколов, И. А. Селезнева (Королев)

Введение

Опыт использования КА по целевому применению показал высокую эффективность решения задач в областях природопользования, материаловедения, биологии, экологического мониторинга и в других областях. При этом одним из важнейших факторов, влияющих на эффективность получения целевой информации с КА, является создание рентабельного Центра управления полетами (ЦУП) КА, обеспечивающего высокую надежность и оперативность управления КА научного и социально-экономического назначения (НСЭН).

Как и большинство объектов высокого уровня сложности, ЦУП имеет разветвленную иерархическую структуру и может быть отнесен к классу Больших систем управления (БСУ). В работе представлены результаты математической формализации процессов функционирования ЦУП как БСУ. Такая формализация дает возможность выявить организационные и технические ресурсы и выработать требования к оптимальной структуре ЦУП.

Современное состояние работ по математической формализации функционирования БСУ

К настоящему времени в области исследования БСУ накоплен значительный опыт. Этому вопросу посвящены монографии М. Месаровича, Д. Мако, И. Такахары [1], А. Д. Цвиркуна [2], Н. Н. Моисеева [3] и др. Вопросы структуры общей оптимизации иерархических систем исследованы в работе А. И. Эрлиха, В. Л. Вена [4]. В работе [5] рассмотрены современные методы оптимизации характеристик систем и управления ими. Книга ориентирована на задачи высокой размерности с формированием иерархических структур, позволяющих находить оптимальное решение при существенном снижении вычислительных затрат. Для конкретных БСУ в ряде работ рассмотрены задачи оптимизации структуры и предложены различные методы решения. Например, в работах Р. Куликовского [6], [7] для иерархических систем распределения ресурсов ищется решение поставленной задачи оптимизации структуры для некоторого класса целевой функции. В работе С. Губернича [8] для решения задачи оптимизации иерархии, представленной в виде задачи дискретного программирования со специальной функцией цели, предложен метод ветвей и границ. В работе О. И. Бронштейна и А. Д. Цвиркуна [9] дана математическая модель описания многоуровневой системы массового обслуживания и при определенных условиях поставлена задача оптимизации этой системы как задача безусловной минимизации. В работах Б. А. Власюка, И. С. Моросанова [10] и И. М. Чунченпака [11] приведены простые, но содержательные примеры иерархических систем с нетривиальной оптимальной структурой. В статье [12] на основе методов теории марковских процессов предложен способ исследования возмущенных траекторий движения КА в атмосфере. Движение аппарата интерпретируются как изменение вероятностей его пребывания в некоторых фиксированных положениях фазового пространства.

В настоящей работе анализируется проблема математической формализации ЦУП как БСУ с использованием наиболее распространенного подхода к исследованию иерархических систем, связанного с применением методов теории массового обслуживания.

Выделение иерархических уровней ЦУП как БСУ

Известны два основных подхода к синтезу иерархических БСУ. При первом – структура иерархической системы считается заданной. На ее основе производится оптимизация распределения функций, выполняемых отдельными узлами. При втором – структура определяется в результате синтеза основных или одной ведущей функции.

При построении моделей функционирования ЦУП КА реализуются общие закономерности структурного построения иерархических систем управления:

- последовательное вертикальное расположение подсистем, составляющих соответствующую соподчиненность;
- приоритет действий или право «вмешательства» подсистемы верхнего уровня в действия подсистем нижнего уровня;
- зависимость действий подсистемы верхнего уровня от фактического исполнения своих функций подсистемами нижнего уровня;
- значительно большая степень неопределенности в описании задач управления на верхних уровнях иерархии.

Анализ процессов функционирования элементов ЦУП как БСУ в процессе управления автоматическими КА позволяет выявить основные иерархические уровни:

- верхний уровень (уровень координации) – реализует координацию всех действий по управлению КА с целью наиболее эффективного выполнения программы полета КА;
- второй уровень (уровень самоорганизации) – реализует выбор критериев и алгоритмов, используемых на нижних уровнях иерархии;
- третий уровень (уровень адаптации) – осуществляет конкретизацию множеств неопределенностей для подсистем верхних уровней;
- четвертый уровень (уровень выбора) – осуществляет решения частных задач в соответствии с алгоритмическими предписаниями от подсистем высшего уровня.

Математическая формализация функционирования ЦУП как БСУ на основе методов теории массового обслуживания

Конкретизируем общий методологический подход применительно к специфике функционирования подсистем ЦУП в процессе управления автоматическими КА. В работе делается попытка сформулировать и исследовать общую задачу оптимального управления ЦУП-БСУ с использованием методов теории массового обслуживания. Эти методы нашли широкое применение при исследовании динамических систем управления с ограниченно развернутой структурой [13], однако они использовались недостаточно полно для оптимизации структуры иерархических систем управления.

В теории массового обслуживания известен метод последствия [14], когда отличающиеся от пуассоновских реальные потоки аппроксимируются потоками Эрланга и в схему возможных состояний системы вводятся некоторые фиктивные «псевдосостояния». В этом случае реальные (не марковские) процессы, происходящие в БСУ, удастся свести к марковским и описать их с помощью системы дифференциальных уравнений Колмогорова [14].

В рамках настоящей работы ограничимся формальным допущением о том, что процессы функционирования в системе ЦУП-БСУ являются марковскими, и на основе этого формализуем рассматриваемую задачу, используя методы теории массового обслуживания.

Дадим определение элементам пространства состояний ЦУП как БСУ на основе приведенной ориентировочной схемы взаимодействия отдельных элементов четырехуровневой иерархической системы (рисунок).

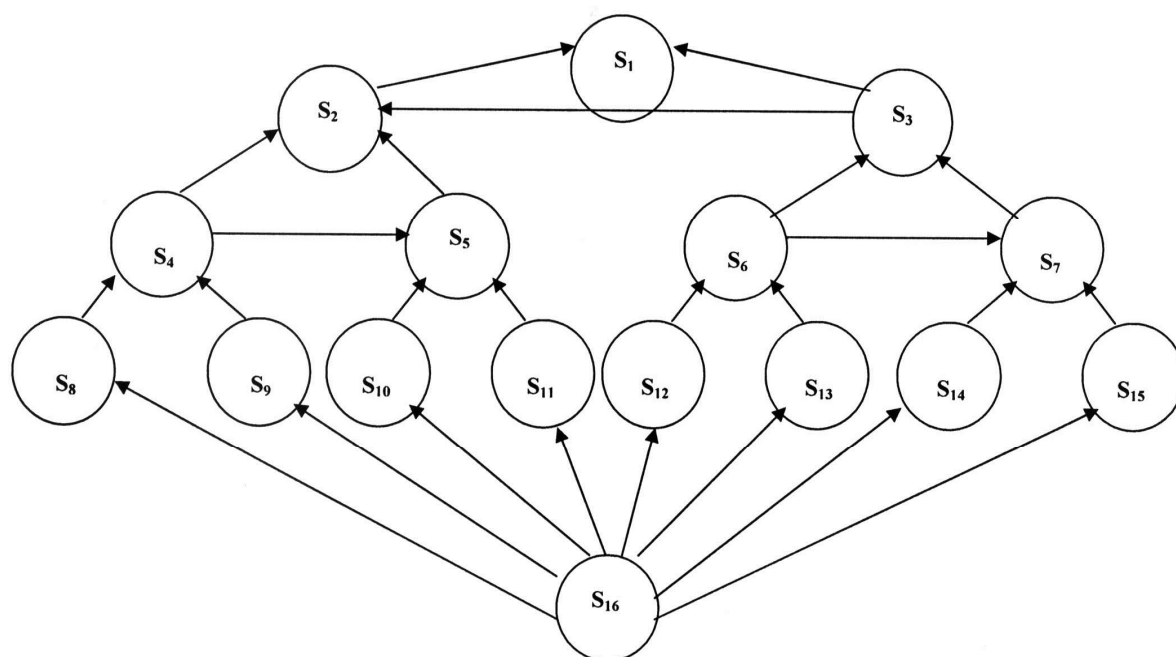


Схема взаимодействия отдельных элементов системы

Опишем элементы графа состояния согласно приведенному рисунку:

S_1 – выполнение программы полета; S_2 – решение задач планирования работы бортовых систем; S_3 – выдача оперативных командных воздействий на основе анализа состояния бортовых систем; S_4 – решение задач баллистико-навигационного обеспечения полета; S_5 – формирование массивов командно-программной информации; S_6 – диагностика состояния бортовых систем; S_7 – выработка рекомендаций по управлению бортовыми системами; S_8 – прием и обработка измерений текущих навигационных параметров; S_9 – определение задействованных средств наземного комплекса управления; S_{10} – прием и обработка исходных данных Главного оператора; S_{11} – прием и обработка исходных данных разработчиков бортовых систем; S_{12} – прием и обработка телеметрической информации; S_{13} – прием и обработка информации оперативного контроля; S_{14} – проверка правильности выдачи командных воздействий; S_{15} – предварительный прогноз состояния бортовых систем; S_{16} – исходное состояние.

Схему, представленную на рисунке, можно интерпретировать как граф состояний ЦУП с иерархической структурой. Процесс функционирования системы начинается из исходного состояния S_{16} и, переходя через промежуточные состояния S_i , завершается выполнением программы полета (состояние S_1).

Обозначим P_i ($i = 1, \dots, 16$) вероятность нахождения системы в состоянии S_i . Нетрудно видеть, что в начальный момент времени t_0 :

$$P_{16}(t_0) = 1, P_i(t_0) = 0 \text{ при } i \neq 16. \quad (1)$$

Для представленного графа состояний значения вероятностей P_i определяются системой дифференциальных уравнений Колмогорова. В общем виде система уравнений записывается следующим образом:

$$\frac{dP_i}{dt} = \sum_{i+1}^{n-i-1} \lambda_{i+1}^i P_{i+1} - \sum_1^{i-1} \lambda_i^{i-1} P_i \quad i=1, \dots, 16. \quad (2)$$

Интенсивности потоков событий λ_j^i будем определять как скорость выполнения операций, необходимых для перевода системы из состояния i в состояние j .

В рамках проводимых исследований номинальные значения λ_j^i определялись на основе существующего опыта выполнения соответствующих операций. В таблице приведены номинальные значения λ_j^i в размерностях «1/сек»:

λ_2^1	$9,25 \cdot 10^{-4}$	λ_5^2	$9,25 \cdot 10^{-4}$	λ_9^4	$2,08 \cdot 10^{-3}$	λ_{14}^7	$1,67 \cdot 10^{-3}$	λ_{16}^{11}	$1,85 \cdot 10^{-3}$
λ_3^1	$1,67 \cdot 10^{-3}$	λ_6^3	$1,67 \cdot 10^{-3}$	λ_{10}^5	$8,33 \cdot 10^{-4}$	λ_{15}^7	$8,33 \cdot 10^{-4}$	λ_{16}^{12}	$1,11 \cdot 10^{-3}$
λ_3^2	$2,78 \cdot 10^{-3}$	λ_6^7	$1,39 \cdot 10^{-3}$	λ_{11}^5	$1,67 \cdot 10^{-3}$	λ_{16}^8	$1,11 \cdot 10^{-3}$	λ_{16}^{13}	$2,08 \cdot 10^{-3}$
λ_4^2	$1,85 \cdot 10^{-3}$	λ_7^3	$2,78 \cdot 10^{-3}$	λ_{12}^6	$9,25 \cdot 10^{-4}$	λ_{16}^9	$2,78 \cdot 10^{-3}$	λ_{16}^{14}	$4,17 \cdot 10^{-3}$
λ_4^5	$1,39 \cdot 10^{-3}$	λ_8^4	$1,39 \cdot 10^{-3}$	λ_{13}^6	$1,85 \cdot 10^{-3}$	λ_{16}^{10}	$9,25 \cdot 10^{-4}$	λ_{16}^{15}	$1,67 \cdot 10^{-3}$

В качестве критерия решения вариационной задачи будем использовать минимум времени перевода системы в состояние S_1 , т.е.

$$T_{\Sigma} = \min \text{ при } P_1(T) = 1. \quad (3)$$

С учетом вышеизложенного сформулируем вариационную задачу: для системы дифференциальных уравнений (2) требуется определить совокупность интенсивностей переходов λ_j^i , изменяющихся в пределах $\pm 20\%$ относительно своих номинальных значений (таблица), обеспечивающую перевод системы из начального состояния (1) в конечное (3).

Анализ полученных результатов

Путем численного интегрирования уравнений (2) определим зависимости вероятностей P_i от времени t при номинальных значениях интенсивностей переходов. Расчеты показали, что суммарное время перехода системы в конечное состояние T_{Σ} составляет 63 минуты 45 секунд. Был отмечен достаточно длительный процесс изменения от 1 до 0 вероятностей P_5 , P_7 и особенно P_2 . Значения других вероятностей от времени менялись более интенсивно. Очевидно, что на скорость увеличения вероятности $P_1(t)$ от 0 до 1, а следовательно и на минимизируемое время T_{Σ} , существенно влияет интенсивность процесса изменения $P_2(t)$ и в меньшей мере $P_5(t)$ и $P_7(t)$.

Дана оценка частным влияниям вариаций λ_j^i относительно номинальных значений на время T_{Σ} . Показано, что все интенсивности λ_j^i можно разделить на две категории. К одной категории относятся такие λ_j^i , увеличение значений которых приводит к снижению времени T_{Σ} . Для рассматриваемого примера это λ_2^1 , λ_3^1 , λ_4^5 , λ_5^2 , λ_6^7 , λ_7^3 , λ_8^4 , λ_{12}^6 , λ_{16}^8 , λ_{16}^{10} , λ_{16}^{12} . Вариации остальных 14 значений λ_j^i : λ_3^2 , λ_4^2 , λ_6^3 , λ_9^4 , λ_{10}^5 , λ_{11}^5 , λ_{13}^6 , λ_{14}^7 , λ_{15}^7 , λ_{16}^9 , λ_{16}^{11} , λ_{16}^{13} , λ_{16}^{14} , λ_{16}^{15} – не влияют на значение T_{Σ} .

Следует отметить, что повышение оперативности решения задач обеспечивается не только за счет роста интенсивности их выполнения, но и за счет изменения структурного состава БСУ.

Заключение

Представленный математический аппарат принципиально может быть использован для исследования быстродействия альтернативных вариантов структурного построения иерархических систем ЦУП как БСУ. При этом, осуществляется не только сравнительная оценка быстродействия альтернативных вариантов, но и для каждого варианта определяются критические звенья системы.

Дальнейшее развитие предложенного в работе методологического подхода связано с уточнением математических моделей функционирования ЦУП-БСУ за счет использования метода «псевдосостояний», с учетом влияния на систему непрогнозируемых случайных возмущающих факторов.

Практическая значимость предлагаемого математического аппарата связана с необходимостью решения проблемы создания компактных, рентабельных, высокотехнологичных структур управления различными КА НСЭН, запуск которых планируется в 2010–2012 гг.

Литература

1. Месарович М., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973.
2. Цвиркун А. Д. Структура сложных систем. М.: Советское радио. 1975.
3. Моисеев Н. Н. Информационная теория иерархических систем. Труды всесоюзной школы – семинара по управлению большими системами. Тбилиси: Мецниереба. 1973.
4. Эрлих А. И., Вен В. Л. К вопросу о выборе структуры процесса программирования. Программный метод управления. М.: Вычислительный центр АН СССР. 1976. Вып. 3.
5. Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управления. М.: Машиностроение. 1986.
6. Kulikowski R. Optimization of large – scale system. *Automatika*. 1970, v. 6.
7. Kulikowski R. Modelling of production, utility structure, process and technological change. *Control and Cybernetics*. 1975, v. 4.
8. Guberinic S. On structural optimization in hierarchical system. *Preprints of the IFACIFORS symposium*. Varna, 1974.
9. Бронштейн О. И., Цвиркун А. Д. Об иерархических системах управления. *Автоматика и телемеханика*, 1968. № 1.
10. Власюк В. А., Моросанов И. С. Синтез иерархической структуры управления в больших системах. *Автоматика и телемеханика*, 1973. № 3.
11. Чунченпак И. М. Оптимизация структуры систем распределения ресурсов. Труды института электронных управляющих машин. М.: 1976.
12. Соколов Н. Л., Поздняк Т. И., Пинчук В. Б. К вопросу об использовании теории марковских процессов для исследования движения КА в атмосфере. *Космические исследования*, 1990. Т. 28, № 3.
13. Денисов А. А., Колесников Д. Н. Теория больших систем управления. Л.: Энергоиздат, 1982.
14. Венцель Е. С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1982.