

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИКО -ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЖИВУЧЕСТИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

А.Н. Павлов, В.Н. Воротягин, А.В. Гордеев (Санкт-Петербург)

Введение

Одним из важнейших направлений применения космических средств и технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для научных, социальных и военных целей является создание, постоянное совершенствование и успешная эксплуатация аппаратуры ДЗЗ. Многие страны уже успешно используют в развитие своей экономике малые космические аппараты (МКА) ДЗЗ, а также на различных этапах находятся до 300 новых проектов по изучению Земли из космического пространства. Виден быстрый прогресс в области повышения технического уровня МКА и сокращения затрат на их создание и эксплуатацию. Это возможно за счет применения новых материалов конструкций и вариантов проектирования, минимизации массогабаритных характеристик, разработки унифицированных орбитальных платформ, применение современных компьютерных средств и технологий при формировании бортовых функций, искусственного интеллекта, перспективных возможностей формирования многоспутниковых «кластерных» космических систем из разнотипных МКА ДЗЗ [1, 2].

Постоянное совершенствование номенклатурного состава, усовершенствование функциональных элементов и исполнительных органов, уменьшение стоимости МКА ДЗЗ, технический прогресс в целом говорят о том, что в скором времени космические средства ДЗЗ займут основную часть кластера МКА.

С целью определения роли конкретных комплектующих элементов создаваемого объекта следует проводить анализ, во-первых, показателей надежности реализации системой различных выходных функций с учетом структурно-функциональной избыточности, во-вторых, ресурсных показателей (электропотребления, массогабаритные, стоимостные и др.) и, наконец, показателей структурно-функциональной живучести МКА в условиях воздействия факторов космического пространства (ФКП) [3, 4].

Структурный анализ функционирования БС МКА, представленный в работах [3, 4, 7], начинается с построения схемы функциональной целостности (СФЦ) объекта и сводится к тому, что наиболее благоприятным способом повышения надежности систем является введение структурно-функциональной избыточности (резервирования функциональных элементов (ФЭ) МКА). Если различные варианты комбинаторного резервирования можно учесть при построении СФЦ [6, 7], то максимальную кратность резервирования ФЭ можно задать при формальной постановке решаемой задачи. Следует отметить, что при выборе вариантов проектируемой БС МКА следует учесть показатели структурно-функциональной надежности и живучести реализации режимов функционирования, электропотребления, а также массогабаритные и стоимостные параметры.

Содержательная постановка задачи структурно-функционального синтеза облика БС МКА сводится к следующему: требуется определить эффективные варианты конфигураций БС МКА, обеспечивающие максимум структурно-функциональной надежности и живучести реализации режимов функционирования БС МКА, минимум электропотребления и массогабаритных характеристик БС МКА.

Комплексное моделирование облика БС МКА

Решение задачи структурно-функционального синтеза облика БС МКА связано с преодолением ряда трудностей [5]: большой размерности и нелинейности целевых показателей математической модели; необходимости учета в моделях воздействия факторов внешней среды на МКА; разрешения критериальной неопределенности. Для преодоления указанных препятствий предлагается следующий комплексный (аналитико-имитационный) подход к моделированию облика БС МКА.

Безотказность работы МКА напрямую зависит от прочности конструкционных материалов и элементов бортового оборудования к влиянию окружающей космической среды. По разным оценкам экспертов в области оборонной промышленности, более половины отказов и сбоев в работе бортовой аппаратуры МКА обусловлено неблагоприятным воздействием факторов космического пространства (ФКП). Во время полета на космические средства воздействует обширный комплекс ФКП [10]: свободные электроны и гравитационная энергия, потоки космической плазмы, солнечное электромагнитное излучение, заатмосферная субстанция, различный космический мусор и другие факторы. В результате такого воздействия в материалах и элементах бортового оборудования МКА протекают разнообразные физико-химические процессы, приводящие к ухудшению их характеристик и параметров. В зависимости от характера процессов, инициируемых воздействием космической среды, происходящие изменения свойств материалов и элементов оборудования могут иметь разный временной масштаб, быть обратимыми или необратимыми, представлять различную опасность для БС. Некоторые из воздействующих факторов, например, космическая плазма и солнечное ультрафиолетовое излучение, оказывают влияние на свойства материалов и характеристики БС и, как следствие, к отказам в работе МКА по истечении некоторого периода эксплуатации, так и к возникновению внезапных отказов в работе бортовой аппаратуры, непосредственно сопровождающих воздействие.

Под показателем структурно-функциональной живучести БС МКА в данной статье будем понимать вероятность того, что система сохранит эффективность своего функционирования при воздействиях ФКП. Однако воздействия ФКП трудно прогнозируемы, поэтому формально учесть это воздействие при оценивании показателя структурно-функциональной живучести в аналитическом виде не представляется возможным. В данном случае показатель живучести функционирования БС МКА зададим алгоритмически с помощью имитационного моделирования. Воспользуемся для этого методом статистических испытаний Монте-Карло [6].

Рассмотрим некоторый вариант реализации БС МКА. Каждый ФЭ БС, используемый в рассматриваемой реализации, характеризуется вероятностью безотказной работы (ВБР) $p_i, i \in N$. Одним из естественных методов статистического моделирования для оценки показателя структурно-функциональной живучести БС МКА является имитация случайных отказов ФЭ варианта облика системы и проверка работоспособности полученных состояний БС.

Суть указанной процедуры заключается в следующем.

1. Для каждого i -го ФЭ генерируется случайное число по равномерному закону распределения ξ_i из интервала $[0,1]$.
2. Данные числа $\{\xi_i, i \in N\}$ сравниваются с известными для рассматриваемого варианта облика БС ВБР $\{p_i, i \in N\}$ соответствующих ФЭ.
3. Если $\xi_i \leq p_i$, то $p_i = 1$ (i -й ФЭ работоспособен), в противном случае $p_i = 0$ (i -й ФЭ отказал).

4. После построения случайной реализации состояния всех ФЭ определяется работоспособность БС. Если $P_F(\{p_i, q_i = 1 - p_i\}, i \in N) = 1$, то БС работоспособна. И в счетчик числа успешных испытаний добавляется единица. Другими словами, реализуется схема испытаний Бернулли.

5. Шаги 1-4 процедуры повторяются заданное число испытаний. Полученное значение в счетчике числа успешных испытаний делится на общее число проведенных испытаний, в результате получается значение показателя живучести данного варианта облика БС МКА ДЗЗ.

Для поиска обоснованных и достоверных вариантов облика проектируемых БС МКА уместно применить в рамках предлагаемой имитационной системы аналитическую модель формирования эффективных (паретовских) вариантов конфигураций БС МКА.

Совместное использование таких разнотипных моделей, методов и алгоритмов позволит взаимно компенсировать их объективно существующие недостатки и ограничения, одновременно усилить их положительные качества. Так для решения задачи синтеза вариантов облика БС МКА воспользуемся аналитической

многокритериальной моделью [3, 4]: $\min_{X \in \Delta} C(X), \min_{X \in \Delta} V(X), \max_{X \in \Delta} P(X)$.

Множество допустимых альтернатив Δ формируется с учетом ограничений, связанных узкой и широкой номенклатурой используемых комплектующих изделий. Для широкой номенклатуры комплектующих элементов вводятся ограничения

$$\sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \leq 1, \forall i \in N$$

, т.е. в качестве i -го ФЭ используется какой-то элемент J -го типа из его номенклатуры ($x_{ij} \in \{0, 1\}$, m_i – количество типовых элементов). Для узкой

$$\sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \leq 1, \forall i \in N$$

номенклатуры комплектующих элементов ограничение требуется трактовать следующим образом – максимальная кратность резервирования i -го ФЭ не более m_i и $x_{ij} = 1$ тогда, когда осуществляется дублирование i -го ФЭ кратностью J .

При этом $p_{i1} = p_i, p_{i2} = 1 - (1 - p_i)^2, \dots, p_{im_i} = 1 - (1 - p_i)^{m_i}, \forall i \in N,$

$\vartheta_{i1} = \vartheta_i, \vartheta_{i2} = 2\vartheta_i, \dots, \vartheta_{im_i} = m_i \vartheta_i, \forall i \in N,$ и $c_{i1} = c_i, c_{i2} = 2c_i, \dots, c_{im_i} = m_i c_i, \forall i \in N,$

Тогда целевые функции можно представить следующим образом: показатель

электропотребления БС МКА – $C(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} c_{ij} \cdot x_{ij}$, масса-габаритный показатель

БС МКА – $V(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \vartheta_{ij} \cdot x_{ij}$, показатель структурно-функциональной надежности

БС МКА – $P(X) = P_F(\sum_{j=1}^{m_1} p_{1j} \cdot x_{1j}, \sum_{j=1}^{m_2} p_{2j} \cdot x_{2j}, \dots, \sum_{j=1}^{m_n} p_{nj} \cdot x_{nj})$.

Другими словами, следует найти эффективные (паретовские) варианты проекта БС МКА $\Delta^{nd} \subseteq \Delta$, удовлетворяющие требованиям указанных критериев (электропотребления, массы, структурно-функциональной надежности реализации режимов функционирования БС МКА), и максимизирующие показатель структурно-функциональной живучести.

Пример практической реализации комплексного моделирования рациональных вариантов облика БС МКА

Особенности аналитической модели многокритериального выбора эффективных вариантов проекта БС МКА связаны с тем, что множество допустимых альтернатив дискретно, целевая функция $P(X)$ нелинейная и присутствует критериальная неопределенность. Для преодоления критериальной неопределенности в работе [3, 9] было обосновано применения метода последовательных уступок (лексикографического интервального результирующего отношения предпочтения), позволяющего осуществить последовательное сужение множества альтернатив $X^* \in \Delta^2 \subseteq \Delta^1 \subseteq \Delta$

следующим образом: $\Delta^1 = \{X \in \Delta \mid P(X) \geq P_{\max} - \varepsilon_1\} \Rightarrow \Delta^2 = \{X \in \Delta^1 \mid C(X) \leq C_{\min} + \varepsilon_2\} \Rightarrow$

$$X^* = \underset{X \in \Delta^2}{\operatorname{arg\,min}} V(X) \quad P_{\max} = \max_{X \in \Delta} P(X) \quad C_{\min} = \min_{X \in \Delta^1} C(X)$$

Другими словами, вначале проводится оптимизация по первой целевой функции $P(X)$ (надежность МКА по реализации режимов функционирования), определяется

максимальное значение этой функции $P_{\max} = \max_{X \in \Delta} P(X)$ и вводится максимальное

допустимое снижение данного показателя (уступка) ε_1 . Далее производится оптимизация по $C(X)$ (электропотребление БС МКА), определяется минимальное

значение этой функции $C_{\min} = \min_{X \in \Delta^1} C(X)$ и вводится максимальное допустимое

повышение данного показателя (уступка) ε_2 . Наконец, осуществляется оптимизация по показателю $V(X)$ (масса БС МКА).

Для нахождения заданного числа равномерно расположенных решений в области Парето был разработан [3, 4] алгоритм, в основе которого лежит метод уступок и способ линеаризации целевой функции $P(X)$ с использованием структурной значимости ФЭ неоднородной БС. Дальнейшее сужение множества недоминируемых альтернатив (множество Парето) осуществляется в интерактивном режиме с активным привлечением дополнительной информации от лица, принимающего решение (ЛПР).

Для нахождения рациональных вариантов реализации БС МКА воспользуемся исходными данными для системы управления движением (СУД) МКА «Аист-2д» [8], представленными в работе [3]. СУД МКА «Аист-2д» выполняет режимы «точной», «грубой» ориентации и «ориентации на Солнце».

Результаты применения аналитической модели и алгоритма многокритериального синтеза облика СУД МКА при реализации всех режимов ориентации, приведены в таблице 1.

Используя дополнительную информацию от ЛПР, которая состоит в том, что надежность реализации режимов ориентации должна быть не ниже 0.94, показатель электропотребления изделия не является критичным, масса СУД не должна превышать 20.0 условных единиц, ему будут предложены для дальнейшего анализа только 2 варианта из таблицы 1 – варианты № 15 и № 16.

ВБР компонентов облика СУД МКА для данных вариантов представлены в таблице 2.

Применив имитационную модель, осуществим вычисление показателей структурно-функциональной живучести этих вариантов для различных режимов ориентации, результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 1. Эффективные (паретовские) варианты облика СУД МКА «Аист-2Д»

| Вариант | ОИУС1 | ОИУС2 | ОИУС3 | ОИУС4 | УДМ1 | УДМ2 | УДМ3 | УДМ4 | ССН | ОЗД1 | ОЗД2 | ПОЗ1 | ПОЗ2 | МА1 | МА2 | ЭМ1 | ЭМ2 | ЭМ3 | Масса | Электропотребление | Надежность |
|---------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|--------------------|------------|
| 1 | 7 | 7 | 7 | 6 | 4 | 4 | 4 | 4 | - | - | - | 1 | - | 5 | 5 | 2 | 2 | 2 | 16,38 | 83,5 | 0,643 |
| 2 | 2 | 2 | 6 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | - | - | - | - | 3 | 5 | 3 | 2 | 2 | 2 | 8,18 | 104,0 | 0,698 |
| 3 | 2 | 7 | 6 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | - | - | - | 3 | 4 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 12,20 | 104,5 | 0,769 |
| 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | - | - | - | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 2 | 2 | 8,21 | 125,0 | 0,820 |
| 5 | 7 | 7 | 7 | 7 | 4 | 4 | 4 | 4 | - | - | - | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 5 | 16,42 | 104,0 | 0,827 |
| 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | 4 | 4 | 4 | 4 | - | - | - | 1 | 3 | 6 | 6 | 2 | 5 | 3 | 20,45 | 104,0 | 0,866 |
| 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 4 | 4 | 4 | 4 | - | - | - | 1 | 1 | 6 | 6 | 3 | 3 | 3 | 21,87 | 103,0 | 0,885 |
| 8 | 7 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | - | - | - | 4 | 4 | 3 | 6 | 3 | 3 | 3 | 11,91 | 124,5 | 0,895 |
| 9 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | - | - | - | 3 | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 8,20 | 137,5 | 0,917 |
| 10 | 4 | 4 | 4 | 2 | 6 | 6 | 6 | 4 | - | - | - | 3 | 4 | 4 | 6 | 3 | 5 | 5 | 12,17 | 146,4 | 0,928 |
| 11 | 7 | 7 | 4 | 7 | 4 | 4 | 4 | 4 | - | - | - | 3 | 4 | 4 | 6 | 5 | 5 | 5 | 16,32 | 124,0 | 0,928 |
| 12 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | - | - | - | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 12,36 | 160,4 | 0,938 |
| 13 | 7 | 7 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | - | - | - | 4 | 4 | 4 | 6 | 5 | 5 | 5 | 20,42 | 124,2 | 0,938 |
| 14 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 1 | - | - | 4 | 6 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 28,78 | 145,4 | 0,944 |
| 15 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 6 | 1 | - | 7 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 16,23 | 177,2 | 0,945 |
| 16 | 4 | 7 | 7 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | - | - | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 16,42 | 146,0 | 0,956 |
| 17 | 4 | 7 | 7 | 4 | 7 | 7 | 7 | 7 | 1 | 7 | 7 | 6 | 4 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 32,52 | 188,0 | 0,956 |
| 18 | 4 | 4 | 4 | 4 | 7 | 7 | 7 | 7 | 1 | 5 | 7 | 4 | 4 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 28,74 | 206,0 | 0,958 |
| 19 | 4 | 4 | 4 | 4 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 6 | 6 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 32,60 | 209,0 | 0,960 |
| 20 | 4 | 4 | 4 | 4 | 7 | 7 | 7 | 7 | 1 | 5 | 5 | 3 | 5 | 7 | 4 | 5 | 5 | 5 | 28,74 | 216,5 | 0,960 |
| 21 | 4 | 4 | 4 | 4 | 7 | 7 | 7 | 7 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 32,78 | 223,0 | 0,961 |

Таблица 2. Исходные данные ВБР ФЭ 15, 16 вариантов

| Вариант | ОИУС 1 | ОИУС 2 | ОИУС 3 | ОИУС 4 | УДМ1 | УДМ 2 | УДМ 3 | УДМ 4 | ССН | ОЗД 1 | ОЗД 2 | ПОЗ 1 | ПОЗ 2 | МА 1 | МА 2 | ЭМ 1 | ЭМ 2 | ЭМ 3 |
|---------|--------|--------|--------|--------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| 15 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,74 | - | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 0,94 | 0,94 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| 16 | 0,96 | 0,95 | 0,95 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,74 | - | - | 0,9 | 0,91 | 0,94 | 0,94 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |

Таблица 3. Значения показателя структурно-функциональной живучести предложенных вариантов

| Номер варианта | Режим «Точной ориентации» | Режим «Грубой ориентации» | Режим «Ориентации на Солнце» |
|----------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 15 | 0,955 | 0,956 | 0,959 |
| 16 | 0,948 | 0,93 | 0,948 |

Заметно, что структурно-функциональная живучесть варианта № 15 лучше. Следовательно, для синтеза СУД БС МКА целесообразно выбрать данный вариант реализации.

Заключение

Используя комплексный (аналитико-имитационный) подход к моделированию многокритериального синтеза облика БС МКА, ЛПР существенно сможет снизить количество ошибок при проектировании и тем самым обоснованно выбирать вариант реализации облика сложного объекта еще на этапе его создания.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№№19-08-00989, 20-08-01046), в рамках бюджетной темы №№0073-2019-0004.

Литература

1. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. // М. Федеральное космическое агентство, 2006. – 72 с.
2. История развития систем управления, радиотехнических систем и наземного автоматизированного комплекса управления отечественной ракетно-космической техники, Т.6, М.: ООО «Издательский дом «Столичная энциклопедия»», 2019. – 600 с.
3. **Павлов А.Н., Воротягин В.Н., Павлов Д.А., Кулаков А.Ю.** Алгоритм проектирования надежности системы управления движением малого космического аппарата // Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах: международная конференция МАБР-2020 (Санкт-Петербург, 23-25.06.2020 г.): сб. статей / под ред. Е. Д. Соложенцева, В. В. Карасева. СПб.: ГУАП, 2020. С. 115-121.
4. **Pavlov A.N., Vorotyagin V.N., Pavlov D.A., Zakharov V.V.** Methodology Of Structural-Functional Synthesis Of The Small Spacecraft Onboard System Appearance // Stability and Control Processes – Proceedings of the 4th International Conference

- Dedicated to the Memory of Professor Vladimir Zubov. Lecture Notes in Control and Information Sciences – Proceedings. 2020. С. 153-161.
5. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
 6. **Ушаков И.А.** Курс Теории надежности систем // учеб. Пособие для вузов. – М.: Дрофа, 2008. – 239 с.
 7. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: монография / В.И. Поленин, И.А. Рябинин, С.К. Свиринов, И.А. Гладкова, под ред. А. С. Можаяева. – СПб. НИКА, 2011. – 416 с.
 8. **Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Шахматов Е.В., Ткаченко С.И., Бакланов А.И., Салмин В.В., Семкин Н.Д., Ткаченко И.С., Горячкин О.В.** Опытнотехнологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» // – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.
 9. Военная системотехника и системный анализ. Модели и методы принятия решений в сложных организационно-технических комплексах в условиях неопределённости и многокритериальности: учебник / Б.В. Соколов, Б.В. Москвин, А.Н. Павлов и др.; под общей ред. Б. В. Соколова. – СПб.: ВИККУ имени А. Ф. Можайского, 1999. – 496 с.
 10. Космическое пространство и его влияние на элементы конструкций космических аппаратов: электрон. метод. пособие к практ. работам / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост.: Н.Д. Семкин, А.М. Телегин, М.П. Калаев. – Самара, 2013. – 46 с.