

И.В. Захаров, В.Г. Терехов, А.Н. Соколовский, С.С. Зыкова

РЕКОНФИГУРАЦИЯ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВАРИАНТОВ ЕГО СТРУКТУРНОЙ ДЕГРАДАЦИИ

Аннотация. Решение задач применения бортовых вычислительных комплексов подвижных объектов в условиях влияния неблагоприятных факторов различного происхождения требует гибкого управления режимами работы. Предлагаемый способ функционально-параметрического конфигурирования бортовых вычислительных комплексов подвижных объектов основан на оперативном управлении составом выполняемых задач и параметрами функционирования элементов бортовых вычислительных комплексов на основе анализа ресурса системы, условий функционирования и прогнозирования ее состояния.

Ключевые слова: бортовой вычислительный комплекс, подвижный объект, реконфигурация, деградация, прогнозирование.

I.V. Zakharov, V.G. Terekhov, A.N. Sokolovsky, S.S. Zyкова

RECONFIGURATION OF THE ON-BOARD COMPLEX OF A MOBILE OBJECT BASED ON MODELING OF VARIANTS OF ITS STRUCTURAL DEGRADATION

Abstract. Solving the problems of using on-board computing systems of mobile objects under the influence of adverse factors of various origins requires flexible control of operating modes. The proposed method of functional parametric configuration of on-board computing complexes of mobile objects is based on operational management of the composition of tasks performed and the parameters of the functioning of the elements of on-board computing complexes based on the analysis of the system resource, operating conditions and forecasting of its condition.

Keywords: onboard computing complex, mobile object, reconfiguration, degradation, forecasting.

Введение

В современном мире развитие компьютерных технологий и средств вычислительной техники происходит настолько быстрыми темпами, что уже практически не осталось подвижных объектов, не оснащенных системами автоматического управления. Эти системы в составе бортовых комплексов (далее – БК) дают большой ряд преимуществ: скорость обработки данных, полнота учитываемых факторов, точность обработки заданной траектории, выбор оптимальных параметров настройки и др. Как правило, бортовые комплексы функционируют в различных режимах, динамически определяемых командными сигналами и внешними возмущающими воздействиями на подвижный объект (далее – ПО). Решение целевых задач подвижных объектов в условиях возмущающих факторов тесно связано с устойчивостью функционирования бортовых комплексов. Важным аспектом реализации данного направления является обеспечение возможности оперативного авто-

Захаров Иван Вячеславович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационно-вычислительных систем и сетей. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: информационно-вычислительные системы и технологии; надежность; живучесть. Автор более 90 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: vka_24kaf@mil.ru

Терехов Владимир Геннадиевич

кандидат военных наук, доцент, старший преподаватель кафедры информационно-вычислительных систем и сетей. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: надежность программного обеспечения; защита информации в информационно-вычислительных сетях. Автор более 20 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: vter2@rambler.ru

Соколовский Алексей Николаевич

кандидат технических наук, преподаватель кафедры информационно-вычислительных систем и сетей. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: компьютерные технологии; защита информации в информационно-вычислительных сетях; надежность. Автор более 20 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: sokolovskij@rambler.ru

Зыкова Светлана Сергеевна

адъюнкт. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: информационно-вычислительные системы и технологии; надежность; живучесть. Автор 8 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: swetlanca.zykova@yandex.ru

номного реконфигурирования бортового комплекса посредством гибкой настройки режимов работы его компонентов и диспетчеризации вычислительного процесса на основе прогнозирования его состояния с учетом анализа ресурса и условий функционирования.

Суть процесса реконфигурирования

Процесс реконфигурирования, то есть выбора конфигураций БК [4; 5], состоит в следующем. Оперативная информация от датчиков внешних воздействий и диагностическая информация позволяют на основе заданного классифицирующего правила определить класс события (одиночный отказ, сбой, воздействие некоторого типа и др.). Априорно для каждой ситуации на основе заданных моделей физических процессов, производительности и целевого эффекта моделируется функционирование БК и осуществляется поиск его конфигурации, обеспечивающей предельно возможную результативность на интервале функционирования. В силу неопределенности внешних воздействий принимается сценарный подход, при котором рассматривается множество сформированных, например, экспертными методами, наборов параметров (сценариев) условий функционирования. Сценарии имеют определенный вес и охватывают спектр возможных ситуаций ПО. На основе сценариев строится прогнозирование траекторий деградации БК ПО с учетом динамики внешней среды и выработанного его элементами ресурса, формируются соответствующие оценки результативности функционирования для данного сценария, что позволяет оценить интегральный полезный эффект на интервале функционирования.

Реконфигурация бортового комплекса подвижного объекта на основе моделирования ...

Частная задача выбора конфигураций

Постановка частной задачи выбора конфигураций БК ПО в условиях возмущающих факторов (далее – ВФ) на основе прогнозирования его деградации формулируется следующим образом.

Дано:

1. Вектор $\vec{\vartheta} = \langle \vartheta_s(t_0) \mid s=1, \dots, \text{card} \vec{\vartheta} \rangle$ параметров состояния ПО, включающий показания датчиков внешних воздействий, результаты диагностики БК в текущий момент времени t_0 :

состояние БК $I(t_0) = \langle u_i \mid i=1, \dots, N \rangle$, $\theta_i = \begin{cases} 0, \text{элемент БК } \zeta_i \text{ неработоспособен,} \\ 1, \text{элемент БК } \zeta_i \text{ исправен.} \end{cases}$

2. Множество \mathbb{H} сценариев H возмущающих воздействий.

3. Классифицирующее правило $\mathcal{F}: \vec{\vartheta} \rightarrow H$.

4. Модель $J(t_1; t_2 \mid G, o, H)$ оценки результативности функционирования БК ПО в условиях детерминированных и случайных внутренних и внешних факторов H , где G – параметры функционирования элементов структуры (аппаратная конфигурация); o – решаемый комплекс вычислительных задач (функциональный режим).

Найти функционально-параметрическую конфигурацию (G^*, o^*) , обеспечивающую максимальное значение показателя $J(G_i, o_j \mid \vec{\vartheta})$ результативности функционирования бортового комплекса на заданном интервале времени $(t_0; t_s)$:

$$(G^*, \hat{o}^*) = \arg \max_{G_i \in \mathbb{G}_i, \hat{o}_j \in \hat{\mathbb{O}}_j} J(G_i, \hat{o}_j \mid \vec{\vartheta}), \quad (1)$$

где \mathbb{G} – множество возможных аппаратных конфигураций; $\hat{\mathbb{O}}$ – множество функциональных режимов.

Поставленную задачу, исходя из идеи превентивного конфигурирования БК ПО [1; 4], следует декомпозировать на задачу построения оптимальной конфигурации БК для некоторого фиксированного сценария и задачу реконфигурирования БК на множествах сценариев воздействия возмущающих факторов и его состояний.

В результате анализа указанных критериев оценки и выбора конфигураций БК для построения разрабатываемого метода как наиболее предпочтительный использован следующий способ. Пусть известна заранее определенная конфигурация \vec{G} для состояния $\Theta_x = \Theta(t_x)$, в которое попадает БК ПО в момент t_x (см. Рисунок 1):

$$J^{**}(G_k) = \Delta J(t_0; t_x \mid G_k) + \Delta J(t_x; t_s \mid \vec{G}). \quad (2)$$

Поскольку оценка $J^{**}(G_k)$ формируется статистически посредством моделирования функционирования БК ПО в условиях его структурно-параметрической деградации на основе модели [3], реализации случайных величин $\Theta(t_x)$ и t_x определяются при получении значений $\Delta J(t_0; t_x \mid G_k)$.

Формирование конфигураций бортового комплекса подвижного объекта на основе сценарного подхода

Множество сценариев воздействий порождает множество признаков возмущающих факторов и множество состояний БК, которые дискретизируются и объединяются в ко-

нечное счетное множество классов событий. Необходимо произвести поиск конфигурации БК ПО, обеспечивающей предельно возможную результативность на интервале функционирования для каждой ситуации. В связи с этим построение метода выбора конфигураций БК в условиях возмущающих воздействий на основе прогнозирования его деградации представляет собой структурно вложенное варьирование состояний БК, определяемое работоспособностью его компонентов, и варьирование вариантов реализации сценариев воздействия, носящие итерационный характер.

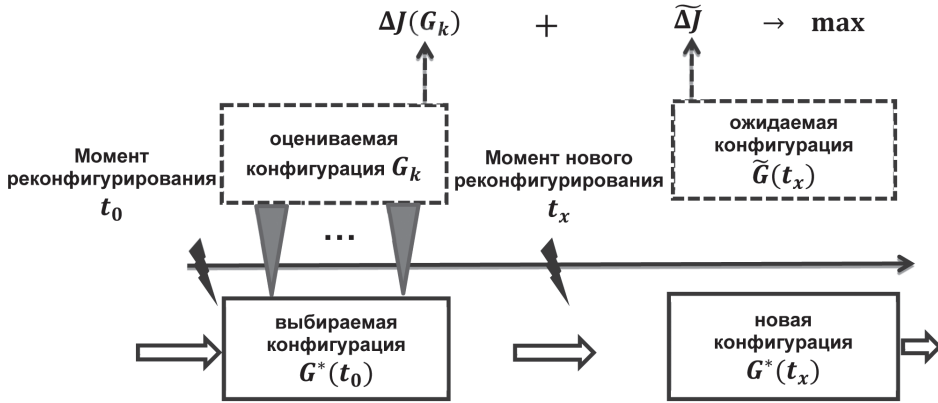


Рисунок 1. Схема оценки и выбора конфигураций БК

Поскольку требуется выбор конфигураций применительно к множеству состояний БК, формируются подмножества $\Theta^{(k)}$ состояний $\Theta_i \in \Theta^{(k)} : \sum_i \theta_i = k$, где k – число отказавших элементов (уровень его структурной деградации). При этом осуществляется фильтрация неработоспособных состояний, соответствующих критическому уровню деградации:

$$\exists G \in \mathbb{G}, \xi \in \Xi : J(G, \xi | \Theta_i) > 0, \Theta_i = \langle \theta_1, \dots, \theta_N \rangle. \quad (3)$$

Это позволяет осуществить варьирование состояний $\Theta_i \in \Theta^{(k)}, \{\Theta_i\} = \mathbb{Y}^\Theta$ БК ПО по уровням его структурной деградации $k = N - 1, \dots, 0$. При этом состояние Θ_i выбирается таким, что для него возможны переходы системы лишь в те состояния, для которых оптимальная конфигурация в данных условиях функционирования уже выбрана, следовательно, получена оценка результативности функционирования БК. С одной стороны, это дает возможность избежать неприемлемой вычислительной трудоемкости, свойственной парадигме динамического программирования в рамках настоящей задачи при реализации терминального принципа максимизации полезного эффекта; с другой – формируемые оценки учитывают рациональный выбор конфигураций при прогнозировании дальнейшей деградации БК ПО.

На множестве $\{\vec{Y}_j^H\} = \mathbb{Y}^H$ признаков возмущающих факторов для фиксированного состояния Θ_i БК варьируется набор параметров \vec{Y}_j^H , соответствующий согласно правилу $\mathcal{F} : \vec{Y}_j^H \rightarrow H_j$ сценарию воздействия возмущающих факторов.

Реконфигурация бортового комплекса подвижного объекта на основе моделирования ...

С учетом сложности гетерогенной иерархической структуры БК и разнообразия режимов работы его элементов мощность множества формально синтаксически возможных конфигураций $card\mathbb{G}$ достаточно велика. Поэтому задача выбора и построения конфигураций БК ПО может быть решена методом обоснования структуры и параметров отказоустойчивых конфигураций вычислительных систем на основе аппарата генетических алгоритмов [1; 2] с использованием в качестве варьируемого параметра элемента ζ_j режима его работы g_j , а в качестве целевой функции – оценку коэффициента результативности функционирования БК, формируемую на основе заданной модели $J = J(t_1; t_2 | G, \xi, H)$ как

$$J^{**}(G_k) = \Delta J(t_0; t_x | G_k, \hat{H}) + \Delta J(t_x; t_s | \tilde{G}, \hat{H}), \quad \tilde{G} = CF_{ij}, \quad l: \Theta(t_x) = \Theta_l \quad (4)$$

и включающую разыгрывание реализаций \hat{H} сценария H_j ВФ: $H_j \rightarrow \hat{H} = X(H_j, \hat{\rho})$.

Таким образом, для Θ_i, H_j определяется оптимальная аппаратная конфигурация $G^* = \arg \max_{G_k \in \mathbb{G}} J^{**}(G_k | \Theta_i, H_j)$.

Далее осуществляется выбор функционального режима БК ПО:

$$\xi^* = \arg \max_{\xi \in \bar{I}(t_0)} \Delta J(\xi, G^*). \quad (5)$$

Формируемые в результате параметры G^* функционирования элементов и функциональный режим ξ^* БК ПО, соответствующие максимальному целевому эффекту его применения при условиях Θ_i и H_j , определяют значение элемента $CF_{ij} = (G^*, \xi^*)$ конфигурационной таблицы $\|CF_{ij}\|$, заполняемой итерационным путем.

В ходе функционирования ПО информация от датчиков внешних воздействий, результаты контроля и диагностики состояния элементов БК определяют вектор $\bar{\mathcal{G}}$ параметров состояния. Процедура дискретизации регистрируемых на ПО физических параметров ВФ $\bar{\mathcal{G}} \rightarrow \bar{Y}^H$ формирует слово \bar{Y}^H признаков уровней ВФ, а результаты диагностирования компонентов ПО – слово \bar{Y}^H состояния БК.

Таким образом, признаки уровней ВФ \bar{Y}^H и текущего состояния БК \bar{Y}^Θ определяют выбор элемента конфигурационной таблицы $\|CF_{ij}\|$, задающего конфигурацию $CF^* = (G^*, \xi^*)$, который, в свою очередь, формирует управляющие воздействия на аппаратные компоненты, соответствующие конфигурации G^* , и осуществляет диспетчеризацию вычислительного процесса, соответствующую функциональному режиму ξ^* . Далее в результате проведенного реконфигурирования БК осуществляется решение вычислительных задач в сформированной функционально-параметрической конфигурации (G^*, ξ^*) .

Схема построения данного подхода представлена на Рисунке 2.

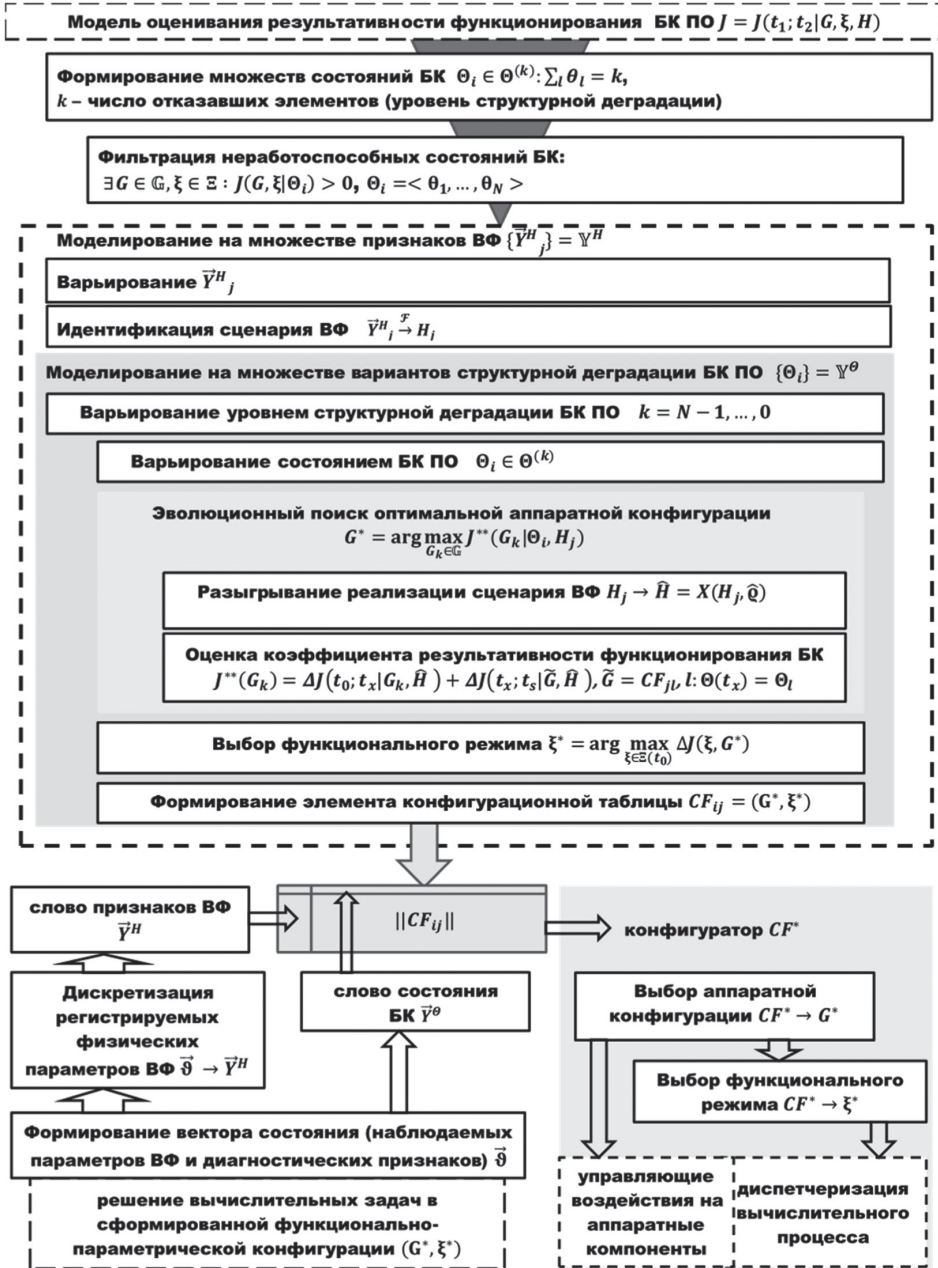


Рисунок 2. Схема реконfigurирования БК ПО

Выводы

Анализ эффективности способов реконfigurирования БК ПО при различных параметрах его возможных функциональных режимов подтвердил, что расширение возможностей функционального реконfigurирования (разнообразие функциональных режимов

в смысле ценности и ресурсоемкости вычислительных задач) существенно повышает эффект от аппаратного (параметрического) реконфигурирования (выбора режимов элементов). Относительный выигрыш незначителен при экстремальных вычислительных нагрузках, а также малоресурсоемких задачах. Наиболее выгодна – область средних вычислительных нагрузок (системы, не обладающие многократным избытком быстродействия и энергоресурса, что характерно для БК в силу жестких массогабаритных и энергетических требований к ним). Относительный выигрыш возрастает с ростом числа элементов БК.

Заключение

В целом анализ применения представленного метода показал целесообразность его использования при разработке алгоритмов оперативной автономной реконфигурации БК ПО, функционирующих в условиях неблагоприятных факторов различного происхождения. Результаты моделирования показали, что применение разработанного метода превентивного конфигурирования, обеспечивающего предельно возможную результативность его функционирования, позволит:

- снизить потери задач при отказах в БК приблизительно в 2 раза относительно схем с ненагруженным резервом и в 2...3 раза относительно максимальных (полных) конфигураций;
- повысить среднюю производительность БК на 10...20 %.

Литература

1. Басыров А.Г., Забузов В.С., Захаров И.В. Метод превентивного функционально-параметрического конфигурирования бортовой вычислительной системы космического аппарата на основе прогнозирования ее деградации // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2018. № 665. С 183–193.
2. Басыров А.Г., Захаров И.В., Шушаков А.О. Метод выбора структуры неоднородной иерархической информационно-вычислительной системы на основе генетического алгоритма // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2018. № 665. С. 14–24.
3. Захаров И.В. Модель перестраиваемой бортовой вычислительной системы в условиях возможной деградации // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2017. № 658. С. 144–152.
4. Захаров И.В., Терехов В.Г., Соколовский А.Н. Превентивное конфигурирование бортовых вычислительных систем на основе прогнозирования их деградации // Естественные и технические науки. 2018. № 9. С. 137–139.
5. Моделирование функционирования живучих бортовых вычислительных систем с учетом их структурно-параметрической деградации / И.В. Захаров, В.С. Забузов, А.Н. Соколовский, К.А. Эсаулов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8, № S1. С. 60–66.

References

1. Basy'rov A.G., Zabuzov V.S., Zaxarov I.V. (2018) *Metod preventivnogo funktsional'no-parametricheskogo konfigurirovaniya bortovoi vychislitel'noi sistemy kosmicheskogo apparata na osnove prognozirovaniya ee degradatsii* [The method of preventive functional-parametric configuration of the onboard computing system of the spacecraft based on the prediction of its degradation]. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskogo*, No. 665, pp. 183–193 (in Russian).
2. Basy'rov A.G., Zaxarov I.V., Shushakov A.O. (2018) *Metod vybora struktury neodnorodnoi ierarkhicheskoi informatsionno-vychislitel'noi sistemy na osnove geneticheskogo algoritma* [A method for selecting the struc-

ture of a heterogeneous hierarchical information and computing system based on a genetic algorithm]. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskego*, No. 665, pp. 14–24 (in Russian).

3. Zaxarov I.V. (2017) *Model' perestraivaemoj bortovoj vychislitel'noj sistemy v uslovijah vozmozhnoj degradacii* [A model of a tunable onboard computer system in conditions of possible degradation]. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskego*, No. 658, pp. 144–152 (in Russian).

4. Zaxarov I.V., Terexov V.G., Sokolovskij A.N. (2018) *Preventivnoe konfigurirovanie bortovykh vychislitel'nykh sistem na osnove prognozirovaniya ikh degradatsii* [Preventive configuration of on-board computing systems based on the prediction of their degradation]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, No. 9, pp. 137–139 (in Russian).

5. Zaxarov I.V., Zabuzov V.S., Sokolovsky A.N., Esaulov K.A. (2016) *Modelirovanie funkcionirovaniya zhivuchikh bortovykh vychislitel'nykh sistem s uchetom ikh strukturno-parametricheskoi degradatsii* [Simulation of the functioning of tenacious on-board computing systems, taking into account their structural and parametric degradation]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskix issledovaniyax Zemli*, vol. 8, No. 1, pp. 60–66 (in Russian).