

И.В. Захаров

РАЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫБОР СТРУКТУР И КОНФИГУРАЦИЙ НЕОДНОРОДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ ПОМОЩИ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПОИСКА

Отмечены преимущества эволюционного поиска как метода оптимизации применительно к выбору сложной иерархической гетерогенной структуры системы. Предлагаемый метод кодирования неоднородной структуры вычислительной системы позволяет построить генетические алгоритмы, обладающие высокой скоростью сходимости. Предложенный подход к автономному управлению функционированием системы учитывает случайный ресурс ее элементов, выработка которого зависит от режима функционирования и воздействующих факторов.

Ключевые слова: неоднородная система, эволюционный поиск, генетический алгоритм.

I.V. Zakharov

THE RATIONAL CHOICE OF STRUCTURES AND CONFIGURATIONS OF THE HETEROGENEOUS COMPUTER SYSTEMS THROUGH THE EVOLUTIONARY SEARCH

The advantages of evolutionary search as an optimization technique in relation to the task are noted. The proposed method to choose a hierarchical heterogeneous structure of a computer system using a genetic algorithm allow to build algorithms with high convergence rate. The proposed approach to the autonomous management of system takes into account the stochastic resource of system elements, the development of which depends on the functioning mode and external influencing factors.

Keywords: heterogeneous system, genetic algorithm, evolutionary search.

Введение

С каждым годом усиливается роль информационно-вычислительных систем в укреплении обороноспособности страны, в решении хозяйственных и научных задач. При этом особое звучание приобретают вопросы совершенствования средств вычислительной техники, автономно решающих задачи в режиме реального времени в сложных условиях функционирования, которые характеризуются как воздействием множества внешних факторов, так и спектром различных режимов функционирования. Таким образом, вычислительные системы (ВС) рассматриваемого класса вынужденно функционируют в меняющихся условиях внешней среды и управляющих воздействий [1].

Современные технологии, связанные с развитием электронной компонентной базы и коммуникационных стандартов, создают предпосылки к совершенствованию архитектуры ВС, а современная элементная база сегодня позволяет осуществлять гибкое управление режимами работы с учетом производительности, энергоемкости, температурного режима и других условий. Поэтому совершенствование ВС связано с конвергенцией их информационно-вычислительных ресурсов в единую много-

функциональную вычислительную систему с единым программным управлением и гибким выбором режимов работы компонентов, обладающую сложной неоднородной иерархической структурой.

Однако традиционные методы анализа и синтеза ВС не позволяют в полной мере реализовывать указанные преимущества. Принципиальные особенности ВС указанного класса требуют учета разнообразия элементов, многообразия их возможных состояний, а также неоднородности связей в системе как на одном, так и на разных уровнях иерархии. Кроме того, классические вероятностные подходы теории надежности и живучести имеют такие недостатки, как сложность учета взаимовлияния воздействующих факторов (ВФ); зависимость оценок от параметров всех ВФ, которые нужно знать априори; характер получаемых оценок, как правило, недостаточно адекватно отражает динамику функционирования системы в конкретных условиях [2].

Подход к моделированию функционирования ВС

Суть ресурсного подхода к построению модели ВС в условиях структурно-параметрической деградации [3], расширяющего понятие ресурса применительно к различным физическим процессам, состоит в следующем. Пусть элемент системы имеет некоторые ресурсы (случайные, детерминированные), позволяющие выдерживать определенные виды воздействий и реализовать свое качество. При функционировании ресурсы расходуются, и по израсходованию одного из них наступает отказ. Это время зависит от динамики характеристик ВФ и режимов работы, и от случайной, в общем случае, величины запаса ресурса элемента.

Пусть в момент времени t некоторый элемент системы ζ_i характеризуется вектором выработанного ресурса $\bar{r}_i(t) = \langle r_i^{(1)}(t), \dots, r_i^{(L)}(t) \rangle$ и запасом ресурса $\bar{u}_i = \langle u_i^{(1)}, \dots, u_i^{(L)} \rangle$, любые компоненты которого могут быть стохастическими либо детерминированными. В общем случае запас ресурса может изменяться в процессе функционирования системы. Расход ресурса элемента $\frac{dr_i(t)}{dt}$ в данный момент времени зависит от его выработанного ресурса $\bar{r}_i(t)$, его режима работы c_i и воздействия на него среды (вектора параметров ВФ \bar{h}_i , который задается законами распределения либо является детерминированной величиной): $\frac{dr_i^{(j)}(t)}{dt} = \delta_i^{(j)}(r_i^{(j)}, \bar{c}_i, \bar{h}_i)$. Соответственно, выработанный элементом ζ_i ресурс к моменту $t + \Delta t$ составит

$$r_i^{(j)}(t + \Delta t) = r_i^{(j)}(t) + \int_t^{t+\Delta t} \delta_i^{(j)}(r_i^{(j)}(\tau), c_i(\tau), w_i(\tau)) d\tau,$$

а работоспособность элемента можно выразить при помощи функции Хевисайда от остаточного ресурса: $s_i(t) = \prod_{j=1}^L \theta(u_i^{(j)} - r_i^{(j)}(t))$.

Будем считать [3], что элементами структуры ВС являются процессоры, запоминающие устройства и каналы обмена, а связи заданы в виде матрицы смежности. Состояния элементов описываются вектором текущих значений параметров: быстродействия, доступного объема памяти, пропускной способности, потребляемой электрической мощности, интенсивности перемежающихся отказов. Уровни иерархического объединения компонентов описываются в виде множеств и матриц смежности компонентов соответствующего уровня иерархии. Конфигурация ВС определяет множество схем резервирования, режимы работы элементов и матрицу распределения задач. Задано множество задач, решаемых ВС, каждая из которых характеризуется директивным сроком выполнения, множеством необходимых для ее решения элементов структуры и следующими параметрами: объемом вычислений, требуемым объе-

мом памяти, объемом данных для обмена с памятью, объемом данных для передачи внешним абонентам. Определены правила формирования схемы решения и оценки качества решения задач, параметры которых определяют ограничения по суммарному быстродействию, пропускной способности и объему памяти элементов.

Необходимо указать, что сложность учета внешних воздействий в различных режимах функционирования элементов системы, а также частных показателей целевого эффекта ведут к существенному усложнению целевой функции, вычисление которой сводится, по сути, к процессу имитационно-аналитического моделирования.

Поиск рациональной структуры ВС

Классический подход при решении задач синтеза ВС состоит в последовательном выборе архитектуры системы на основе качественного анализа существующих вариантов, формализации выбранного типа структуры и параметрического синтеза ее компонентов [4] при помощи известных методов оптимизации. Однако возникающая задача комбинаторной оптимизации имеет ряд сложностей, прежде всего – необходимость поиска глобального экстремума стохастической целевой функции, что ведет к серьезным затруднениям в использовании широко известных математических методов и требует специальных подходов, среди которых выделяются методы эволюционного поиска [5].

Эволюционное моделирование выступает мощным инструментом приближенного решения сложных комбинаторных задач оптимизации. Преимущества методов оптимизации на его основе в сравнении с классическими состоят, прежде всего, в возможности различных способов задания целевой функции и типов переменных оптимизации; одновременном анализе множества вариантов системы из различных областей пространства решений; вероятностных, а не детерминированных, правил поиска и генерации решений. Генетическими алгоритмами [6] называют способы решения задач оптимизации на базе эволюционного моделирования, основанные на использовании аналогий с природными процессами естественного отбора. Они достаточно глубоко развиты, но, тем не менее, значимыми нетривиальными вопросами реализации в конкретных случаях являются построение целевой функции и формализация переменных оптимизации в пространстве возможных решений, что в рассматриваемом случае требует учета особенностей кодирования сложной гетерогенной структуры.

Суть метода обоснования выбора структуры ВС на основе генетического алгоритма состоит в следующем. Задается целевая функция как скалярный показатель качества ВС. Целесообразна фильтрация возможных типов элементов в подмножество с наилучшими значениями их частных показателей качества. Далее проводится формализация структуры ВС и ее кодирование в виде «хромосомы» (пример схематично представлен на рис. 1).

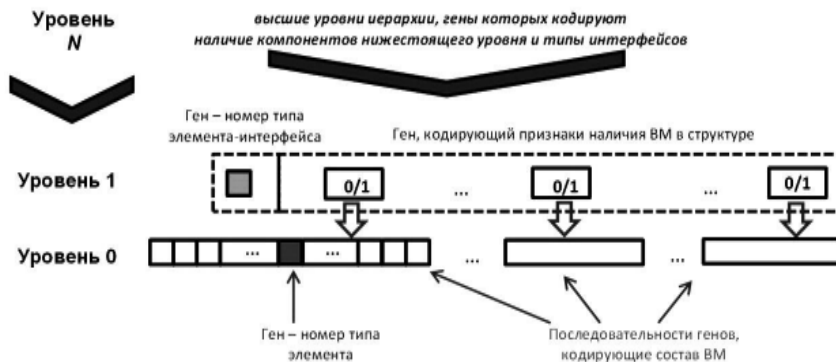


Рис. 1. Схема кодирования вариантов структуры ВС

Затем формируется исходная популяция, содержащая P случайно сгенерированных хромосом и хромосом, соответствующих специфическим точкам пространства решений. Осуществляется настройка параметров поиска: размера популяции P , влияющего на трудоемкость поиска; параметра кроссинговера R , определяющего степень детализации поиска в локальных областях пространства решений; параметра мутации M , определяющего степень исследования в новых областях пространства решений; критерия селекции G , определяющего характер отбора лучших хромосом для формирования нового «поколения». В основе метода лежит итерационная реализация эволюционного поиска, включающего последовательное применение оператора кроссинговера, оператора мутации, нормализацию формального описания генотипа, вычисление fitness-функций Ψ и применение оператора селекции в каждой итерации, соответствующей поколению. Поиск завершается при достижении заданного числа поколений или снижения скорости сходимости алгоритма, а в качестве результата принимается хромосома S из последнего поколения, имеющая максимальное значение fitness-функции $\Psi(S)$.

Приведем достаточно простой пример исследования работы алгоритма. Пусть ВС с архитектурой общей шины может включать до n вычислительных модулей (ВМ) четырех типов с быстродействием $v_i \in \langle 25; 12; 15; 20 \rangle$, энергопотреблением $\varepsilon_i \in \langle 2; 1; 3; 6 \rangle$, массогабаритным показателем $\gamma_i \in \langle 10; 2; 3; 5 \rangle$ и интенсивностью отказов $\lambda_i \in \langle 0,2; 1,0; 0,5; 0,1 \rangle$ в условных единицах (i – номер типа ВМ). Целевую

функцию определим как $\Psi = \int_0^T \sum_{i=1}^n v_i (1 - e^{-\lambda_i t}) dt$, $T = \frac{E}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}$, $\sum_{i=1}^n \gamma_i \leq g$, что соответству-

ет математическому ожиданию объема вычислений, суммарно произведенного ВМ за время исчерпания энергоресурса E при ограничении суммы массогабаритных показателей ВМ из состава ВС величиной g . Процесс работы генетического алгоритма поиска оптимального состава ВС усреднялся по 1000 запускам. Настройка параметров генетического алгоритма $R = 0,05$; $M = 0,5$; $G = 50\%$ соответствовала «случайно-направленному» поиску, настройка $R = 0,4$; $M = 0,05$; $G = 25\%$ – «направленно-случайному», при этом $P = 8$. Так, пример для $n = 20$; $g = 100$; $E = 200$ показал достижение максимума в десятки раз быстрее полного перебора по количеству вычислений целевой функции. Пример для $n = 9$; $g = 50$; $E = 120$ продемонстрировал, что варьирование параметров настройки алгоритма может служить для поиска локальных экстремумов и принятия оптимально-компромиссного решения. В целом статистическое исследование [7] работы алгоритма на относительно простых примерах показало следующее. Целесообразность применения предложенного подхода резко возрастает с ростом размерности задачи: количество вычислений целевой функции для достижения оптимума снижалось в 3-4 раза при $n = 10$ и в десятки раз при $n = 20$ по сравнению с полным перебором. Количество вычислений целевой функции, потребовавшееся для достижения ее 85–90% приращения относительно случайного решения и максимума, оказалось ниже еще в 2-3 раза. Настройка параметров генетического алгоритма показала, что их варьирование может служить основой для поиска локальных экстремумов: «направленно-случайные» варианты настройки с высокой вероятностью оператора кроссинговера и низкой вероятностью оператора мутации показали гораздо большую скорость сходимости, однако для ряда наборов исходных данных «случайно-направленные» варианты привели к решениям, более близким к оптимальному по значению целевой функции.

Выбор конфигураций ВС при автономном управлении ее функционированием

Суть функционирования ВС можно представить как расходование ею своих ресурсов в обмен на выполняемую вычислительную работу (целевой эффект) и в резуль-

тате внешних воздействий. Таким образом, задача автономного управления сводится к отысканию оптимального в смысле некоторого критерия управления при условии, что известны законы распределения случайного запаса ресурса элементов системы и параметров ВФ [8]. Ключевую роль в декомпозиции и решении данной задачи играет то, что отказы элементов, т.е. скачкообразные изменения характеристик системы, во-первых, происходят в случайные моменты времени, а во-вторых, требуют коррекции управления. Таким образом, задача рационального выбора режима функционирования ВС на некотором интервале заключается в поиске решения с учетом того, что качество функционирования системы на последующих интервалах времени зависит от того, как изменилось состояние системы и какой ресурс выработан на данном интервале.

Под функционально-параметрическим конфигурированием ВС будем понимать определение состава работающих ВМ и комплекса выполняемых задач на основе прогнозирования состояния ее аппаратуры для максимизации целевого эффекта за срок активного существования. Точное решение данной задачи путем динамического программирования может оказаться неприемлемо трудоемким. Поэтому предложим идею решения этой задачи посредством генетического алгоритма. Определяющее достоинство предложенного подхода для построения алгоритмов автономного управления ВС заключается в том, что в условиях высоких требований к оперативности решения задачи управления высокой вычислительной сложности и ограниченных возможностях бортовых вычислительных средств, с учетом необязательности точности и гарантированности достижения экстремума целевой функции он обладает высокой скоростью сходимости алгоритма.

При решении данной задачи в качестве значений «генов» будут выступать переменные, соответствующие режимам функционирования элементов ВС. При этом сложность задачи целесообразно упростить за счет построения детерминированных зависимостей режимов работы элементов вышестоящих уровней от состояний и режимов агрегируемых элементов. Кроме того, задача существенно упрощается в случае бинарного характера работы (например, включен или выключен, активный или пассивный режим и т.п.) элементов ВС.

Заключение

Достоинства предложенного подхода к приближенному решению сложной комбинаторной оптимизационной задачи большой размерности за счет применения аппарата эволюционного моделирования позволяет обосновать рациональный выбор сложных неоднородных структур вычислительных систем и их конфигураций с учетом максимизации целевого эффекта за срок существования. Предложенный способ решения задачи структурно-параметрической оптимизации представляется целесообразным при обосновании технического облика ВС и построения алгоритмов автономного управления их функционированием.

Литература

1. *Захаров И.В.* Живучесть информационно-вычислительных систем группировок космических аппаратов в условиях дестабилизирующих факторов и деструктивных воздействий // *Военная мысль*. – 2017. – № 6. – С. 61–69.
2. *Басыров А.Г., Захаров И.В.* Оценивание живучести бортовых вычислительных систем космических аппаратов // *Труды ВКА им. А.Ф. Можайского*. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Вып. 651. – С. 139–148.
3. *Захаров И.В., Забузов В.С., Соколовский А.Н., Эсаулов К.А.* Моделирование функционирования живучих бортовых вычислительных систем с учетом их структурно-параметрической деградации // *Наукоемкие технологии в космических исследова-*

дованиях Земли. – М. : ООО «Издательский дом Медиа пабlisher», 2016. – Т. 8. – № S1. – С. 60–66.

4. *Захаров И.В., Крeмез Г.В.* Построение бортовых вычислительных систем с учетом результатов испытаний элементной базы в условиях космического пространства // Научное обозрение. – Саратов : ООО «Буква», 2014. – Вып. 2. – С. 176–179.

5. *Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И.* Теория эволюционных вычислений. – М. : Физматлит, 2012. – 260 с.

6. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы. – М. : Физматлит, 2006. – 320 с.

7. *Захаров И.В., Терехов В.Г.* Применение генетических алгоритмов к задачам построения бортовых вычислительных систем и управления их функционированием // Естественные и технические науки. – 2017. – № 8 (110). – С. 92–95.

8. *Захаров И.В., Терехов В.Г.* Автономное управление функционированием бортовых вычислительных систем на основе ресурсного подхода // Естественные и технические науки. – 2017. – № 1 (103). – С. 113–115.

9. *Широбоков В.В., Нечай А.А.* Алгоритм планирования энергосберегающей параллельной обработки информации с учетом информационной важности и времени поступления задач // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». – 2017. – № 1. – С. 88–93.

References

1. *Zakharov, I.V.* Zhivuchest' informatsionno-vychislitel'nykh sistem gruppировок kosmicheskikh apparatov v usloviyakh destabiliziruyushchikh faktorov i destruktivnykh vozdeystviy // Voennaya mysl'. – 2017. – № 6. – С. 61–69.

2. *Basyrov, A.G., Zakharov, I.V.* Otsnivanie zhivuchesti bortovykh vychislitel'nykh sistem kosmicheskikh apparatov // Trudy VKA im. A.F. Mozhayskogo. – SPb. : VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2016. – Vyp. 651. – С. 139–148.

3. *Zakharov, I.V., Zabuzov, V.S., Sokolovskiy, A.N., Esaulov, K.A.* Modelirovanie funktsionirovaniya zhivuchikh bortovykh vychislitel'nykh sistem s uchedom ikh strukturno-parametricheskoy degradatsii // Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli. – М. : ООО «Izdatel'skiy dom Media pablisher», 2016. – Т. 8. – № S1. – С. 60–66.

4. *Zakharov, I.V., Kremez, G.V.* Postroenie bortovykh vychislitel'nykh sistem s uchedom rezul'tatov ispytaniy elementnoy bazy v usloviyakh kosmicheskogo prostranstva // Nauchnoe obozrenie. – Saratov : ООО «Буква», 2014. – Вып. 2. – С. 176–179.

5. *Kureychik, V.V., Kureychik, V.M., Rodzin, S.I.* Teoriya evolyutsionnykh vychisleniy. – М. : Физматлит, 2012. – 260 с.

6. *Gladkov, L.A., Kureychik, V.V., Kureychik, V.M.* Geneticheskie algoritmy. – М. : Физматлит, 2006. – 320 с.

7. *Zakharov, I.V., Terekhov, V.G.* Primenenie geneticheskikh algoritmov k zadacham postroeniya bortovykh vychislitel'nykh sistem i upravleniya ikh funktsionirovaniem // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. – 2017. – № 8 (110). – С. 92–95.

8. *Zakharov, I.V., Terekhov, V.G.* Avtonomnoe upravlenie funktsionirovaniem bortovykh vychislitel'nykh sistem na osnove resursnogo podkhoda // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. – 2017. – № 1 (103). – С. 113–115.

9. *Shirobokov V.V., Nechay A.A.* Algoritm planirovaniya energosberegayushchey parallel'noy obrabotki informatsii s uchedom informatsionnoy vazhnosti i vremeni postupleniya zadach // Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya «Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie». – 2017. – № 1. – С. 88–93.