

А. Г. БАСЫРОВ, В. А. ГОНЧАРЕНКО, В. С. ЗАБУЗОВ, Г. В. КРЕМЕЗ, К. А. ЭСАУЛОВ

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследованы результаты натурных экспериментов, проведенных на космических аппаратах „Можаец-3“ и „Можаец-4“. Обосновывается целесообразность многомодульного подхода к построению бортовых вычислительных систем с адаптивной организацией обслуживания. Рассматриваются возможности обеспечения заданной производительности в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

Ключевые слова: бортовые вычислительные системы, многомодульность, адаптивность, производительность, натурные эксперименты, алгоритм планирования.

Введение. Одной из проблем организации управления малыми космическими аппаратами (МКА) является обеспечение устойчивого функционирования бортовых вычислительных систем (БВС) МКА в течение длительного времени (7—10 лет). Существующие подходы к решению данной проблемы основаны на выборе элементной базы с высокими показателями надежности и стойкости к воздействию внешних факторов, а также на применении архитектурных решений, связанных с различными видами резервирования (структурного, временного, информационного и т.д.). При этом важнейшим этапом в разработке, реализации и оценивании эффективности использования технических решений являются моделирование и натурные эксперименты.

Проводимые на близких к круговым орбитах высотой около 700 км эксперименты на борту МКА серии „Можаец“ по исследованию работоспособности электронных компонентов в условиях воздействия неблагоприятных факторов космического пространства (в том числе космической радиации) направлены на разработку предложений по увеличению технического ресурса бортовых систем космических аппаратов. Испытываются интегральные микросхемы генераторов тактовых импульсов и статического оперативного запоминающего устройства 537РУ16 [1, 2]. Тестирование микросхем проводится на основе сравнения с эталонными значениями амплитуды сигнала с выходов генераторов тактовых импульсов и считанных кодов из ячеек модулей памяти. Определение фактов отказов и их статистическая обработка для КА „Можаец-3“ проводились по результатам телеметрии наземными средствами, для „Можаец-4“ — бортовым микропроцессором. Элементы установлены в негерметичных алюминиевых корпусах различной толщины на поверхности МКА. Полученные экспериментальные данные показали, что БВС МКА должна быть защищена алюминиевым корпусом толщиной не менее 1 мм. Парирование отказов модулей оперативной памяти должно обеспечиваться путем различных видов резервирования, причем избыточность должна составлять не менее 60 % аппаратных и/или временных затрат на реализацию нерезервированного варианта.

Применение архитектурных подходов способствует повышению устойчивости функционирования БВС. Хотя избыточность оборудования при реализации данных подходов затрудняет удовлетворение массогабаритным требованиям к МКА, тем не менее существует перспектива миниатюризации бортовой цифровой техники. В результате можно получить более гибкие решения, позволяющие существенно повысить производительность, надежность, живучесть, и как следствие — эффективность функционирования МКА в целом.

Методика многомодульного построения БВС. Одним из архитектурных подходов является многомодульное построение БВС с адаптивной организацией обслуживания вычислительной нагрузки в соответствии со складывающейся ситуацией. В результате использования адаптивных многомодульных БВС

- повышается отказоустойчивость за счет дублирования вычислений;
- обеспечивается перераспределение нагрузки;
- обеспечиваются высокопроизводительные параллельные вычисления.

Характеристики адаптивной БВС (в частности, кратность резервирования) выбираются исходя из описанных выше результатов космических экспериментов.

Рассмотрим модель многомодульной БВС, в которой распределение задач между вычислительными модулями (ВМ) осуществляется аппаратным или программным диспетчером (коммутационным процессором). Каждый модуль имеет необходимые средства для организации очереди заданий.

Адаптивные алгоритмы диспетчеризации, в отличие от детерминированных и стохастических, обладают рядом преимуществ [3], но требуют дополнительной оперативной информации. Диспетчер распределяет очередное поступившее задание исходя из динамически изменяющейся информации, например, сведений о длине очередей к модулям, о соотношении производительности модулей и их исправности. В случае сбоя или отказа производительность модуля может считаться равной нулю.

Пусть модель массового обслуживания с диспетчеризацией состоит из n узлов обслуживания, диспетчера заданий и n входящих потоков к диспетчеру. Назовем данную модель системой с присоединением к кратчайшей очереди и переходами между очередями.

Диспетчер включает анализаторы очередей и коммутаторы. Информация о соотношении длины очередей ΔL используется для распределения очередного задания. Суммарный входной поток заданий с интенсивностью λ будет распределяться таким образом, чтобы наилучшим образом загрузить все модули, так как любое задание, поступившее в систему, будет присоединяться к наиболее короткой очереди. Если кратчайших очередей несколько, поступающее задание направляется в модуль с большей интенсивностью обслуживания μ , при равенстве или неизвестном соотношении значений интенсивности — в модуль с соответствующим номером. Для уменьшения разницы длины очередей, возникающей в процессе ожидания обслуживания из-за случайного характера процесса обслуживания, используется механизм перехода заданий между очередями. В этом случае последнее задание из наиболее длинной очереди переходит в кратчайшую очередь при разности очередей больше некоторого порога чувствительности. В простейшем случае переход осуществляется при $|\Delta L| > 1$.

Структурная схема, алгоритм функционирования и основные вероятностно-временные характеристики данной системы описаны в [4].

Для двухмодульной БВС вероятность незанятого состояния БВС составляет

$$P_0 = \left[1 + \frac{1 - \rho^{2K}}{1 - \rho} \frac{\rho(\rho + r + s - 2rs)}{(1 + 2\rho)(s - s^2)} \right]^{-1},$$

где K — емкость буферов очереди ВМ, $\rho = \lambda/\mu$ — коэффициент загрузки БВС, $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$, $\mu = \mu_1 + \mu_2$, $r = \lambda_1/\lambda$, $s = \mu_1/\mu$.

Среднее время решения задачи \bar{T} в рассматриваемой системе соответствует

$$\bar{T} = P_0 \frac{\rho + r - 2rs + s}{\mu(1 + 2\rho)(s + s^2)} \left[\frac{1 - \rho^{2K}}{(1 - \rho)^2} - \frac{2K\rho^{2K}}{1 - \rho} \right].$$

Методика выбора алгоритма планирования. Одним из перспективных путей достижения высокой производительности БВС является внедрение в процесс ее функционирования методов параллельной обработки информации. Одной из проблем, с которыми приходится

сталкиваться при организации параллельных вычислений, является сложность планирования параллельного функционирования модулей БВС. Решать эту проблему можно с помощью эвристических алгоритмов планирования, дающих близкий к оптимальному результат за приемлемое время. Выбрать требуемый алгоритм можно на основании результатов имитационного моделирования.

Вместе с тем в зависимости от ограничений на время планирования можно применить не один, а несколько эвристических алгоритмов и, реализовав каждый из них, выбрать наилучший план параллельных вычислений. Такой подход позволяет повысить вероятность достижения требуемой производительности в условиях ограничений на время планирования.

Для оперативного выбора требуемых алгоритмов необходима заранее рассчитанная функция $F(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, определяющая в зависимости от времени t , отведенного на получение плана, вектор (x_1, x_2, \dots, x_m) применяемых алгоритмов, где $x_i = 1$, если алгоритм i используется в комбинации алгоритмов, и $x_i = 0$ — в противном случае, m — общее число рассматриваемых алгоритмов.

Основой для расчета данной функции являются, во-первых, результаты статистических испытаний моделей применяемых алгоритмов в виде зависимости $G(y_1, y_2, \dots, y_m)$, определяющей частоту выборки лучшего результата комбинацией алгоритмов (y_1, y_2, \dots, y_m) , где $y_i = 1$, если результат применения алгоритма i совпал с наилучшим, и $y_i = 0$ — в противном случае, и, во-вторых, время t_i , затрачиваемое на реализацию i -го алгоритма.

Так как вероятность того, что хотя бы один из алгоритмов комбинации (x_1, x_2, \dots, x_m) обеспечит наибольшую производительность, составляет

$$P(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{j=1}^k \left(G(y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{mj}) \bigcup_{i=1}^m y_{ij} x_i \right), \quad (1)$$

где k — размер области значений функции $G(y_1, y_2, \dots, y_m)$, а временные затраты на синтез расписания составляют

$$T(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{i=1}^m x_i t_i, \quad (2)$$

то искомая функция $F(t)$ может быть записана в виде

$$F(t) = \begin{cases} \arg \max \left\{ \sum_{j=1}^k \left(G(y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{mj}) \bigcup_{i=1}^m y_{ij} x_i \right) \right\}; \\ \sum_{i=1}^m x_i t_i \leq t. \end{cases} \quad (3)$$

Данная функция рассчитывается до начала оперативного планирования параллельных вычислений. В режиме реального времени на ее вход поступает значение временного интервала T_3 , в течение которого необходимо получить результат, на выходе получается значение вектора $F(T_3) = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, определяющего комбинацию алгоритмов, которые следует использовать для получения плана, с наибольшей вероятностью являющегося наилучшим из результатов планирования всеми рассматриваемыми алгоритмами. При этом суммарное время реализации найденной комбинации алгоритмов не будет превышать требуемого.

Рассмотрим работу данной методики на примере.

Пример. Известны четыре эвристических алгоритма планирования параллельных вычислений, условно называемые A , B , C и D . Известно также множество временных затрат

(в секундах), каждого алгоритма на синтез расписания параллельных вычислений: $\{10, 8, 5, 2\}$. Требуется синтезировать расписание параллельных вычислений за время $T_3 \leq 15$ с. Пусть в результате статистических испытаний получена представленная в табл. 1 функция $G(y_1, y_2, \dots, y_m)$, определяющая ненулевые значения частоты выборки различных комбинаций алгоритмов.

Таблица 1

Значения $G(y_1, y_2, \dots, y_m)$

№ комбинации	Алгоритм				Частота выборки
	A	B	C	D	
1	1	1	0	0	0,15
2	1	0	1	0	0,15
3	1	0	0	0	0,13
4	0	0	0	1	0,04
5	1	1	0	1	0,08
6	0	0	1	0	0,05
7	0	0	1	1	0,05
8	1	1	1	0	0,12
9	0	1	1	0	0,18
10	0	1	1	1	0,05

Из соотношения (1) определим статистическую вероятность P получения наилучшего расписания с использованием каждой комбинации алгоритмов, а из соотношения (2) — суммарные временные затраты T на планирование. Эти значения представлены в табл. 2.

Из приведенных данных видно, что наибольшая вероятность (0,96) синтеза наилучшего расписания за время (15 с), не превосходящее T_3 , достигается комбинацией алгоритмов A и C.

Таблица 2

Значения $P(x_1, x_2, \dots, x_m)$ и T

Комбинация (x_1, x_2, \dots, x_m)	$P(x_1, x_2, \dots, x_m)$	T, c
A	0,63	10
B	0,58	8
C	0,6	5
D	0,22	2
A, B	0,86	18
A, C	0,96	15
A, D	0,77	12
B, C	0,83	13
B, D	0,67	10
C, D	0,72	7
A, B, C	0,96	23
A, B, D	0,95	20
A, C, D	1	17
B, C, D	0,87	15
A, B, C, D	1	25

Практика использования данной методики для решения задач планирования параллельных вычислений в режиме реального времени позволила повысить вероятность синтеза оптимальных расписаний параллельных вычислительных процессов на 25—30 %.

Заключение. Испытания элементной базы радиоэлектронной аппаратуры с использованием МКА „Можаяец-3“ и „Можаяец-4“ показали возможность длительной работы типовых электронных компонентов на борту МКА в негерметизированных приборных отсеках. Полученные экспериментальные оценки необходимой избыточности учитываются в предложен-

ных методиках диспетчеризации задач в адаптивных многомодульных вычислительных системах и методике параллельной обработки информации БВС. Данные методики позволяют, как следует из приведенных выше математических соотношений, повысить устойчивость функционирования бортовых вычислительных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фатеев В. Ф., Кремез Г. В., Фролков Е. В.* Исследование работоспособности электронных компонентов бортовой аппаратуры космических аппаратов посредством экспериментальных комплексов „Призма-1“ и „Призма-2“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 6. С. 78—81.
2. *Захаров И. В., Иваненко А. Ю., Кремез Г. В., Фролков Е. В., Шпак А. В.* Повышение функциональной устойчивости бортовых вычислительных систем малых космических // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 6. С. 65—67.
3. *Донианц В. Н., Удалова Т. В.* Перераспределение вычислительной нагрузки в локальных сетях ЭВМ // Управление процессами и ресурсами в распределенных системах. М.: Наука, 1989. С. 57—64.
4. *Гончаренко В. А.* Модели адаптивного перераспределения нагрузки в кластерных вычислительных системах // Изв. вузов. Приборостроение. 1993. Т. 41, № 7. С. 34—39.

Сведения об авторах

<i>Александр Геннадьевич Басыров</i>	—	канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра электронно-вычислительной техники, Санкт-Петербург; E-mail: alexanderbas@mail.ru
<i>Владимир Анатольевич Гончаренко</i>	—	канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра электронно-вычислительной техники, Санкт-Петербург; E-mail: vlango@mail.ru
<i>Вячеслав Сергеевич Забузов</i>	—	адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра электронно-вычислительной техники, Санкт-Петербург; E-mail: teskatlitpoka@yandex.ru
<i>Георгий Вальтерович Кремез</i>	—	канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра электронно-вычислительной техники, Санкт-Петербург; E-mail: gvkremez@mail.ru
<i>Константин Андреевич Эсаулов</i>	—	адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра электронно-вычислительной техники, Санкт-Петербург; E-mail: home5263@yandex.ru

Рекомендована Ученым советом
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию
20.10.08 г.