

УДК 004.031.43:004.272.43

И.Б. ТУРКИН, Т.С. НИКИТИНА

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ В СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ МНОГОЯДЕРНЫХ ПРОЦЕССОРОВ

Для исследования эффективности применения новых подходов к планированию вычислений в системах реального времени на основе многоядерных процессоров разработана имитационная модель, которая позволяет реализовать процесс планирования в системах с различными архитектурами многоядерных процессоров. Оценка эффективности статического и динамического методов планирования выполнена с учетом размерности практических задач, решаемых при автоматизации испытаний современных космических аппаратов. Результаты моделирования положены в основу ряда важных для практической реализации автоматизированных систем испытаний выводов.

Ключевые слова: система реального времени, алгоритм планирования, периодическая задачи, многоядерный процессор, кэш-память, производительность, кэш-промах.

Введение

Параллельные вычислительные системы – это компьютерные, а также программные системы, которые реализуют параллельную обработку данных на многих вычислительных узлах. Параллельные вычисления традиционно использовались в основном в высокопроизводительных вычислениях, но в последнее время к ним возрос интерес из-за появления многоядерных процессоров (МП), которые являются основным направлением развития вычислительных систем в настоящее время [1]. Объединенные в одном кристалле ядра (рис. 1) позволяют выполнять большее количество операций за единицу времени при меньшем тепловыделении.

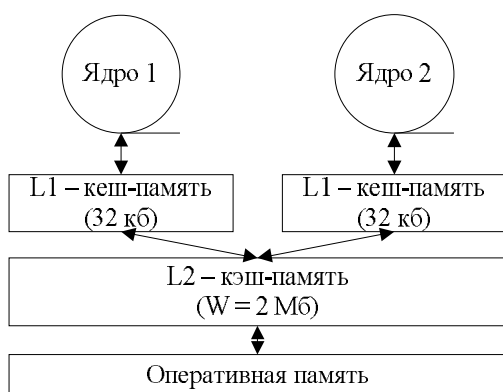


Рис. 1. Архитектура процессора Intel Core 2 Duo

Эффективность работы системы на основе МП во многом зависит от правильного распределения ресурсов системы: памяти, задач между вычислительными узлами.

1. Обзор и анализ литературы

Как показал анализ литературы [2, 3], переход на МП наблюдается в специализированных системах реального времени (РВ), где корректность функционирования зависит не только от результата вычислений, но и от времени за который этот результат формируется. Как пример применения систем РВ на основе МП можно привести систему управления космическим аппаратом (спутником), когда оперативная обработка периодической информации о состоянии различных узлов обрабатывается с учетом требований и ограничений РВ. В системах РВ конкуренция некоторых вычислительных задач к ядрам процессора в условиях выделения недостаточного объема общей кэш-памяти приводит к неравномерности загрузки процессорных элементов и существенной задержке выполнения отдельных конкурирующих задач [4]. Причина увеличения количества кэш-промахов и потери производительности при параллельном выполнении ресурсоемких вычислительных задач состоит в нерациональном использовании разделяемых ресурсов в виде общей кэш-памяти МП.

Данная проблема эффективно решается для класса систем общего назначения [4, 5] и получила развитие для класса систем РВ в работах [6 - 8], где учитывается ресурс в виде общей кэш-памяти и ограничения РВ. Однако для подтверждения эффективности применения новых подходов к планированию в составе современных операционных систем РВ требуется провести ряд моделирующих тестов для разных архитектур МП.

2. Исходные данные для моделирования

Целью работы является оценка эффективности применения статического и динамического методов [7, 8] в системах РВ на основе МП с использованием условий практических задач, решаемых при автоматизации испытаний космического аппарата Egyptsat-1.

Архитектура программного обеспечения (ПО) для автоматизации испытаний соответствуют модели вычислений, управляемых данными:

$$N = (Data, Task, F, H, Data_{sensor}), \quad (1)$$

где $Data$ – непустое конечное множество объектов-данных; $Task$ – непустое конечное множество элементарных задач-преобразователей; F и H – матрицы инцидентности, причем: $F: Data \times Task$ – отображение множества $Data$ на $Task$; $H: Data \times Task$ – отображение множества $Data$ на $Task$; $Data_{sensor}$ – вектор, который содержит сенсорные объекты-данные, получаемые от внешних устройств.

Достоинством модели является возможность распараллеливания вычислений, поскольку выполнение элементарных задач-преобразователей активируется изменением данных.

Для оценки размерности задачи используем модифицированную ярусно-параллельную форму (ЯПФ). В отличие от традиционной ЯПФ модель преобразования данных представим в виде ярусов, причем в нулевой ярус входят только сенсорные данные, порождаемые внешними измерительными преобразователями, а в каждый из ненулевых ярусов – задачи, зависящие от данных предыдущего яруса, и данные, порождаемые этими задачами.

Характеристиками модели преобразования информации в модифицированной ЯПФ являются:

L – длина графа, то есть количество ярусов;

$Data_i$ – множество данных, порождаемых на i -м ярусе, $\|Data_i\|$ – ширина i -го яруса по данным;

$Task_i$ – множество задач-преобразователей информации i -го яруса, $\|Task_i\|$ – ширина i -го яруса по задачам.

Анализ трудоемкости задач автоматизации испытаний космической техники показал, что необходимо планировать работу не менее сотни задач, имеющих ограничения РВ. Временные ограничения и требования к периодичности этих задач различны (рис. 2) и определяются их функциональностью: ввод и вывод информации, ее преобразование, формирование управляющих воздействий, сохранение информации, либо визуальное представление оператору процесса и результатов испытаний. Имитационная модель системы предназначена для оценки производительности системы РВ, функционирующей на основе МП. Исследование проведено с ис-

пользованием специализированного ПО SESC и разработанного ПО для моделирования системы РВ на основе МП. Применение эмулятора SESC для проведения подобного рода эксперимента встречается во многих современных исследовательских работах [9, 10]. ПО SESC позволяет эмулировать различную архитектуру МП и предоставляет статистические данные о производительности и количестве промахов для всех уровней кэш-памяти.

К факторам которые могут оказывать влияние на производительность системы можно отнести:

- количество ядер процессора (2...8);
- объем кэш-памяти L2, L3;
- количество задач в системе (2...100);
- процент ресурсоемких задач в системе;
- процент многопоточных задач.

Поскольку на современном этапе известны различные архитектуры МП, экспериментальное исследование проведено на основе известных аналогов. В ходе одного сеанса моделирования генерируется X случайных вариантов исходных данных, где $X \geq 200$. Каждый сеанс моделирования осуществляет формирование потока входных данных, и построение расписания. В итоге после X циклов можно оценить производительность системы РВ.

В ходе моделирования в начальный момент времени $t=0$ на обслуживание поступает фиксированный поток задач $\tau = \{\tau_i^*, 1 \leq i \leq N\}$ с заданными характеристиками, который подлежит выполнению. Поток задач исполняется на временном интервале $t = [0 \dots 100 \cdot T_{max}]$, где $T_{max} = \max_{1 < i < N} (T_i)$. В конце

одного сеанса моделирования выходные данные (измеряемые параметры) сохраняются для последующего анализа, а затем начинается новый сеанс моделирования до тех пор, пока счетчик цикла не достигает заданной величины. Рассмотрим базовую модель системы РВ и модель системы РВ на основе МП.

Базовая модель системы РВ. Предположим, что есть набор из N периодических вычислительных задач РВ $\tau = \{\tau_i^*, 1 \leq i \leq N\}$, подлежащих выполнению в системе РВ. Каждая τ_i^* вычислительная задача характеризуется набором параметров $\tau_i^* = \langle C_i, D_i, T_i \rangle$, где C_i – время выполнения; D_i – директивный срок окончания; T_i – период формирования запросов. Задача τ_i^* является периодической, и представляет собой вычисления, которые повторяются с определенной периодичностью T_i (рис. 3).

Модель системы РВ на основе МП. Пусть вычислительная система РВ $P = \{Core_m, m \in 1 \dots M\}$

состоит из $M \geq 2$ идентичных ядер процессора, которые используют общую кэш-память размером W . Пусть есть множество процессов РВ $Pr = \{Pr_k\}$, которые подлежат выполнению, где $k \in 1 \dots K$. Каждый процесс $Pr_k = \{\tau_{k_i}\}$ содержит $N_k \geq 1$ задач РВ (потоков) $\tau_{k_i} = \langle \tau_{k_i}^*, R_{k_i} \rangle$, где $i \in 1 \dots N_k$, R_{k_i} – необходимый объем кэш-памяти.

Пусть доля ресурсоемких задач в системе: $R_{LIMIT} = n'/K$, где n' – количество задач, для которых $R_{k_i} > C_{LIMIT}$, и $C_{LIMIT} = (W/M) \times Th$ (Th – эвристически определяемый порог).

Статический и динамический [7, 8] методы планирования используют данную уточненную модель, которая позволяет учитывать разделяемые ресурсы МП.

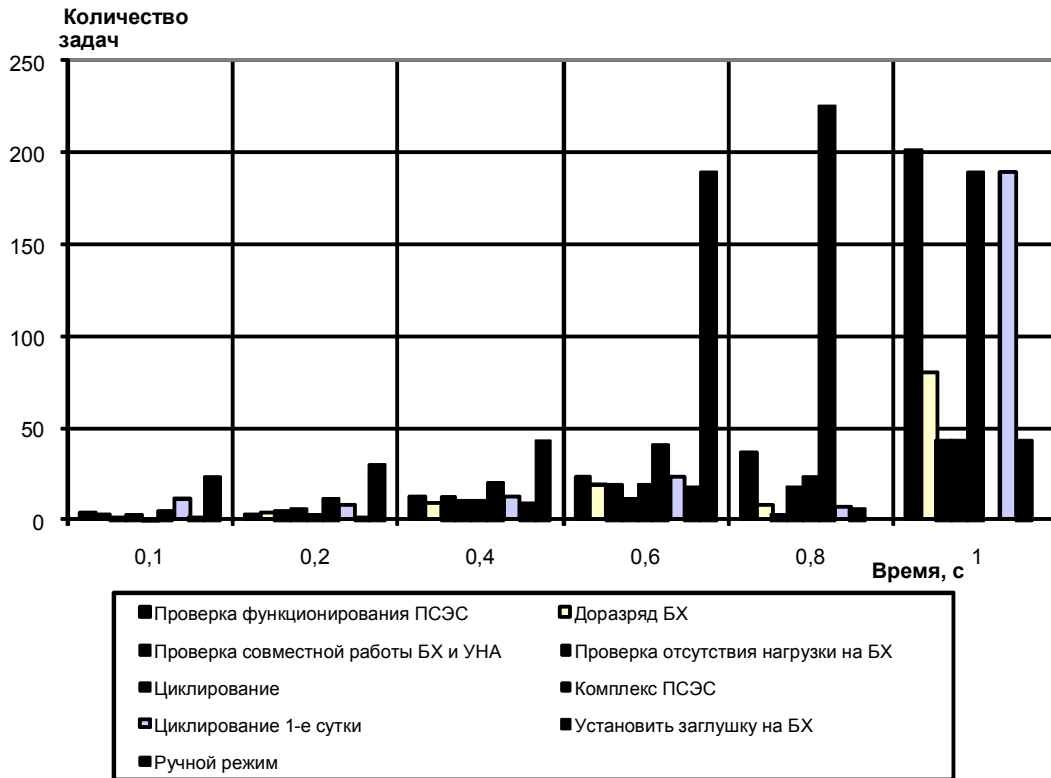


Рис. 2. Количество задач, имеющих заданные ограничения периодичность исполнения

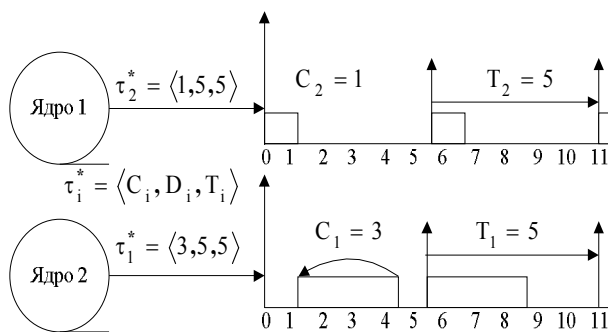


Рис. 3. Пример временной диаграммы исполнения двух задач РВ

Предлагаемая имитационная модель позволяет реализовать процесс планирования задач РВ в системе с различными архитектурами МП, и сравнить эффективность исследуемых методов планирования.

3. Анализ результатов моделирования

Анализ зависимости количества кэш-промахов от относительного количества ресурсоемких задач в системе на основе МП с объемом общей кэш-памяти ИМБ. Из результатов моделирования следует, что математическое ожидание (МО) для статического метода планирования (СМП) уменьшается с увеличением доли ресурсоемких задач по сравнению с FF-EDF (рис. 4). Для 0...10%, 90...100% ресурсоемких МО практически совпадает для двух методов, что говорит о том, что на данном диапазоне СМП не эффективен.

При диапазоне $R_{LIMIT} = [0, 2 \dots 0, 8]$ СМП дает наилучший результат и позволяет снизить количество кэш-промахов на 12...35%. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что наиболь-

шее повышение производительности наблюдается именно в данном диапазоне.

Динамический метод планирования (ДМП) позволил увеличить производительность системы на 25...29% относительно базовых алгоритмов плани-

рования при этом директивные сроки не были нарушены.

Методы планирования можно расположить в порядке возрастания эффективности следующим образом: ДМП, FF-EDF без прерываний.

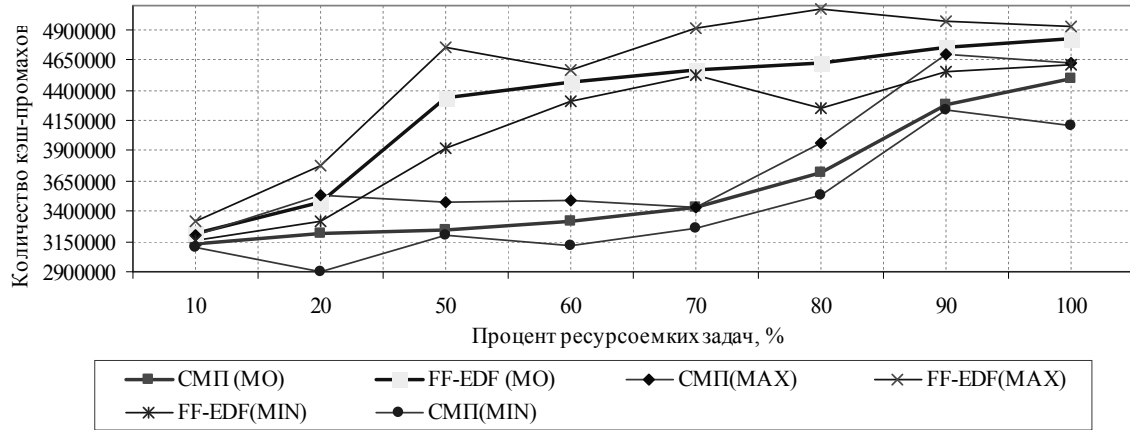


Рис. 4. Зависимость количества кэш-промахов от процента ресурсоемких задач в системе РВ

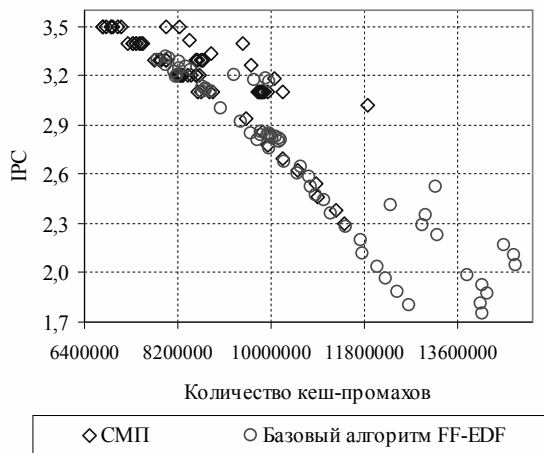


Рис. 5. Зависимость производительности системы (IPC) от количества кэш-промахов для двоядерного процессора при $R_{LIMIT} = [0.2...0.8]$ ресурсоемких задач РВ

Выводы

Анализ результатов моделирования показал:

СМП позволяет системе работать с более высокой производительностью и снижает количество кэш-промахов на 28...43,9%, при условии, что процент ресурсоемких задач в системе составляет $R_{LIMIT} = [0,2...0,8]$ и количество ядер 2, 4;

ДМП позволяет системе работать с более высокой производительностью и снижает при этом количество кэш-промахов на 32,3...41%. Применение ДМП целесообразно в системах РВ, где ПО имеет многопоточную структуру и количество ядер составляет 2, 4, 8.

Исследование эффективности применения новых методов планирования в системах РВ на основе БП показало, что производительность системы может быть увеличена за счет рационального использования разделяемых ресурсов МП. Появление новых архитектур МП требует соответствующей проверки эффективности существующих и перспективных методов планирования.

Литература

1. Levy, M. *Measuring Multicore Performance. Embedded computing [Text]* / M. Levy // *Computer*. – 2008. – № 41. – P. 99 – 102.
2. Carbone, J.A. *An RTOS for an SMP Multicore Processor [Электронный ресурс]* / J.A. Carbone. – Режим доступа: <http://www.rtc magazine.com/articles/view/100751>. – 2.03.2012 г.
3. Calandrino, J. *On the Design and Implementation of a Cache-Aware Multicore Real-Time Scheduler [Электронный ресурс]* / J. Calandrino, J. Anderson. – Режим доступа: <http://www.cs.unc.edu/~anderson/papers/ecrts09c.pdf>. – 2.03.2012 г.
4. Fedorova, A. *Operating System Scheduling for Chip Multithreaded Processors [Text]: thesis of doctor Doctor of Philosophy in the subject of Computer Science* / Alexandra Fedorova; Harvard University Cambridge. – Massachusetts, September, 2006. – 199 p.
5. Dhruba, C. *Predicting Inter-Thread Cache Contention on a Chip Multi-Processor Architecture [Электронный ресурс]* / C. Dhruba, G. Fei. – Режим доступа: <http://www.cs.sfu.ca/~fedorova/Teaching/CMPT886/Spring2007/papers/predicting-inter-thread-contention.pdf>. – 2.03.2012 г.
6. Anderson, J. *Parallel real-time task scheduling on multicore platforms [Text]* / J. Anderson, J. Calan-

drino / Proc. of the 27th IEEE Real-Time Systems Symp., IEEE, 2006. – P. 89 – 100.

7. Никитина, Т.С. Методы планирования мультимедийных задач в операционных системах реального времени для платформ на основе многоядерных процессоров [Текст] / Т.С. Никитина, И.Б. Туркин // Радиоэлектронные и компьютерные системы: научно-технический журнал. – 2009. – № 6 (33). – С. 47 – 52.

8. Никитина, Т.С. Процедура планирования задач реального времени в системах на базе много-

ядерных процессоров [Текст] / Т.С. Никитина // Системы управления, навигации та зв'язку. – 2010. – № 3 (15). – С. 232 - 235.

9. Ortego, P.M. SESC: SuperEScalar Simulator [Электронный ресурс] / P.M. Ortego, P. Sack. – Режим доступа: <http://iacoma.cs.uiuc.edu/~paulsack/sescdoc/sescdoc.pdf>. - 2.03.2012 г.

10. Renau, J. SESC: cycle accurate architectural simulator [Электронный ресурс] / J. Renau. – Режим доступа: <http://sesc.sourceforge.net>. - 2.03.2012 г.

Поступила в редакцию 2.03.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. информатики А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПЛАНУВАННЯ ОБЧИСЛЕНЬ В СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ НА ОСНОВІ БАГАТОЯДЕРНИХ ПРОЦЕСОРІВ

І.Б. Туркін, Т.С. Нікітіна

Для дослідження ефективності застосування нових підходів до планування обчислень в системах реального часу на основі багатоядерних процесорів розроблена імітаційна модель, яка дозволяє реалізувати процес планування в системах з різними архітектурами багатоядерних процесорів. Оцінка ефективності статичного і динамічного методів планування виконана з урахуванням розмірності практичних задач, що вирішуються при автоматизації випробувань сучасних космічних апаратів. Результати моделювання покладені в основу низки важливих для практичної реалізації автоматизованих систем випробувань висновків.

Ключові слова: система реального часу, алгоритм планування, періодична задача, багатоядерний процесор, кеш-пам'ять, продуктивність, кеш-промах.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF PLANNING COMPUTING IN THE REAL-TIME SYSTEMS BASED ON MULTI-CORE PROCESSORS

I.B. Turkin, T.S. Nikitina

To investigate the effectiveness of new approaches for planning computations in real-time systems based on multi-core processors designed a simulation model that allows to implement the planning process in systems with different architectures of multicore processors. Evaluating the effectiveness of static and dynamic methods of planning carried out taking into account the dimension the practical tasks solved with automated tests of modern spacecraft. The results of the simulation used as a basis for a number of important implementation automated tests the findings.

Key words: real-time system, scheduling algorithm, periodic task, multi-core processor, cache, performance, cache-miss.

Туркин Игорь Борисович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. инженерии программного обеспечения, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: energy@d4.khai.edu.

Никитина Татьяна Сергеевна – соискатель каф. инженерии программного обеспечения, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: tanya-nt@mail.ru.