

УДК 004.031.43–044.962

А. С. Кобайло

Белорусский государственный технологический университет

**ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНЫХ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

Рассмотрены примеры использования гибридных методов организации вычислительного процесса, основанных на сочетании классических подходов к построению высокопроизводительных систем – конвейеризации и параллелизма. Проведены исследования эффективности применения параллельно-конвейерных вычислителей для решения задач, сводящихся к векторным операциям, по различным показателям, в первую очередь таким, как производительность и технико-экономические характеристики. Предложен новый архитектурный подход к решению задачи обеспечения режима реального времени для высокопроизводительных вычислительных систем, также основанный на гибридном методе проектирования вычислительных систем, сочетающем конвейеризацию и параллелизм – организация вычислительного процесса с помощью так называемых конвейерно-параллельных вычислителей. Приводятся расчетные соотношения для определения эффективности вычислительных систем, организованных на основе предложенного метода.

Конвейерно-параллельные вычислители могут быть использованы при обработке массивов данных большой размерности по единому алгоритму, если параллельная вычислительная система не позволяет обеспечить реальный масштаб времени или требуемую скорость обработки данных.

Ключевые слова: производительность, вычислительная система, параллелизм, конвейеризация, реальное время, цикл конвейера, параллельно-конвейерный вычислитель, конвейерно-параллельный вычислитель.

A. S. Kobaylo

Belarusian State Technological University

**THE USE OF HYBRID DESIGN METHODS
OF COMPUTING REAL-TIME SYSTEMS**

The examples of application of hybrid methods of organization of computing process based on a combination of classical approaches to building high-performance systems – pipelining and concurrency are considered. Study of the effectiveness of the use of parallel-conveyor calculators for solving problems that can be reduced to vector operations, using various indicators, especially such as productivity and techno-economic characteristics is conducted. The proposed new architectural approach to solving the problem of providing real-time high-performance computing systems, also based on a hybrid method of designing computing systems that combines pipelining and parallelism – organization of the computing process with the aid of the so-called conveyor-parallel calculators. The calculated ratios to determine the effectiveness of computing systems, organized on the basis of the proposed method are given/presented.

The conveyor-parallel solvers can be used to process data sets of large dimension by a single algorithm, parallel computing if the system does not allow for real-time or the desired processing speed.

Key words: performance, computational system, parallelism, pipelining, real time, conveyor cycle, parallel-pipelined computer, a pipelined-parallel evaluator.

Введение. Построение систем реального времени, как правило, связано с решением задачи проектирования высокопроизводительных систем. В случаях когда не только совершенствование технологических основ элементной базы для высокопроизводительных вычислительных систем (ВС), но и применение классических архитектурных методов создания таких систем (параллелизм и конвейеризация), а также предложенная автором настоящей работы методика проектирования ВС на основе интегральных конвейерных вычислителей [1]) не позволяют достичь требуемого быстродействия

системы, в частности не обеспечивают реальный масштаб времени, целесообразно использовать гибридные методы проектирования ВС, основанные на сочетании двух указанных архитектурных подходов к повышению производительности вычислительных систем.

Основная часть. Одним из методов, основанных на совмещении конвейеризации [2] и параллелизма [3], является метод параллельно-конвейерных вычислений, реализуемый на так называемых параллельно-конвейерных вычислителях (ПКВ). Метод предполагает организацию вычислительного процесса по нескольким

параллельным каналам, причем начало выполнения очередной цепочки вычислений каждым из каналов задерживается относительно начала вычислений на постоянную величину, называемую циклом конвейера, в качестве которого может выступать такт вычислительной структуры, равный периоду следования тактовых импульсов системы [4]. Рассмотрим примеры использования ПКВ для решения некоторых типовых задач.

Одним из классов таких задач являются задачи, которые сводятся к векторным операциям, например, нахождение вектора Y_i как произведение матрицы A_{kj} на вектор \bar{X}_j :

$$y_i = \sum_{j=1}^J a_{ij} \cdot x_j.$$

УТВЕРЖДЕНИЕ 1. ПКВ для выполнения векторных операций позволяет повысить производительность по сравнению с конвейеризацией в $K_k = \tau(*) / [\tau(+) + \tau(Mx)]$ раз, где $\tau(*)$, $\tau(+)$ и $\tau(Mx)$ – время умножения, сложения и мультиплексирования соответственно, $\lceil \cdot \rceil$ – операция взятия целого числа, большего чем (\cdot) , при реализации ПКВ и КВ на одной и той же элементной базе при одновременном повышении параметра ξ в ρ раз, где ξ – технический параметр канала, реализующего операцию $Ax + B$.

Период получения выходных данных для ПКВ и КВ равняется длительности циклов этих вычислителей.

Для конвейера

$$\tau_{ц}^k = \max \{ \tau_{вв}, \tau(\times), \tau(+), \tau_{выв} \},$$

где $\tau_{вв}$, $\tau(\times)$, $\tau(+)$, $\tau_{выв}$ – длительность операций ввода, умножения, сложения и вывода данных соответственно. Для цикла ПКВ имеем

$$\tau_{ц}^{пкв} \leq \frac{1}{f} = \tau_{зр}(Mx)k,$$

где f – частота генератора тактовых импульсов системы, $\tau_{зр}(Mx)$ – время задержки распространения мультиплексора, $k = 2-4$.

С выхода ПКВ данные поступают на вход накапливающего сумматора с периодом, равным времени реализации операции сложения $\tau(+)$.

Тогда повышение производительности при использовании ПКВ по сравнению с КВ определяется следующим образом:

$$K'_k = \frac{\tau_{ц}^k}{\tau_{ц}^{пкв} + \tau(+)} = \left\lceil \frac{\tau(*)}{\tau_{зр}(Mx) + \tau(+)} \right\rceil,$$

$$\tau_{зр}(Mx)k = \tau(Mx).$$

Диаграмма загрузки ПКВ для рассмотренного случая представлена на рис. 1.

УТВЕРЖДЕНИЕ 2. Применение ПКВ для реализации векторных операций позволяет по сравнению с распараллеливанием получить экономический эффект благодаря снижению параметров ξ (стоимость, потребляемая мощность, масса, габариты и т. п.) в K_p раз:

$$K_p = \frac{n \cdot \xi_1 + (n-1) \cdot \xi_2 + 2n \cdot \xi_3}{n \cdot \xi_1 + \xi_2 + \xi_4},$$

где $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ – технический или экономический параметр из числа вышеперечисленных, по которому осуществляется оценка эффективности, для операций умножения, сложения, хранения данных и мультиплексирования соответственно, n – размерность вектора при повышении производительности в K' раз:

$$K' = \frac{\tau(*) + n \cdot (\tau(+) + \tau(Mx))}{\tau_{чт} + \tau(*) + \lceil \log_2 n \rceil \cdot \tau(+) + \tau_{зап}},$$

где $\tau_{чт}$ и $\tau_{зап}$ – цикл чтения и записи соответственно.

Параллельный вычислитель для реализации операции $\sum_{j=1}^J a_{ij} \cdot x_j$ содержит J умножителей, $J-1$ сумматор, по J входных и выходных регистров. ПКВ – J умножителей, один сумматор и один мультиплексор, из чего следует справедливость утверждения.

Выполнение операций по вычислению вектора, как следует из диаграммы на рис. 1, требует лимита времени

$$\tau(\times) + n \cdot \tau_{ц} = \tau(\times) + \tau(Mx).$$

При параллельном вычислении требуется один ярус, вершинам которого соответствует операция умножения, $\lceil \log_2 n \rceil$ ярусов, на которых выполняется суммирование, два яруса обращения к регистрам (чтение и запись), из чего следует справедливость утверждения.

Заметим, что по причине $\tau(\cdot) \gg \tau(+)$ до определенной степени J снижение производительности от использования ПКВ в рассмотренном случае является незначительным.

В приведенных рассуждениях считалось, что $\rho = J = N$, где N – количество каналов параллельного вычислителя.

Еще одним примером целесообразности использования ПКВ является случай, когда параметры ξ или один из параметров $\{\xi\}$ ФУ с разным быстродействием существенно отличаются.

Тогда последовательная цепь операций, реализованная быстродействующими ФУ, может быть отображена на ПКВ; эффективность замены можно оценить выражением

$$K_1 = \frac{\xi_S}{\rho \cdot \xi_{пкв} + \xi_{Mx}},$$

где ξ_s , $\xi_{ПКВ}$, ξ_{Mx} – контролируемый технический параметр цепи быстродействующих элементов, канала ПКВ и мультиплексора соответственно.

В том случае когда необходима обработка массива данных размерностью по единому алгоритму (например, вычисление вектора), и нет возможности создать или использовать параллельный n -канальный вычислитель, может быть использован *конвейерно-параллельный вычислитель* (КПВ) [5].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1. Конвейерно-параллельным вычислителем будем называть вычислитель, содержащий m идентичных каналов, вычислительный процесс каждого из которых реализован по конвейерному принципу параллельной ВС (ПВС).

УТВЕРЖДЕНИЕ 3. Замена параллельной вычислительной системы (ПВС) на КПВ с таким же числом каналов, каждый из которых состоит из ρ ступеней, позволяет увеличить скорость обработки данных в ρ раз.

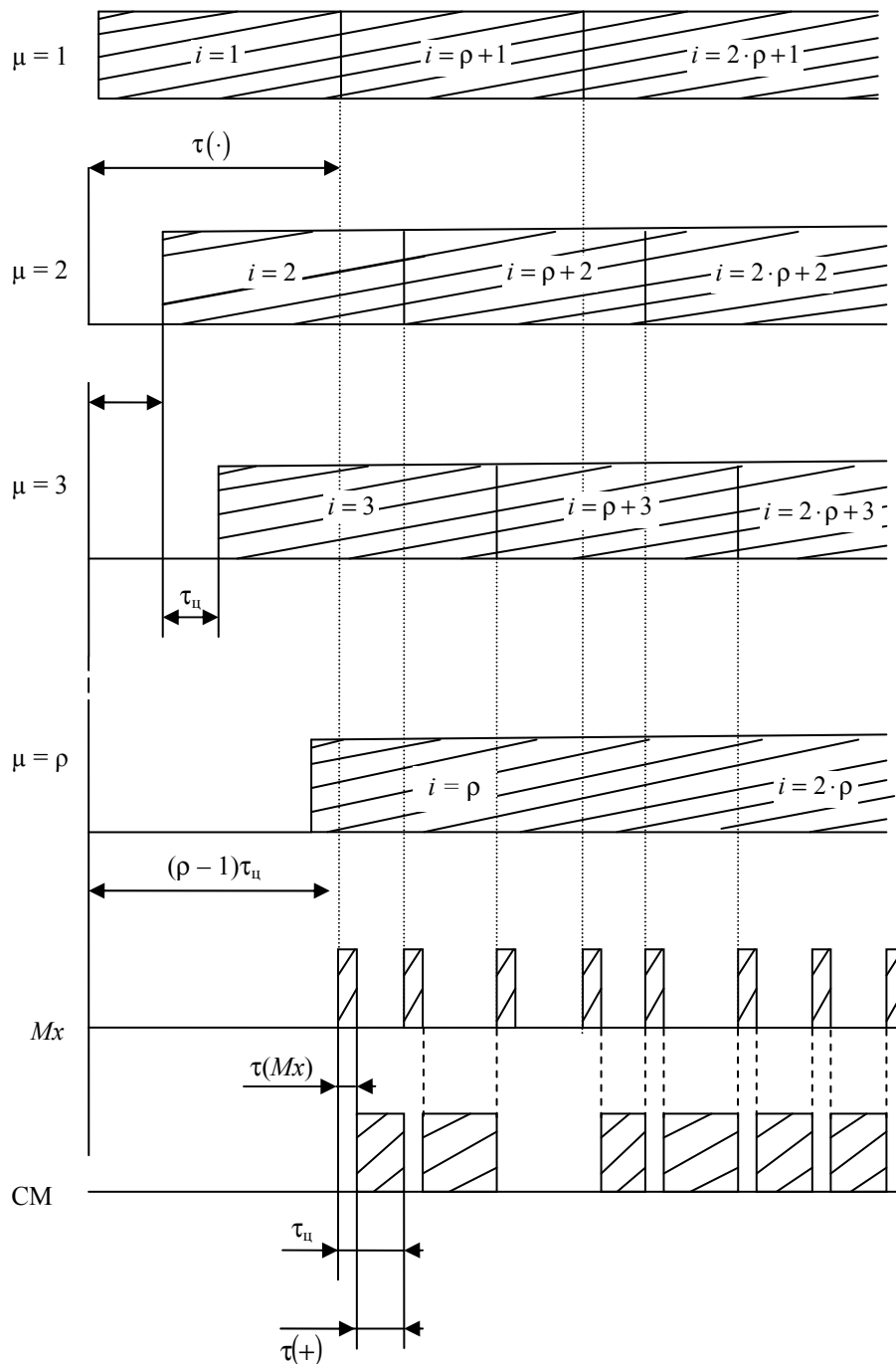


Рис. 1. Диаграмма загрузки функциональных устройств ПКВ при выполнении векторных операций:
 Mx – мультиплексор; Cm – сумматор

Действительно, пусть время выполнения одним каналом ПВС работы по требуемой обработке данных равна τ . Тогда время реализации алгоритма обработки массива размерностью n m -канальной ПВС

$$T_p = \left\lceil \frac{n}{m} \right\rceil \cdot \tau.$$

Реализация вычислительного процесса таким же каналом, но по конвейерному принципу, при ρ ступенях предполагает наличие цикла длительностью τ / ρ , тогда тот же алгоритм реализуется за время

$$T_{\text{кпв}} = \tau + \left\lceil \frac{n}{m} \right\rceil \cdot \frac{\tau}{\rho} \approx \left\lceil \frac{n}{m} \right\rceil \cdot \frac{\tau}{\rho},$$

($\tau \ll T_{\text{кпв}}$), откуда коэффициент ускорения

$$T_{\text{пкв}} = \frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{кпв}}}.$$

УТВЕРЖДЕНИЕ 4. Организация циклично-го вычислительного процесса на базе КПВ с m каналами и циклом $\tau_{\text{ц}}$ позволяет ускорить реализацию алгоритма по сравнению с КВ с таким же циклом в m раз.

Реализация алгоритма по обработке массива размерностью m конвейерным вычислителем с циклом $\tau_{\text{ц}}$ осуществится за время:

$$K' = \frac{\tau(*) + n(\tau(+) + \tau(Mx))}{\tau_{\text{цт}} + \tau(*) + \lceil \log_2 n \rceil \cdot \tau(+) + \tau_{\text{зап}}},$$

$$T_{\text{к}} = \tau_{\text{к}} \cdot (n - 1) + \tau_{\text{п}},$$

где $\tau_{\text{п}}$ – длительность одного цикла обработки данных последовательной цепью КВ.

Тот же алгоритм выполняется КПВ с m каналами и таким же циклом и количеством ступеней канала за время:

$$T_{\text{кпв}} = \left(\frac{n}{m} - 1 \right) \cdot \tau_{\text{ц}} + \tau_{\text{п}}.$$

Тогда ускорение будет иметь вид

$$K_{\text{кпв}} = \frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{кпв}}} \approx m$$

вследствие того, что $\tau_{\text{п}} \ll T_{\text{к}}$ и $\tau \ll T_{\text{кпв}}$.

В качестве еще одного гибридного метода проектирования высокопроизводительных систем может быть использован метод, основанный на сочетании двух уровней конвейеризации – конвейеризации с использованием конвейерных функциональных устройств (конвейеризация первого уровня) в составе конвейерных вычислителей (КВ), обеспечивающих конвейеризацию второго уровня.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1. Конвейерно-конвейерным вычислителем (ККВ) называется КВ, использующий в своем составе конвейерные функциональные устройства.

Оценим эффективность такого подхода на примере операции умножения матрицы на вектор.

При конвейерной реализации данной операции цикл конвейера будет равняться длительности самой длинной операции умножения:

$$\tau_{\text{ц}}^{(\text{кв})} = \tau(\times) = m(\tau(+) + \tau(\leftarrow)),$$

где $\tau(\times)$, $\tau(+)$, $\tau(\leftarrow)$ – длительности операций умножения, сложения и сдвига соответственно, m – разрядность операндов.

Конвейерный умножитель формирует очередной результат за время, равное времени сложения независимо от разрядности [2]: $\tau_{\text{ц}}^{(\text{кфу})} = \tau(+).$ Здесь $\tau_{\text{ц}}^{(\text{кфу})}$ – цикл конвейерного ФУ. Таким образом, ускорение ККВ по отношению к КВ будет определяться как $\tau_{\text{ц}}^{(\text{кв})} / \tau_{\text{ц}}^{(\text{кфу})} = 2m.$

Заключение. Использование параллельно-конвейерных вычислителей предоставляет возможность при выполнении векторных операций получить выигрыш по совокупности технических параметров по сравнению с параллелизмом практически при том же быстродействии.

Предложенный принцип организации вычислительных архитектур на базе конвейерно-параллельных вычислителей (см. определение 1) дает возможность увеличить быстродействие по сравнению с параллельными вычислителями в ρ раз при тех же аппаратных затратах (утверждение 3), по сравнению с конвейером – в m раз (утверждение 4), где ρ – количество ступеней конвейерной цепи КПВ, m – количество каналов КПВ.

Литература

1. Кобайло А. С. Особенности архитектурной организации вычислительных систем реального времени. Интегрированные конвейерные вычислители // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. 2017. № 2. С. 129–132.
2. Коуги П. Архитектура конвейерных ЭВМ. М.: Радио и связь, 1985. 567 с.
3. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. СПб.: Издательство БХВ-Петербург, 2002. 609 с.

4. Кобайло А. С. Особенности архитектурной организации вычислительных систем реального времени. Параллельно-конвейерные вычислители // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. 2018. № 1. С. 120–124.

References

1. Kobaylo A. S. The peculiarities of architectural organization of computer systems of real time. Integrated conveyor calculators. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 3, Physics and mathematics. Informatics, 2017, no. 2, pp. 129–132 (In Russian).

2. Kougi P. *Arkhitektura konveyernykh EVM* [The architecture of conveyor computers]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 567 p.

3. Voevodin V. V., Voevodin V. V. *Parallel'nyye vychisleniya* [Parallel computing]. St. Petersburg, Izdatel'stvo BKhV-Peterburg Publ., 2002. 609 p.

4. Kobaylo A. S. The peculiarities of architectural organization of computer systems of real time. Integrated conveyor calculators. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 3, Physics and mathematics. Informatics, 2018, no. 1, pp. 120–124 (In Russian).

Информация об авторе

Кобайло Александр Серафимович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kas151153@gmail.com

Information about the author

Kobaylo Alexandr Serafimovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Associate Professor, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kas151153@gmail.com

Поступила 28.11.2017