

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СЛУЧАЙНОГО ПЕРЕБОРА ПРИ ПОСТРОЕНИИ РАЗБИЕНИЙ ГРАФ-СХЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗМЕРНОСТИ ЗАДАЧИ И СИЛЫ ОГРАНИЧЕНИЙ

(Юго-Западный государственный университет)

При проектировании цифровых устройств их структура традиционно делится на две части: операционную и управляющую. Операционная часть, как правило, включает в своем составе схемы, обеспечивающие обработку информации в соответствии с требованиями решаемой задачи, а управляющая обеспечивает координацию ее работы путем определения ее состояния в ходе получения вектора сигналов логических условий  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$  и выдачи сигналов микроопераций  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_q\}$  в соответствии с заданным алгоритмом управления. Так, например, в качестве сигнала логического условия может служить единичное значение бинарного признака завершения работы одной из схем в составе операционной части [1], достижение счетчиком заданного значения и т.п.; управляющие сигналы обычно используются для фиксации значений в запоминающих элементах схемы (ОЗУ, триггерах и пр.). При проектировании относительно простых систем логического управления (СЛУ), ориентированных на реализацию небольших алгоритмов управления, производится разметка соответствующей граф-схемы, составление графа переходов и проектирование соответствующего управляющего автомата Мили или Мура [2]. Если же алгоритм логического управления  $G = \langle A, V \rangle$ , где  $A$  – множество его вершин,  $V$  – множество дуг, является комплексным и содержит большое количество вершин (как правило сотни), параллельные фрагменты, циклы различного вида (в том числе параллельные), то традиционный подход сталкивается с существенными трудностями. С целью их преодоления в [3–5] было предложено использование однородных многомодульных мультисистем, именуемых логическими мультиконтроллерами (ЛМК), включающих в своем составе определенное количество относительно простых логических контроллеров, каждый из которых может выполнять последовательный подалгоритм  $A_i \subseteq A$ ,  $\bigcup_{i=1}^H A_i = A$ ,  $\forall i, j = \overline{1, H}, i \neq j: A_i \cap A_j = \emptyset$  ограниченной сложности, являющейся частью исходного комплексного алгоритма управления  $G$ . Каждый контроллер в составе ЛМК имеет память микропрограмм ограниченной емкости  $W_{\max}$ , в которой хранится соответствующий подалгоритм  $A_i$ , и заданное число ножек (или портов ввода/вывода) для приема сигналов логических условий  $X_{\max}$  и выдачи сигналов микроопераций  $Y_{\max}$ . При обеспечении координации работы отдельных подалгоритмов, назначаемых на различные контроллеры в составе ЛМК, можно

добиться выдачи логических условий, соответствующий заданному алгоритму управления  $G$ , т.е., другими словами, реализации СЛУ в базисе ЛМК. При этом возникает ряд задач дискретной комбинаторной оптимизации [6], связанных с разбиением заданного алгоритма управления на подалгоритмы (блоки разбиения) в соответствии с ограничениями базиса ЛМК [3–5], размещением полученных блоков в контроллерах, имеющих заданную топологию связей (например, матричную) [3], координацией параллельной работы модулей [3], оптимизацией структуры ЛМК [7] и пр.

В указанной работе рассматривается задача поиска субоптимального разбиения заданного алгоритма логического управления (ее подробное описание можно найти в монографиях [4–5]). При ее решении учитываются структурные и функциональные ограничения базиса ЛМК, к которым относятся соответственно емкость памяти контроллера  $W_{\max}$ , число ножек  $X_{\max}$  и  $Y_{\max}$  и требование отсутствия параллельных вершин в составе блоков разбиения (что вынуждает решать частную задачу классификации бинарных отношений вершин граф-схемы  $G$  [8]), и минимизируются значения множества показателей качества, к которым относятся число блоков разбиения  $Z_H$ , степени дублирования сигналов логических условий и микроопераций  $Z_X$  и  $Z_Y$ , число межблочных связей по управлению  $Z_\alpha$  и межконтроллерный трафик передач управления  $Z_\delta$ . Первые четыре показателя качества напрямую влияют на требования, предъявляемые к ЛМК (в первую очередь, на его аппаратную сложность и, как следствие, на массогабаритные параметры и требования к питанию и тепловыделению), последний определяет требования к организации коммуникационной подсистемы ЛМК (например, с использованием кольцевой или матричной топологии) и быстродействие СЛУ в целом. Путем взвешенного суммирования и нормировки частные показатели сводятся в интегральный показатель  $Z_J$  [9].

Задача поиска разбиения не может быть решена точно за приемлемое время ввиду того, что асимптотика числа решений характеризуется числом Белла  $B_N$ , где  $N = |A|$  – число вершин в составе граф-схемы  $G$ , поэтому для ее решения на практике применяются различные эвристические методы. В настоящее время в составе разработанной авторами программной среды РАЕ [10] для автоматизированного построения разбиений имеются программные реализации следующих методов: метода С.И. Баранова [11], реализующего классический жадный подход (сокр. В); его модификация с ограничением на смежную окрестность [12] (сокр. АВ); метода параллельно-последовательной декомпозиции [13], основанного на множестве эквивалентных преобразований исходной граф-схемы  $G$  (сокр. Р); и метода случайного перебора [14] (сокр. RS). Первые три метода являются последовательными и достаточно быстро синтезируют единственное решение, метод случайного перебора относится к итерационным и обеспечивает перебор заданного количества решений  $S$  с выбором наилучшего из них, что требует существенно больших затрат вычислительного времени.

Вычислительные эксперименты [15–16] с последовательными методами показали, что при различных значениях силы технологических ограничений и размерности решаемой задачи методы демонстрируют существенно различную

степень минимизации показателей качества, поэтому для каждого конкретного случая их практического применения можно сформулировать рекомендации о том, эффективно или нет применять данный метод в данных условиях. Определение областей преимущественного использования методов является вычислительно сложной задачей ввиду того, что необходим анализ степени минимизации частных показателей качества, усредненных на выборках граф-схем параллельных алгоритмов логического управления с псевдослучайной структурой [17] объемом  $K = 5\,000$ , с расчетом их средневыворочных значений  $\gamma_x$ ,  $x \in \{H, X, Y, \alpha, \delta, J\}$  и вероятностей получения суб- или квазиоптимального решения  $\rho_x$  для множества точек, образующих двумерный срез пространства параметров  $(N, X_{\max}, Y_{\max}, W_{\max})$ . Ввиду слабой связности указанной задачи она может быть эффективно решена с использованием грид систем на добровольной основе (в настоящее время для этого используется проект Gerasim@Home на платформе BOINC [18]).

Ввиду ограничений на время вычислительных экспериментов, составившее до 80 часов на расчет одного задания (англ. Work Unit, сокр. WU), для метода случайного перебора было выбрано число итераций  $C = 10\,000$  для  $N \leq 100$  и  $C = 1\,000$  для  $100 < N \leq 200$ . В результате расчетов, выполненных на грид в период с июня 2014 по январь 2015 гг., и постобработки полученных результатов были получены результаты, использованные для анализа качества решений, получаемых методом случайного перебора. Как уже было отмечено ранее, наиболее показательным с позиции сравнения методов является сопоставление вероятностей  $\rho_x$  для решений, полученных с использованием различных методов. При этом возможно определение метода, для которого указанная величина максимальна, а соответствующая точка пространства параметров будет принадлежать к области преимущественного использования данного метода.

В результате обработки экспериментальных данных были получены следующие области преимущественного использования метода случайного перебора, соответствующие срезам  $(N, W_{\max})$ ,  $1 < N \leq 600$ ,  $4 \leq W_{\max} \leq 200$  (рис. 1) и  $(N, X_{\max})$ ,  $1 < N \leq 700$ ,  $3 \leq X_{\max} \leq 150$  (рис. 2) пространства параметров.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что метод случайного перебора эффективен по всем параметрам качества, за исключением интенсивности межблочных взаимодействий  $Z_\delta$ , лишь при малой размерности задачи ( $N < 60 \div 70$ ). С ее ростом, несмотря на существенно меньшие затраты вычислительного времени, эффективными оказываются последовательные методы. В области сильных ( $X_{\max}, W_{\max} < 50$ ) ограничений метод случайного перебора демонстрирует рекордно низкое число блоков разбиения. В перспективе данная особенность может быть использована при совместном использовании последовательных и итерационных методов в соответствии со стратегией ветвей и границ [19]: решение последовательного метода выступает в качестве начального значения рекорда и обеспечивает отсечение неперспектив-

ных решений итерационного метода и, как следствие, экономию затрат вычислительного времени.

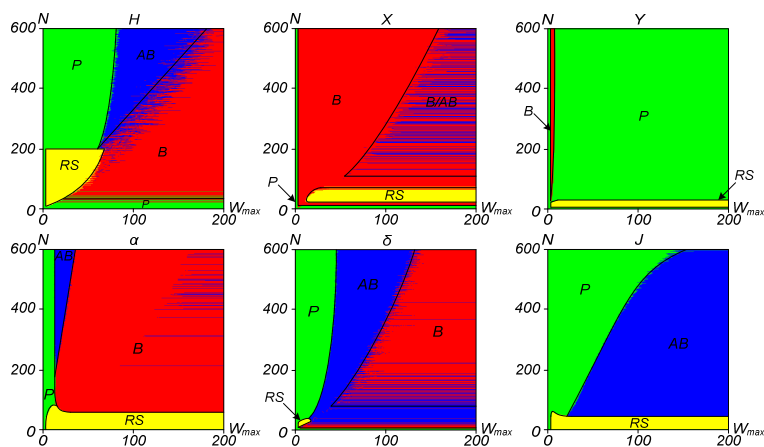


Рис. 1. Области преимущественного использования метода случайного перебора для среза  $(N, W_{\max})$

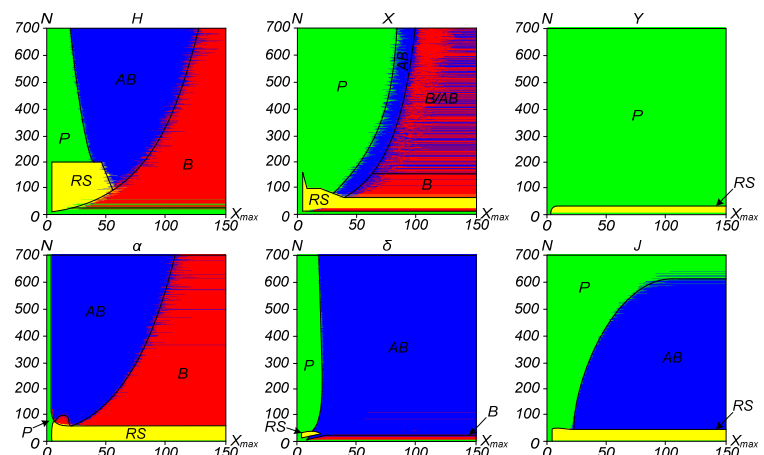


Рис. 2. Области преимущественного использования метода случайного перебора для среза  $(N, X_{\max})$

### Библиографический список

1. Ватутин Э.И., Зотов И.В., Титов В.С. Акселератор для быстрого преобразования конструктивных подмножеств вершин параллельных алгоритмов // Параллельные вычисления и задачи управления (РАСО'10). М.: ИПУ РАН, 2010. С. 1301–1366.
2. Чернецкая И.Е. Теория автоматов. Курск, ЮЗГУ, 2011. 142 с.
3. Зотов И.В., Титов В.С. и др. Организация и синтез микропрограммных мультимикроконтроллеров. Курск: изд-во «Курск», 1999. 368 с.
4. Ватутин Э.И., Титов В.С. и др. Комбинаторно-логические задачи синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления при проектировании логических мультимикроконтроллеров. Курск: КурскГТУ, 2010. 200 с.
5. Ватутин Э.И. Проектирование логических мультимикроконтроллеров. Синтез разбиений параллельных граф-схем алгоритмов. Saarbrücken: LAP, 2011. 292 с.

6. Ватутин Э.И., Титов В.С., Емельянов С.Г. Основы дискретной комбинаторной оптимизации. М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2016. 270 с.
7. Ватутин Э.И., Титов В.С. Структурно-параметрическая оптимизация систем логического управления с использованием добровольных распределенных вычислений // Известия ЮЗГУ. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». 2012. № 2–1. С. 12–17.
8. Ватутин Э.И., Зотов И.В. Построение матрицы отношений в задаче оптимального разбиения параллельных управляющих алгоритмов // Известия КурскГТУ. Курск, 2004. № 2. С. 85–89.
9. Ватутин Э.И. Оценка качества разбиений параллельных управляющих алгоритмов на последовательные подалгоритмы с использованием весовой функции // Интеллект – 2005. Тула, 2005. С. 29–30.
10. Ватутин Э.И., Зотов И.В. Программная система для построения разбиений параллельных управляющих алгоритмов // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'06). М.: ИПУ РАН, 2006. С. 2239–2250.
11. Баранов С.И., Журавина Л.Н., Песчанский В.А. Обобщенный метод декомпозиции граф-схем алгоритмов // А и ВТ. 1982. № 5. С. 43–51.
12. Ватутин Э.И., Леонов М.Е. Использование смежной окрестности при жадном последовательном формировании блоков разбиения граф-схем параллельных алгоритмов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 6. С. 30–35.
13. Ватутин Э.И., Зотов И.В. Метод формирования субоптимальных разбиений параллельных управляющих алгоритмов // Параллельные вычисления и задачи управления (РАСО'04). М.: ИПУ РАН, 2004. С. 884–917.
14. Ватутин Э.И., Колясников Д.В., Мартынов И.А., Титов В.С. Метод случайного перебора в задаче построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов // МППОС'14. Барнаул, 2014. С. 115–125.
15. Ватутин Э.И., Титов В.С. Анализ областей качественного превосходства последовательных эвристических методов синтеза разбиений при проектировании логических мультиконтроллеров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 2. С. 115–122. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-2-115-122.
16. Vatutin E.I., Valyaev S.Yu., Titov V.S. Comparison of Sequential Methods for Getting Separations of Parallel Logic Control Algorithms Using Volunteer Computing // CEUR Workshop Proceedings. Vol. 1502. Aachen, 2015. P. 37–51.
17. Vatutin E.I. Constructing Random Sample Parallel Logic Control Algorithms // Baltic Olympiad on Automatic Control (BOAC'06). SPb, 2006. P. 162–166.
18. <http://gerasim.boinc.ru>
19. Land A.H., Doig A.G. An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems // Econometrica. Vol. 28. 1960. pp. 497–520. DOI: 10.2307/1910129.