

М. И. Чельдиев¹, Л. С. Либман¹

¹ АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М. А. Карцева»

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ

В статье рассматриваются возможности повышения быстродействия при решении определенного класса задач с помощью многоцелевой вычислительной платформы (МВП), созданной в НИИВК им. М. А. Карцева. В качестве таких возможностей рассматриваются видеокарты и оптический модуль EnLight256, габариты которого позволяют включить его в состав МВП. В качестве примера использования видеокарт для повышения быстродействия реализации алгоритмов рассматривается алгоритм нахождения кратчайших покрытий булевых матриц и дальнейшее использование результатов работы этого алгоритма для нахождения минимальных форм слабоопределенных булевых функций. В статье показано, что применение видеокарты для рассматриваемого класса задач позволяет получить выигрыш во времени в несколько раз. Оптический модуль EnLight256, разработанный израильской фирмой Lenslet, в настоящее время является единственным оптическим процессором, выпускаемым серийно, который можно приобрести. Модуль снабжен ПО и совместим с современными электронными модулями. В статье перечисляются преимущества оптических модулей по сравнению с электронными и основные характеристики указанного выше модуля. Кроме того, указаны возможные области применения этого модуля как в мирных целях, так и в военных.

Ключевые слова: вычислительная платформа, видеокарта, оптический модуль.

Введение

Одной из классических задач, широко используемых в области анализа и синтеза цифровых схем, является задача нахождения безызбыточных или кратчайших покрытий булевых матриц. Напомним постановку задачи. Имеются два множества $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ и $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)$, где множество A является множеством строк булевой матрицы, а множество B – множеством столбцов той же матрицы. Каждый элемент множества A покрывает некоторое подмножество элементов из множества B . В булевой матрице этот факт отражается в том, что на пересечении соответствующей строки и столбца стоит единица. Покрытием множества B элементами множества A называется такая совокупность элементов множества A , что каждый элемент множества B будет покрыт хотя бы одним элементом множества A . Покрытие, содержащее наименьшее число элементов, называется минимальным или кратчайшим. Для булевой матрицы это будет означать тот факт, что в каждом столбце будет стоять хотя бы одна единица.

Напомним класс задач, которые решаются с помощью нахождения покрытий булевых матриц:

1. Минимизация булевых функций, которая обычно решается в два этапа: нахождение простых

импликант и нахождение нормальных дизъюнктивных или конъюнктивных форм для слабоопределенных булевых функций (а для реальных автоматов и комбинационных схем булевы функции, которые описывают эти устройства, в большинстве случаев слабоопределенные).

2. Противогоночное кодирование внутренних состояний многотактных автоматов, синтезированных по методу Мацевитого-Денисенко.
3. Синтез проверяющих и диагностических тестов.
4. Разводка печатного мантажа.

Также с помощью нахождения кратчайших покрытий решаются многие другие задачи.

Методы повышения быстродействия работы алгоритмов для решения поставленных выше задач

В настоящее время в большинстве случаев пользуются приближенными алгоритмами нахождения безызбыточных покрытий, так как точные алгоритмы для матриц с несколькими десятками столбцов и строк требуют больших временных затрат при решении их на CPU, даже многоядерных. Попробуем оценить выигрыш во времени при решении задачи нахождения безызбыточных покрытий на GPU, т.е. видеокарте. Заранее оговоримся,

что предлагаемая оценка будет достаточно грубой и сильно зависящей от конкретного примера, но тем не менее она представляет определенный интерес.

Очевидно и понятно, что выигрыш во времени при решении определенных задач на видеокартах реализуется только в тех случаях, когда алгоритм решения удастся распараллелить. Одним, а может быть, и единственным точным алгоритмом нахождения безызбыточных покрытий в настоящее время является алгоритм Патрика, суть которого заключается в том, чтобы конъюнктивную нормальную форму (КНФ) преобразовать в дизъюнктивную нормальную форму (ДНФ).

Использование видеокарт

Для начала попробуем оценить максимально возможный выигрыш по времени при реализации алгоритма Патрика на видеокarte K2100M по сравнению с реализацией этого же алгоритма на четырехъядерном CPU. Видеокarta K2100M имеет 576 ядер. Поэтому при максимальном распараллеливании алгоритма и одинаковой скорости выполнения команд на GPU и четырехъядерном CPU выигрыш составит $576 : 4 = 144$ раза.

Первым этапом любого алгоритма нахождения безызбыточных покрытий булевых матриц является этап сокращения числа строк методом поглощения. Суть метода заключается в том, что строка матрицы, которая содержит единицы только на тех местах, на которых в другой строке стоят единицы, поглощается этой другой строкой. Для реализации этого этапа необходимо сравнить каждую строку исходной матрицы с каждой другой строкой этой же матрицы. Этот этап можно распараллелить следующим образом. Первую строку сравниваем одновременно со всеми остальными (видеокarta позволяет это сделать). При этом в процессе сравнения удаляются поглощаемые строки. Затем ту же операцию проделываем со второй строкой и оставшимися строками, и так далее до тех пор, пока не будут исчерпаны все строки. Понятно, что чем дальше мы продвигаемся, тем меньше приходится совершать операций и, стало быть, выигрыш во времени от использования видеокарты становится меньше. Таким образом получаем сокращенную матрицу.

Далее, следуя алгоритму Патрика, необходимо преобразовать произвольную конъюнктивную нормальную форму (КНФ) в сокращенную дизъюнктивную нормальную форму (ДНФ). На этом этапе распараллеливание алгоритма может быть реализовано достаточно большим числом способов. Этот этап реализации алгоритма представляет самостоятельный теоретический интерес.

Итак, при реализации алгоритма Патрика исходная информация, представленная булевой матрицей, преобразуется в конъюнкцию дизъюнкций

(для простоты изображений переменных с индексами будем писать только индексы, тогда исходная информация будет выглядеть так: $(1 + 2 + \dots + n)(1 + 3 + \dots + k) \dots (2 + 4 + \dots + m)$). В этом изображении знак «+» означает дизъюнкцию, а каждая скобка содержит различное число переменных. Скобок будет столько, сколько содержится строк в сокращенной булевой матрице. Один из многочисленных способов распараллеливания операции перемножения скобок может выглядеть следующим образом. Перемножаем первую скобку на вторую, третью на четвертую, пятую на шестую и так далее до тех пор, пока не будут перемножены все скобки. Далее внутри каждой новой скобки выполняется операция поглощения согласно описанным выше правилам. Заметим, что на этом этапе операции также выполняются одновременно со всеми скобками. Заметим, что после этого число скобок будет как минимум в два раза меньше, чем в исходном представлении. Далее перемножаем таким же образом, как и на первом этапе, оставшиеся скобки, и применяем операцию поглощения. Описанный процесс продолжаем до тех пор, пока не останется одна скобка. Самая короткая конъюнкция (их может быть несколько) и представляет собой кратчайшее покрытие. Здесь почти наверняка описан не самый эффективный способ распараллеливания алгоритма. Необходимо еще раз подчеркнуть, что этап распараллеливания алгоритмов для реализации их на видеокартах требует творческого мышления программиста. К сожалению программ, которые могли бы распараллеливать хотя бы некоторые типы алгоритмов, в настоящее время не существует, но будем надеяться, что через какое-то время они несомненно появятся. Еще раз хочется подчеркнуть, что с применением видеокарт решение многих задач продвинется по времени на несколько порядков. А таких задач в настоящее время существует великое множество во всех областях науки и техники – их даже нет смысла перечислять. Поэтому создаваемая в НИИВК им. М. А. Карцева многоцелевая высокопроизводительная вычислительная платформа (МВВП), в которой далеко не последнее место отводится видеокarte (и их при необходимости может быть в одной платформе несколько), может найти широкое применение.

Как было сказано выше, одной из задач, решаемых с помощью отыскания кратчайших покрытий, является задача минимизации систем слабоопределенных булевых функций [1]. Обычно слабоопределенные булевы функции задаются с помощью перечисления нулевых и единичных наборов, на которых задана функция. Далее для нахождения простой импликанты, имплицитующей каждый набор из множества единичных наборов, необходимо построить матрицу сравнения каждого единичного

набора с матрицей нулевых наборов, т.е. выполнить логическую операцию сложения по модулю 2 [2]. Как легко понять, с помощью видеокарты эта операция может со всеми нулевыми наборами выполняться одновременно. Далее для каждой матрицы сравнения нужно найти кратчайшее покрытие, которое и определит искомого импликанту. Процедура подсчета выигрыша по времени на данном этапе аналогична описанной выше процедуре для нахождения кратчайших покрытий. Второй этап минимизации систем слабоопределенных булевых функций заключается в нахождении кратчайшего покрытия заданного набора конститuent единицы найденными импликантами [3]. В настоящее время описанные выше алгоритмы могут быть использованы при реализации цифровых автоматов с помощью ПЛИС.

Использование оптического модуля EnLight256

Следующим этапом на пути повышения быстродействия цифровых устройств является переход на оптические цифровые логические элементы. Напомним основные преимущества оптических элементов перед электронными. В электронных схемах носителями информации являются электрические импульсы, распространяющиеся по металлическим проводникам, которые при этом, обладая сопротивлением и емкостью, поглощают часть энергии и ограничивают скорость распространения импульса. В оптических же схемах носителями информации являются фотоны, скорость распространения которых по стекловолокну на несколько порядков выше. Вторым существенным преимуществом оптических элементов является на несколько порядков более низкое энергопотребление, ибо световой импульс обладает значительно меньшей энергией по сравнению с электрическим. Расстояние, на которое может распространяться световой импульс по световоду без усиления, в сотни раз больше того, на которое может распространяться электрический импульс. На световоды не действуют никакие помехи. По одному и тому же световоду могут передаваться световые импульсы различной частоты, что позволяет по одному и тому же световоду передавать огромное количество информации.

Идея использовать фотоны вместо электронов в узлах ЭВМ появилась одновременно с изобретением оптических квантовых генераторов – лазеров. В настоящее время достигнуты определенные успехи в создании отдельных узлов ЭВМ с использованием оптических технологий. Частота оптического излучения составляет 10¹²–10¹⁶ Гц, что позволяет создать до 10⁵ информационных каналов со спектральной шириной 100 ГГц. В 2003 году израильская компания Lenslet создала первый в мире

оптический процессор, который можно купить. Процессор называется EnLight256, его производительность составляет 8 терафлопс (8 триллионов арифметических операций в секунду!). Кроме указанных выше рассмотрим еще некоторые преимущества оптической технологии:

1. Можно параллельно передавать целые изображения за один световой пучок.
2. Возможность использования разных сред передачи, хранения и обработки информации.
3. Обработка информации возможна во время ее передачи через оптическую систему, которая реализует вычислительную среду.

При отправлении картинки для ее обработки она будет обработана почти мгновенно, потому что обрабатывается по мере прохождения ее через оптическую систему. EnLight256 – это гибридный оптический процессор. Данная технология использует оптическое ядро, а входная и выходная информация представляется в электронном виде. Оптическая матрица VMM (Vector-Matrix Multiplication) – ядро процессора – конвертирует электрическую информацию в свет, затем производит необходимые преобразования этой информации, направляя свет через программируемую внутреннюю оптику. Свет, который появляется на выходе, воспринимается множеством приемников и преобразуется обратно в электрический сигнал. VMM состоит из трех основных элементов:

- N некогерентных лазеров, которые представляют вектор, состоящий из N элементов (каждый элемент – это 8 бит);
- пространственного модулятора Multiple Quantum Well (MQW), состоящего из $N \times N$ пиксельных модуляторов, размещенных на одном чипе;
- ряда из N детекторов света, которые интегрированы в массив аналого-светового преобразования (ADC).

Пространственный модулятор может поставляться как отдельный продукт, что позволяет создать свой оптический процессор. Этот модулятор называется Ablaze. Сегодня оптический процессор компании Lenslet конструктивно реализован традиционно. Материнская плата – со смонтированными оптоэлектронными компонентами, но в ближайшее время компания обещает компактный конструктив-микросборку. Основные сферы применения Enlight256 – военная промышленность и обработка видео в реальном масштабе времени. Заявленное быстродействие – 8 триллионов целочисленных трехоперандных команд в секунду, или 125 000 000 128-точечных дискретных комплексных

преобразований Фурье. И такая вычислительная мощь обеспечивается энергопотреблением всего 40 Вт. Эти цифры в среднем на два порядка выше (на некоторых задачах – на три и даже на шесть!), чем показатели классических современных DSP. Понятно, что традиционными способами достичь отрыва на шесть порядков от показателей лучших образцов аналогичного назначения невозможно [4].

Заключение

Итак, первый оптический процессор EnLight256 является по принципу действия аналоговым оптическим вычислителем, но аппаратно он представляет собой развитую гибридную цифроаналоговую систему. Внутри «вычислительного ядра» – параллельная счетная машина, которая фактически выполняет одну задачу – умножение матрицы на вектор. Это каноническая операция в вычислительной математике, благодаря которой можно соорудить все что угодно ровно за один такт. Цифра 256 в названии процессора означает, что за один такт процессор способен перемножить вектор из 256 элементов на матрицу размерностью 256x256. У процессора есть высокоскоростные формирователи внешних шин, внешний «кэш» для быстрой загрузки векторов и прочие сугубо «цифровые» артефакты. Степени интеграции оптических и электронных элементов сравнимы между собой, то есть

габариты оптических и электронных логических модулей примерно одинаковы. Исходя из этого процессор EnLight256 вполне может войти в состав модулей МВВП, но лучше дождаться, когда фирма выпустит процессор в конструктиве микросборки (об этом говорилось выше).

Разработчики Lenslet сделали все, чтобы их первый «вычислительный монстр» не отпугивал обычных инженеров. Оптический процессор был снабжен всем необходимым для того, чтобы его использование стало тривиальной технической задачей, – начиная от стандартных шин и аппаратной поддержки отладки и заканчивая полным комплектом ПО.

Процессор в силу своих характеристик прекрасно подходит как для оборонной сферы (распознавание образов в радио- и гидролакации), так и для решения «мирных задач». Одной из таких задач является проблема криптографии, которая заключается в том, что чем выше уровень защиты информации, тем больше требуется времени от вычислительных средств, реализующих эту защиту. Одной из актуальных проблем, связанных с криптографией, в настоящее время является проблема использования криптовалют. Как было отмечено выше, каноническая операция перемножения матрицы на вектор вполне может быть использована в криптографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закревский А. Д., Поттосин Ю. В., Черемисинова Л. Д. Монография «Логические основы проектирования дискретных устройств». М.: Физматгиз, 2007. 592 с.
2. Глушков В. М. Синтез цифровых автоматов: монография. М.: Физматгиз, 1961. 167 с.
3. Карцев М. А. Вычислительные системы и синхронная арифметика. М.: Радио и связь, 1981. 360 с.
4. Реконструируемая вычислительная платформа с разнородной архитектурой / А. К. Барыбин, В. Н. Лобанов, М. И. Чельдиев, П. Б. Чучкалов // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 7. С. 70–77.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чельдиев Марк Игоревич, к.т.н., зам. технического директора, главный конструктор направления, АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М. А. Карцева», 117437, Москва, ул. Профсоюзная, д. 108, тел.: 8 (495) 330-09-92, e-mail: mich@niivk.ru.

Либман Леонид Семенович, к.т.н., старший научный сотрудник, АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М. А. Карцева», 117437, Москва, ул. Профсоюзная, д. 108, тел.: 8 (495) 330-07-65, e-mail: libman.lenya@mail.ru.

For citation: Cheldiev M. I., Libman L. S. Prospects of the multi-purpose computer platform opportunities development. Voprosy radioelektroniki, 2018, no. 5, pp. 42–46. DOI 10.21778/2218-5453-2018-5-42-46

M. I. Cheldiev, L. S. Libman

PROSPECTS OF THE MULTI-PURPOSE COMPUTER PLATFORM OPPORTUNITIES DEVELOPMENT

In the article possibilities of increase of speed for solving a certain class of problems with the help of a profit center created in NIIVK named after M. A. Kartsev. As such capabilities are considered video cards and an optical module InLight256, the dimensions of which allow it to be included in the structure of the profit center. As an example of the use of video cards to improve the speed of implementation of algorithms, an algorithm is considered for finding the shortest coverings of Boolean matrices and further use of the results of this algorithm to find the minimal forms of weakly defined Boolean functions. The article shows that

the use of a video card for the class of problems under consideration makes it possible to obtain a gain in time several times. The optical module InLight256, developed by the Israeli company Lenslet, is currently the only optical processor that is commercially available, which can be purchased. The module is equipped with software and is compatible with modern electronic modules. The article lists the advantages of optical modules in comparison with electronic modules and the main characteristics of the above module. In addition, the possible areas of application of the module for both peaceful purposes and military are indicated.

Keywords: computing platform, video card, optical module.

REFERENCES

1. Zakrevskiy A. D., Pottosin Yu. V., Cheremisinova L. D. *Monografija «Logicheskie osnovy proektirovanija diskretnyh ustrojstv* [The monograph «Logical foundations of designing discrete devices»]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 2007, 592 c. (In Russian).
2. Glushkov V. M. *Sintez cifrovyh avtomatov: monografija* [Synthesis of digital automatic machines: monograph]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1961, 167 p. (In Russian).
3. Kartsev M. A. *Vychislitelnye sistemy i sinhronnaja arifmetika* [Computing systems and synchronous arithmetic]. Moscow, Radio and Communication, 1981, 360 p. (In Russian).
4. Barybin A. K., Lobanov V. N., Cheldiev M. I., Chuchkalov P. B. A reconfigurable computing platform with diverse architecture. *Voprosy radioelektroniki*, 2016, no. 7, pp. 70–77 (In Russian).

AUTHORS

Cheldiev Mark, PhD, deputy technical director, chief designer, M. A. Kartsev Scientific and Research Institute of Computing Systems, 108, Profsoyuznaya ulitsa, Moscow, 117437, Russian Federation, tel.: +7 (495) 330-09-92, e-mail: mich@niivk.ru.

Libman Leonid, PhD, senior researcher, M. A. Kartsev Scientific and Research Institute of Computing Systems, 108, Profsoyuznaya ulitsa, Moscow, 117437, Russian Federation, tel.: +7 (495) 330-07-65, e-mail: libman.lenya@mail.ru.