

ОРГАНИЗАЦИЯ И СТРУКТУРА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 681.323 : 535

А. А. АКАЕВ, С. З. ДОРДОВ

(Фрунзе)

ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ ЦИФРОВАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА В ОСТАТОЧНОЙ АРИФМЕТИКЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Введение. С появлением лабораторных образцов оптических и интегрально-оптических переключательных элементов с приемлемыми характеристиками стало возможным создание оптоэлектронных цифровых вычислительных систем (ОЦВС). Предполагается, что основным преимуществом ОЦВС будет их высокая производительность, которая достигается благодаря быстродействующим переключательным элементам и достоинствам оптики — естественному параллелизму и легкости создания связей. В области вычислительных машин общего назначения, где, вообще говоря, не требуется сверхвысокое быстродействие, ОЦВС, по-видимому, не смогут конкурировать с электронной вычислительной техникой, тем более, что намечается появление нового поколения электронных транзисторов, переключающихся в пикосекундном диапазоне. С другой стороны, в области цифровой обработки изображений, где требуется обрабатывать многомерные сигналы с частотой дискретизации в сотни мегагерц в реальном масштабе времени, электроника встречает серьезные трудности. Необходима аппаратная реализация наиболее важных алгоритмов цифровой обработки сигналов, которая предполагает создание параллельных структур со многими перестраиваемыми связями. Такие структуры могут быть получены в специализированных оптоэлектронных вычислительных системах. В статье предлагается архитектура ОЦВС обработки изображений в остаточной арифметике, элементной базой которой являются интегрально-оптические переключатели.

Интегрально-оптические переключатели. Среди нелинейно-оптических логических элементов наиболее близкими к промышленному освоению являются интегрально-оптические переключатели. Рассмотрим электрооптический волноводный переключатель или направленный ответвитель. На подложке из ниобата лития LiNbO_3 методом диффузии формируются два параллельных световода из титана. Затем на поверхность осаждаются электроды. При отсутствии напряжения на электродах энергия, введенная в один волновод, с высоким коэффициентом переходит в другой. Если к электродам прикладывается напряжение, то свет идет по тому же волноводу без переключения. Расчеты, проведенные в [1], показывают, что время переключения может достигать 25—50 пс при энергии рассеяния 30 пДж. Сообщается об экспериментальном достижении частоты переключения, превышающей 12 ГГц при низкой мощности возбуждения в 1,5 мВт/ГГц [2]. Энергия переключения при этом составит 1,5 пДж, что недостижимо в ближайшем будущем для электронных транзисторов. Французским исследователям удалось снизить вносимые переключателем потери до 0,1—0,2 дБ/см [3]. Один из входов направленного ответвителя электрический. Установив на этом входе фотоприемник, можно получить переключатель, в котором все входы и выходы являются оптическими.

Вследствие относительно слабого электрооптического эффекта в кристалле ниобата лития минимально допустимая длина переключателя составляет несколько миллиметров, что затрудняет создание компактных оптоэлектронных интегральных схем. В полупроводниковых структурах с множественными квантовыми ямами GaInAsP/InP и AlGaAs/GaAs получен электрооптический эффект на несколько порядков сильнее, чем в LiNbO₃. На этом квантовом электрооптическом эффекте, называемом эффектом Штарка, основано действие компактного оптоэлектронного переключателя на пересекающихся волноводах. Размер активного участка ~10 мкм. Установлено, что теоретически достижимый угол пересечения волноводов равен 10°. Время переключения определяется временем релаксации электрического диполя и оценивается в 0,1 пс. Если учесть, что квантовые явления в сверхрешетках протекают с малым потреблением энергии (порядка пикоджоулей), то необходимо отметить, что эти переключатели на сверхрешетках являются весьма перспективной элементной базой ОЦВС [2].

Остаточная арифметика. Один из важных вопросов при разработке архитектуры вычислительных систем — выбор и обоснование системы счисления. Еще на ранней стадии развития цифровых оптических вычислений перспективность использования системы остаточных классов (СОК) была обоснована в [4]. В последнее время снова возрос интерес к этой непозиционной системе. Вычислительный процесс в СОК обладает двумя достоинствами, которые хорошо согласуются с особенностями оптических систем обработки информации: отсутствием межразрядных переносов, что привлекательно при создании параллельных систем; мало-разрядностью остатков, представляющих число, что дает возможность использования табличной арифметики. В СОК довольно просто реализуются операции сложения и умножения, но практически невозможны операции деления и сравнения. Таким образом, СОК может служить эффективной системой счисления для специализированной ОЦВС цифровой обработки изображений, в которой основными операциями являются сложение и умножение.

Основания в СОК — n взаимно простых целых чисел m_1, m_2, \dots, m_n , которые называют модулями. Любое целое число A представляется набором остатков (r_1, r_2, \dots, r_n) , где $r_i = [A]_{m_i}$ — остаток от деления A на m_i .

Это представление единственно в динамическом диапазоне $M = \prod_{i=1}^n m_i$.

Пусть в этой системе заданы два числа $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$. Тогда арифметическая операция над ними осуществляется следующим образом: $Z = X * Y = (z_1, z_2, \dots, z_n)$, где $z_i = [(x_i * y_i)]_{m_i}$, $i = \overline{1, n}$. Символ $*$ обозначает арифметическую операцию сложения, вычитания или умножения. Таким образом, эти операции выполняются в каждом модуле СОК параллельно и независимо от других модулей.

Предлагалось довольно много способов выполнения арифметических операций в СОК. Все они в конечном счете сводятся к реализации второго преимущества: оперированию малыми числами и возможностью вычислений с помощью таблиц. Например, сложение и умножение по модулю 5 можно выполнить по таблицам:

	0	1	2	3	4		0	1	2	3	4		
0	0	1	2	3	4	0	0	0	0	0	0		
1	1	2	3	4	0	1	0	1	2	3	4		
2	2	3	4	0	1	2	0	2	4	1	3		
3	3	4	0	1	2	3	0	3	1	4	2		
4	4	0	1	2	3	4	0	4	3	2	1		
		Сложение							Умножение				

Такие таблицы легко реализуются с помощью матриц оптических логических элементов, фотоприемников, интегрально-оптических переключателей с использованием метода пространственных отображений [4].

$$c_k = \sum_{n=0}^{N-1} a_n b_{nk}, \quad k = \overline{0, N-1},$$

где a_n — элемент входного вектора; b_{nk} — элемент матрицы преобразования; c_k — элемент вектора-результата. К этой операции сводятся некоторые важные алгоритмы цифровой обработки сигналов.

Круговая свертка двух периодических последовательностей

$$y_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n h_{k-n}, \quad k = \overline{0, N-1},$$

сводится к умножению входного вектора X на теплицеву матрицу H , элементы которой $h_{kn} = h_{k-n}$. (Теплицевой называется матрица, элементы которой на каждой диагонали одинаковы, т. е. элементы соседних строк одни и те же со сдвигом на одну позицию.)

Корреляция двух периодических последовательностей

$$z_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n h_{n-k}, \quad k = \overline{0, N-1},$$

также сводится к умножению входного вектора X на теплицеву матрицу H :

$$Z = X \times H.$$

Цифровой фильтр реализует алгоритм

$$y_n = - \sum_{j=1}^{M-1} a_j y_{n-j} + \sum_{l=0}^{N-1} b_l x_{n-l},$$

представляющий собой сумму двух сверток.

Блок перестраиваемой связи, в котором каждый вход может быть соединен с каждым выходом, реализуется в виде умножения входного вектора на матрицу переключения, составленную из нулей и единиц. Единице соответствует наличие связи, а нулю — отсутствие.

Таким образом, оптоэлектронный множитель вектора на матрицу может найти широкое применение в цифровой обработке многомерных сигналов.

Архитектура ОЦВС. Как известно, синтез любой вычислительной системы начинается с формирования требований к ее характеристикам, исходя из существующей или перспективной элементной базы и области применения. Выше было показано, что имеются перспективные оптоэлектронные переключательные элементы с приемлемыми характеристиками. Существует также класс задач, которые могут эффективно решаться на ОЦВС. Это задачи цифровой обработки многомерных сигналов на базе умножения вектора на матрицу. Исходя из этого, основным требованием к ОЦВС является большая производительность, дающая возможность обработки в реальном масштабе времени.

Для данного класса задач характерен естественный параллелизм данных. Поэтому, а также с учетом более полного использования достоинств оптических систем ОЦВС необходимо проектировать как систему класса ОКМД (одиночный поток команд, множественный поток данных).

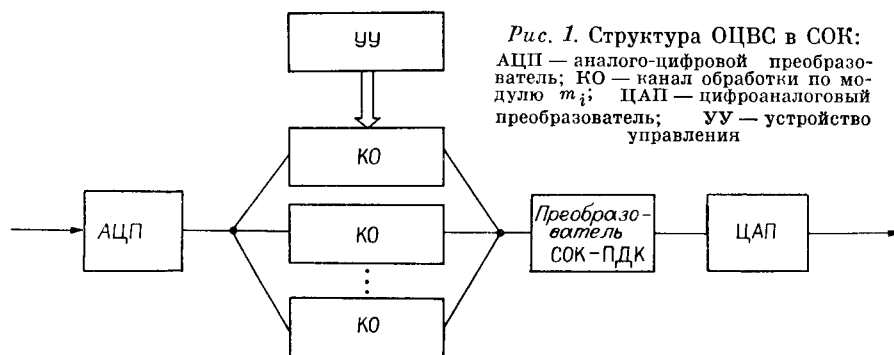


Рис. 1. Структура ОЦВС в СОК:
 АЦП — аналого-цифровой преобразователь; КО — канал обработки по модулю m_i ; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; УУ — устройство управления

Поскольку специализированная ОЦВС предназначена для обработки изображений в реальном масштабе времени, предпочтительно иметь полностью параллельную архитектуру без использования механизма адресации [5]. При этом требуются лишь промежуточные матрицы запоминающих элементов на входе и выходе канала обработки для хранения информации в течение одного такта. В качестве таких матриц могут быть применены ПВМС либо матрицы нелинейно-оптических логических элементов. Возможна также реализация последовательной традиционной архитектуры с механизмом адресации. В этом случае эффект, по-видимому, будет достигаться за счет многократного уменьшения времени выполнения арифметических операций. Какой из этих подходов окажется наиболее приемлемым, покажут дальнейшие исследования.

На рис. 1 представлена структура ОЦВС в остаточной арифметике. Входное изображение поступает на АЦП. Оцифрованный двумерный сигнал затем обрабатывается в n независимых каналах (n — число модулей СОК). Данные выходов каналов поступают на вход преобразователя СОК — позиционный двоичный код (ПДК) и далее на ЦАП для вывода обработанного изображения. Система управляется микроЭВМ, которая также может служить для связи с оператором.

Двумерные входные данные в двоичном коде представляют собой последовательность битовых плоскостей, которая преобразуется в каждом канале обработки в матрицу пространственно-кодированных остатков (рис. 2).

По существу, весь вычислительный процесс происходит в блоке обработки (рис. 3). Арифметическое устройство выполняет операцию умножения матрицы на матрицу либо вектора на матрицу. Операции сложения и умножения производятся на базе матриц интегрально-оптических переключательных элементов табличным методом. Для синхронизации работы блока обработки и преобразователей на входе и выходе установлены ПВМС в качестве буферной памяти. При необходимости выходной сигнал может подаваться через оптическую систему на вход арифметического устройства. Для хранения коэффициентов матрицы преобразования может быть использована ассоциативная голографическая память.

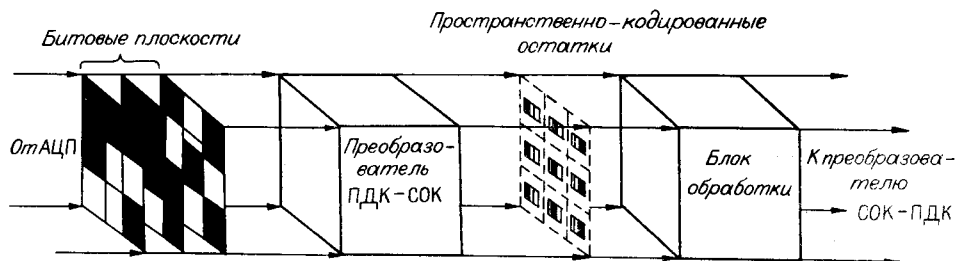


Рис. 2. Канал обработки по модулю m_i

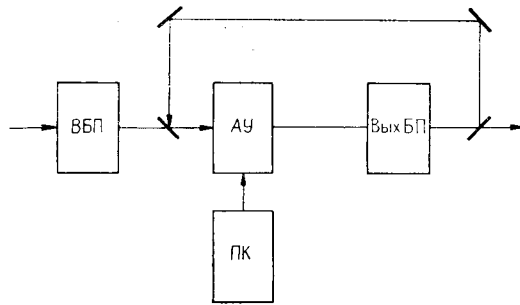


Рис. 3. Блок обработки по модулю m_i :

ВВП — входная буферная память; АУ — арифметическое устройство; Вых.БП — выходная буферная память; ПК — память коэффициентов

Основные характеристики ОЦВС. Оценим быстродействие системы. Пусть арифметические операции выполняются в многофункциональном вычислительном

модуле, построенном на базе матрицы электрооптических волноводных переключателей [1]. Время распространения света через этот модуль составляет около 40 пс, а полный цикл выполнения операции равен 3 нс. Время выполнения матричной операции складывается из времени умножения и времени преобразования СОК — ПДК и обратно. Если система выполняет умножение $\mathbf{C} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$, где \mathbf{A} — матрица размерности $m \times n$; \mathbf{B} — матрица размерности $n \times p$, то время выполнения этой операции можно оценить как $m(3 + 0,04 p)$ нс. Для матриц размерностью 512×512 это время составит 12 мкс. Преобразователь из двоичного кода в СОК, построенный на базе того же универсального модуля, выполняет преобразование одной битовой плоскости за 4 нс. Если на вход поступает массив 32-разрядных слов, то на преобразование ПДК — СОК потребуется 128 нс. Более трудоемкой задачей является обратное преобразование из СОК в двоичный код, которое осуществляется с промежуточным преобразованием в систему со смешанным основанием. Оценки показывают, что время, требуемое для преобразования СОК — ПДК, определится как $(200N)$ нс, где N — размерность входного массива данных. Если $N = 512$, то преобразование СОК — ПДК выполнится за 102,4 мкс. Таким образом, умножение двух матриц размерностью 512×512 осуществляется в ОЦВС примерно за 116 мкс.

Рассмотрим характеристики однокристалльного СБИС-процессора Т9506 фирмы «Toshiba» [6]. Система параллельной обработки изображений на базе этой СБИС выполняет операцию умножения матриц размерностью 512×512 за 26 мс, что на два порядка медленнее, чем в ОЦВС в остаточной арифметике.

В ЭВМ точность вычислений определяется числом разрядов машинного слова и формой представления данных. При одинаковом количестве разрядов в формате с фиксированной точкой достигается более высокая точность по сравнению с форматом с плавающей точкой. Поэтому в процессоре Т9506 реализован 32-разрядный формат данных с фиксированной точкой, в котором можно представить диапазон абсолютных десятичных чисел примерно от 1 до 10^9 . Чтобы диапазон представимых чисел в СОК составил 10^9 , в качестве модулей системы можно выбрать первые 10 простых чисел:

$$m_{i=1,10} = (2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29).$$

Это означает, что для обеспечения точности, достигаемой в 32-разрядном формате с фиксированной точкой, в ОЦВС достаточно иметь 10 независимых каналов обработки с наименьшими по величине модулями СОК.

Заключение. Последние достижения в области создания интегрально-оптических переключателей позволяют рассматривать их в качестве перспективной элементной базы ОЦВС. Существует класс задач цифровой обработки изображений, где ОЦВС могут найти широкое применение. Исходя из этого, предложена архитектура специализированной оптоэлектронной цифровой вычислительной системы. Проанализированы принципы построения ОЦВС, представления информации в системе, выбран класс вычислительных систем. В качестве системы счисления рассмот-

рена непозиционная система остаточных классов. Предложена структура ОЦВС обработки изображений в остаточной арифметике. Приведены оценки основных характеристик системы — быстродействия и точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акаев А. А., Майоров С. А. Оптические методы обработки информации.— М.: Высш. шк., 1988.
2. Суэмацу Я., Аран С. Интегрально-оптический подход к разработке перспективных полупроводниковых лазеров // ТИИЭР.— 1987.— 75, № 11.
3. Галлахер Р. Т. Французские достижения в оптоэлектронике // Электроника.— 1986.— 59, № 2.
4. Орлов Л. А., Попов Ю. М. Оптоэлектронное арифметическое устройство в системе остаточных классов // Автометрия.— 1972.— № 6.
5. Хуан А. Об архитектуре оптической цифровой вычислительной машины // ТИИЭР.— 1984.— 72, № 7.
6. Суган М., Канума А., Судзуки К., Кубо М. СБИС — процессор для обработки изображений // ТИИЭР.— 1987.— 75, № 9.

Поступила в редакцию 22 ноября 1988 г.

УДК 681.325.5 : 535

М. А. ГОФМАН, Е. С. НЕЖЕВЕНКО, В. И. ФЕЛЬДБУШ

(Новосибирск)

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИГНАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ

Оптическая обработка информации имеет достаточно солидный стаж — около четверти века. В то же время устройства, использующие принципы оптической обработки и нашедшие практическое применение, до сих пор являются редкостью. Причин здесь несколько: и успехи электронной вычислительной техники, создающей жесткую конкуренцию оптической, и бедность элементной базы, и неготовность промышленности к освоению оптических вычислительных средств. Кроме перечисленных проблем, на наш взгляд, средства оптической обработки имеют и принципиальные недостатки, сдерживающие их развитие. Один из них — это специализированность оптических вычислительных систем, их негибкость. Практически для каждой новой задачи приходится разрабатывать новое устройство, что приводит к большим затратам и времени, и средств. В электронной вычислительной технике эта проблема была решена с помощью универсальных ЭВМ, однако в последнее время наблюдается переход от повсеместного их применения к использованию более специализированных устройств, обеспечивающих высокое быстродействие при сравнительно небольших затратах. Один из классов такого рода устройств — цифровые сигнальные процессоры (ЦСП).

Несмотря на ограниченный набор базовых операций, в них реализуется большинство алгоритмов обработки изображений и сигналов, при этом скорость обработки в ЦСП существенно выше, чем на универсальных ЭВМ. Достигается это за счет аппаратной реализации наиболее времяземких процедур, специальной организации памяти, широкого применения конвейерных и систолических архитектур. Фактически ЦСП после программирования их с помощью ППЗУ становятся как бы специализированными устройствами.

Возникает вопрос, нельзя ли создать оптическое вычислительное устройство, подобное ЦСП, т. е. имеющее, с одной стороны, универсальную базовую структуру, с другой — становящееся специализированным после программирования. В данной работе показано, что такие вычисли-