

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

УДК 681.324 : 519.68

А. И. Мишин
(Новосибирск)

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР
И ЕГО ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Рассматривается параллельный компьютер, содержащий двумерную вычислительную решетку с локальными межпроцессорными связями и оптический коммутатор, с помощью которого осуществляются глобальные межпроцессорные взаимодействия. Даны оценки производительности компьютера при выполнении как глобальных, так и локальных операций. Показано, что потенциальная производительность компьютера при выполнении глобальных операций, когда межпроцессорные взаимодействия осуществляются посредством световых сигналов и оптических глобальных связей в свободном пространстве, ограничена величиной $\sim c/\lambda$, где c — скорость света, λ — длина световой волны.

Потенциальная производительность компьютера на локальных операциях пропорциональна числу процессоров. Описана параллельная реализация дискретного преобразования Фурье (ДПФ) за минимально возможное время $\sim \tau \sqrt{N}$, где N — число процессоров (отсчетов), τ — длительность процессорного цикла (локального такта). Показано, что при $N > 10^4$ локальная реализация ДПФ эффективнее глобальной.

Введение. Со времени первых публикаций по оптическим процессорам прошло уже 30 лет (см., например, [1]), однако их применение до сих пор ограничено аналоговой обработкой сигналов. В 80-х годах активизировались работы в области оптических вычислительных средств, способных, по мнению авторов, достичь большей в сравнении с электронными компьютерами производительности за счет оптических глобальных связей (длина глобальной связи одного порядка с линейным размером компьютера) между функциональными элементами. Однако именно наличие глобальных связей независимо от их природы (электрических, оптических и т. п.) есть основной фактор, ограничивающий производительность многопроцессорной вычислительной системы (ВС) — параллельного компьютера [2]. Так, производительность глобальной ВС с массовым параллелизмом при решении ряда практически важных задач (например, системы линейных алгебраических уравнений методом итераций) ограничена величиной $\sqrt{(\tau/\delta)^2/\tau} = 1/\delta$, где δ — задержка распространения сигнала на длине линейного размера процессора, τ — длительность процессорного цикла.

Отметим, что замена программно-управляемого компьютера классической схемой автомата, содержащего логический преобразователь и множество связанных с ним элементов памяти (см., например, [3]), не снимает указанное выше ограничение на производительность, поскольку число параллельно вычисляющих элементов при решении ряда задач ограничено величиной $\sim \sqrt{M}$ (M — общее число элементов), а длина оптической связи в такой схеме пропорциональна \sqrt{M} , т. е. оптические связи являются глобальными. Учтите-

вая, что по плотности размещения элементов оптические устройства существенно уступают электронным, то и по производительности оптический компьютер (в том числе параллельный) не может быть выше электронного. Кроме того, в теории автоматов отсутствует язык для компактного задания процесса решения задачи, что практически исключает возможность применения классического автомата для выполнения функций универсального компьютера. Поэтому только на базе процессора с программным управлением можно создать высокоэффективный универсальный компьютер. Следовательно, критика классической модели вычислений (адресной машины) (см., например, [3]) необоснованна.

В [2] показано, что существенного повышения производительности параллельного компьютера можно достичь только при учете специфики решаемых задач — доли глобальных и локальных операций. При решении задач математической физики, линейной алгебры, обработки и распознавания изображений, квантовой хромодинамики и т. п. на процессорной решетке большинство операций являются локальными, для которых операнды берутся из единичной окрестности процессора (элемента решетки). Решение таких задач на глобальной ВС не позволяет достичь приемлемого времени решения. В случае параллельного выполнения локальных операций на процессорной решетке может быть достигнута сколь угодно высокая производительность, поскольку с ростом размера задачи производительность процессорной решетки увеличивается пропорционально либо размеру (числу входных данных) задачи, либо корню квадратному из размера задачи в зависимости от степени ее распараллеливаемости.

В [4] определены границы эффективного решения задачи диффузии локальным и глобальным алгоритмами на параллельных специализированных процессорах с оптическими связями. Показано, что при решении задачи большого размера локальный алгоритм эффективнее глобального. В [5] дан сравнительный анализ выполнения микроопераций, основанных на символьных подстановках, на оптическом и оптоэлектронном глобальных параллельных специализированных процессорах, использующих фурье-оптику. Показано, что электронная реализация локальных связей эффективнее оптической. Исходя из условия теплоотвода определена максимальная производительность параллельного процессора с оптическими глобальными связями. Показано, что даже использование модуляторов света с энергией переключения $\sim 10^{-14}$ Дж/мкм² ограничивает тактовую частоту процессора с линейным размером, равным 15 см, величиной $\sim 10^8$ Гц, тогда как предельная тактовая частота, определяемая задержкой распространения сигнала по оптической связи, может составлять $\sim 10^9$ Гц. При использовании модуляторов света с энергией переключения $\sim 10^{-12}$ Дж/мкм² тактовая частота процессора на три порядка меньше предельной. Некоторые вопросы межпроцессорных соединений, в том числе оптических, рассмотрены в [6]. В частности, показано, что при тактовых частотах более 200 МГц будущее за оптическими соединениями процессоров. В [7], исходя из ограничений, обусловленных дифракцией и абберациями, показано, что предельное число элементов, оптически связанных с помощью решетки линз в трехмерную нейронную сеть с линейным размером L , ограничено величиной $\sim (L/10\lambda)^{2/3}$.

Несмотря на то что в ряде случаев производительность глобальных ВС меньше производительности локальных, возможность оптической реализации произвольных глобальных связей в свободном пространстве представляет интерес с точки зрения повышения дефекто- и отказоустойчивости, а также увеличения производительности при реализации некоторых глобальных алгоритмов (типа БПФ) за счет эффективного использования небольшого числа ($< 10^3$) сверхбыстродействующих процессоров.

В данной работе (в отличие от вышеуказанных) даются оценки производительности универсального оптоэлектронного параллельного компьютера с локальными и глобальными межпроцессорными связями при выполнении как

глобальных, так и локальных операций. Определены границы эффективности параллельных вычислений на примере глобальной и локальной реализаций преобразования Фурье за минимально возможное число тактов.

Под оптоэлектронным параллельным компьютером в настоящей работе понимается ВС решетчатой структуры, каждый из процессоров которой может взаимодействовать как с соседними процессорами, так и с любым другим процессором, расположенным на расстоянии $2, 3, \dots, \sqrt{N}$, где N — размер решетки (расстояние между соседними процессорами принято за единицу). При этом связи единичной длины (локальные связи) фиксированы, а остальные являются программируемыми и реализуются посредством оптического коммутатора, использующего световые сигналы и оптические глобальные связи в свободном пространстве.

1. Структура оптоэлектронного параллельного компьютера и оценка его производительности. Структуру такого компьютера можно представить (рис. 1) в виде композиции процессорной решетки из N m -разрядных процессоров с памятью и оптического коммутатора, с помощью которого осуществляется отображение процессорной решетки на себя. Будем полагать, что функции коммутатора выполняет матрица из N дефлекторов, каждый из которых связан со своим управляющим элементом. Процессор содержит m управляемых источников света (например, модуляторов света или полупроводниковых лазеров) и m фотоприемников. Каждому отклоняющему m -разрядный световой сигнал дефлектору, расположенному в верхней плоскости на рис. 1, соответствует один процессор. Установка дефлекторов на реализацию требуемых оптических связей может производиться либо процессорами, либо извне. Такая архитектура параллельного компьютера позволяет для каждой задачи создать перед ее решением свою схему связи между процессорами и тем самым в наибольшей степени учесть структуру решаемой задачи.

При реализации оптических соединений в свободном пространстве минимальные размеры элементов, плотность их размещения и длина оптического соединения определяются из условий дифракции и величины допустимого фона засветки фотоприемника, обусловленного влиянием соседних элементов друг на друга (предполагается, что на пластину, на которой расположены модуляторы света, падает плоская волна). Изменения дифракционной картины можно охарактеризовать параметром дифракции $\psi = \sqrt{\lambda}l/\alpha$, где α — линейный размер окна модулятора света, l — длина оптической связи, λ — длина световой волны [8].

Линейный размер модулятора света определяется длиной оптической связи $L_0 \approx 2L$, где L — линейный размер компьютера (процессорной решетки), и допустимым уровнем светового фона (для случая дифракции Френеля этому значению соответствует $\psi = \psi_1 \leq 0,3$) и составляет $\alpha_1 = \sqrt{\lambda}L_0/\psi_1$. Допустимый

уровень светового фона дает возможность определить расстояние β_1 между соседними элементами, расположенными в одной плоскости, и выразить его через число зон Френеля: $\beta_1 = \sqrt{k\lambda}L_0$, где k — целое число ($1 \leq k \leq 10$). Тогда

поверхностная и объемная плотности ρ_{s1} и ρ_{v1} размещения пар «модулятор — фотоприемник» составят [9]:

$$\rho_{s1} = 1/2(\alpha_1 + \beta_1)^2, \quad \rho_{v1} = \rho_{s1}/L_0,$$

где $\alpha_1 + \beta_1 = \sqrt{\lambda}L_0(\sqrt{k} + \psi_1^{-1})$.

Будем считать, что линейный размер процессора определяется линейными размерами пар оптоэлектронных элементов (модуляторов света и фотоприемников). Влияние окружающих элементов будет несущественным при $k = 9$, а потери све-

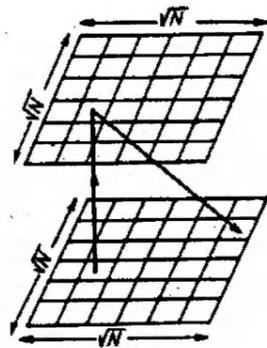


Рис. 1

та за счет дифракции составят ~5 % при $\psi_1 \approx 0,3$. Время распространения сигнала по линейному размеру компьютера (длительность глобального такта) равно L_0/c , а тактовая частота $\nu = c/L_0$, где c — скорость распространения световых сигналов.

Число процессоров в компьютере и его потенциальная производительность равны:

$$N_1 = \rho_{11} L^2 = \rho_{11} L_0^2 / 4 = L_0 / 8\lambda(\sqrt{k} + \psi_1^{-1})^2,$$

$$\Pi_1 = N_1 \nu = \rho_{11} L_0^2 c / 4 = c / 8\lambda(\sqrt{k} + \psi_1^{-1})^2 \leq c / 100\lambda.$$

Полагая $\psi_1 = 0,3$, $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ см, $k = 9$ и $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с, получим $\Pi_1 = 2 \cdot 10^{12}$ опер./с. Например, такая производительность может быть достигнута при параллельной обработке бинарного изображения.

Если обмен информацией между процессорами осуществляется m -разрядными словами, то число процессоров в компьютере

$$N'_1 = N_1 / m = L_0 / 8m\lambda(\sqrt{k} + \psi_1^{-1})^2,$$

а его потенциальная производительность

$$\Pi'_1 = N'_1 \nu = c / 8m\lambda(\sqrt{k} + \psi_1^{-1})^2.$$

При $m = 32$ $\Pi'_1 \approx 10^{11}$ опер./с. Такая производительность достигается при размещении N'_1 процессоров и mN'_1 пар «управляемый источник света — фотодетектор» на площади размером L^2 . При тактовой частоте 10^8 Гц $N'_1 \approx 10^3$, а линейный размер компьютера $L = L_0/2 = c/2\nu = 150$ см. При использовании сверхбыстродействующих процессоров с $\nu = 10^9$ Гц $N'_1 \approx 100$, а $L = 15$ см.

Отметим, что за счет увеличения скорости передачи информации в m раз число пар оптоэлектронных элементов одного процессора можно сократить до двух и тем самым уменьшить до минимально возможной величины размер компьютера, а следовательно, увеличить производительность Π'_1 до величины 10^{12} опер./с. В этом случае каждый процессор должен иметь два быстродействующих буферных блока памяти (для передачи и приема), с помощью которых осуществляется межпроцессорный обмен с частотой $\nu' = m\nu$. При $\nu = 10^8$ Гц $N = 10^4$, $L = 150$ см.

Оценим ρ_{22} , N_2 и Π_2 для случая дифракции Фраунгофера, т. е. при $\psi_2 = r\psi_1$, где $r \gg 1$.

Размер фотоприемника определяется диаметром светового луча на расстоянии L_0 от источника света и составляет

$$\alpha_2 = 2\lambda\psi_2 L_0 / \sqrt{\lambda L_0} + \sqrt{\lambda L_0} / \psi_2 \approx 2\sqrt{\lambda L_0} \psi_2.$$

Расстояние между соседними фотоприемниками $\beta_2 = 2\alpha_2 = 4\psi_2 \sqrt{\lambda L_0}$. Поверхностная плотность размещения пар «фотоприемник — источник света» равна

$$\rho_{22} = 1/2(\alpha_2 + \beta_2)^2 = 1/72\psi_2^2 \lambda L_0 = 10\rho_{11}/r^2.$$

Число процессоров $N_2 = \rho_{22} L^2 = L_0 / 300\psi_2^2 \lambda = 10N_1 / r^2$, а $N'_2 = L_0 / 300\psi_2^2 m\lambda = 10N'_1 / r^2$. Производительность $\Pi_2 = \tilde{\nu}_2 \nu = c / 300\psi_2^2 \lambda = 10\Pi_1 / r^2$, а $\Pi'_2 = \tilde{\nu}'_2 \nu = c / 300\psi_2^2 m\lambda = 10\Pi'_1 / r^2$. Таким образом, оценки ρ_{22} , N_2 и Π_2 для случая дифракции Фраунгофера в $r^2/10$ раз хуже в сравнении с оценками ρ_{11} , N_1 и Π_1 .

Из изложенного следует, что максимально возможная производительность, равная Π_1 , достигается при решении задач методом крупноблочного

распараллеливания с глубиной распараллеливания (числом параллельных ветвей — процессоров) много меньше размера задачи, а в некоторых случаях (например, при решении системы линейных алгебраических уравнений методом итераций) и меньше корня квадратного из размера задачи. Число процессоров N и тактовая частота ν связаны соотношением $N\nu \leq 10^{12}$ опер./с. Очевидно, что подобный метод решения сложных задач можно реализовать только на универсальном компьютере, построенном из универсальных процессоров с программным управлением вычислительным процессом в каждом. Типичным представителем такого процессора с памятью является классическая машина с памятью произвольного доступа и хранимой программой.

Отметим, что предельная производительность параллельного компьютера может быть достигнута при использовании модуляторов света с энергией переключения $10^{-7}—10^{-4}$ Дж/см² в зависимости от усредненного числа передающих процессоров $n_{\text{ср}}$, приходящихся на один такт работы компьютера. В зависимости от глубины распараллеливания задач, решаемых с помощью глобальных трансляционно-циклических схем межпроцессорных обменов, $n_{\text{ср}}$ может принимать значения от единицы до \sqrt{N} . Поэтому число активных модуляторов света может колебаться от m до $m\sqrt{N}$. В случае задач, решаемых с помощью локальных межпроцессорных связей, в которых число передающих процессоров равно числу принимающих и составляет $\sim N/2$, глобальные оптические связи не используются. Учитывая, что энергия переключения модулятора света с линейным размером, равным 10^{-1} см, составляет в лучшем случае 10^{-9} Дж (это на пять порядков больше энергии переключения транзисторного вентиля с линейным размером $\sim 10^{-4}$ см), можно заключить, что логические сети из простейших элементов (вентилей, нейронов и т. п.), соединенных оптическими связями в свободном пространстве, неэффективны в сравнении с логическими сетями на транзисторах и электрических связях.

Что касается критики универсального процессора с программным управлением (см., например, [3]), то она необоснованна. Архитектура классической машины остается целесообразной и в условиях оптоэлектронной схемотехники. Более того, в рассмотренном параллельном компьютере — модели коллектива вычислителей — адресная машина является базовым элементом — вычислителем. В этом смысле она ближе к параллельным системам, чем архитектуры компьютеров, предложенные в 80-х годах (например, потоковые).

Конструкция компьютера существенно упрощается при сохранении его эффективности на широком классе задач, если ограничиться только матричной структурой (или шинным гиперкубом) параллельного компьютера с вертикальными и горизонтальными оптическими связями (шинами) с сохранением всех локальных межпроцессорных связей. В этом случае функции матрицы дефлекторов, посредством которых осуществляются указанные глобальные

вертикальные и горизонтальные оптические связи, может выполнять, например, синтезированная голограмма из $2N$ подголограмм — две подголограммы на процессор, одна из которых используется для трансляции (размножения) данных процессором одноименной строки, а другая — процессором одноименного столбца (рис. 2). Фиксированные оптические глобальные шины могут быть также реализованы посредством прозрачной пластины с многократным внутренним отражением света при его распространении по пластине [10]. При этом оптические связи процессора с такими оптическими шинами осуществляются с помощью дифракционных решеток, расположенных на поверхности пластины.

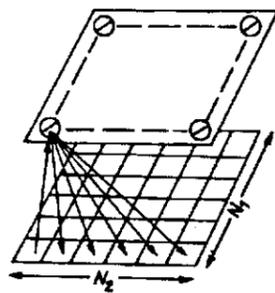


Рис. 2

2. Оценка производительности оптоэлектронной процессорной решетки с оптическими локальными межпроцессорными связями. Для определенности будем полагать, что процессоры построены на базе оптоэлектронных логических элементов, образованных модуляторами света и фотоприемниками (см., например, [9]).

Вначале оценим плотность размещения оптоэлектронных элементов с произвольными оптическими связями длиной, равной удвоенному линейному размеру процессора (элемента решетки).

Структура процессорной решетки представлена на рис. 3, а. В нижней плоскости расположены собственно оптоэлектронные элементы, оптические соединения между которыми реализуются посредством отражательных элементов (например, голограмм отражательного типа), находящихся в верхней плоскости.

Размер элемента решетки d , число источников света и фотоприемников Q в процессоре связаны соотношением $\sqrt{Q} = d/\mu\sqrt{2\lambda d}$, где $\mu = \sqrt{k} + \psi_1^{-1} \approx 6$, откуда $d = 2\mu^2\lambda Q$.

Поверхностная плотность размещения процессоров равна $\rho_p = 1/d^2 = 1/4\mu^4\lambda^2 Q^2$.

Плотность компоновки процессоров можно увеличить, если часть соединений в нем (особенно длинных, $\sim d$) реализовать с помощью проводников, а остальные — оптическими средствами. Это можно осуществить в многослойной конструкции процессорной решетки, в которой соединения между модуляторами света и фотоприемниками, находящимися в одной и той же плоскости, выполняются проводниками, а оптические соединения между модуляторами света и фотоприемниками, расположенными в разных плоскостях, — путем проецирования одной решетки на другую. При этом длина оптического соединения l' (расстояние между плоскостями) может быть существенно меньше (особенно при больших Q) линейного размера элемента решетки d (снизу она ограничена суммарной толщиной всех слоев процессорной решетки и может составлять $\sim 10^{-2}$ см). При $l' = 10^{-2}$ см, $\rho_p \approx 3 \cdot 10^4$ см $^{-2}$.

На рис. 3, б представлена четырехслойная структура процессорной решетки, содержащая два транспаранта T_1, T_2 и две функциональные плоскости (решетки) P_1 и P_2 . Соединения между управляемыми источниками света и фотоприемниками, расположенными в разных решетках, реализуются оптическим путем, а внутри каждой из решеток выполняются проводниками.

Будем считать, что линейный размер процессора пропорционален корню квадратному из числа оптоэлектронных логических элементов в нем с коэффициентом пропорциональности, равным линейному размеру логического элемента. Требуемая для размещения межэлементных электрических соединений площадь учитывается соответствующим увеличением (незначительным) собственного размера логического элемента. Для размещения электрических соединений может быть использована площадь между модуляторами света и фотоприемниками, поскольку они расположены с шагом, равным $\sqrt{k}\lambda l'$.

Потенциальная производительность N -процессорной решетки с локальными межпроцессорными связями и глобальной синхронизацией равна

$$\begin{aligned} \Pi_n &= Nv_n = (\rho_p L^2)(v/L) = \\ &= \rho_p vL = v\sqrt{\rho_p N}, \end{aligned}$$

где $\rho_p = \rho_p/Q$, а v — скорость распространения сигналов. Такая производительность может быть достигнута при параллельном выпол-

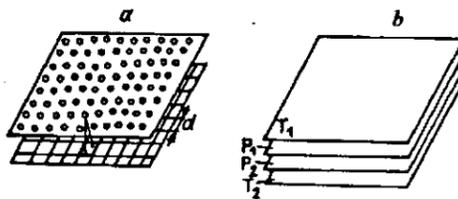


Рис 3

нении локальных операций всеми процессорами компьютера.

При числе оптоэлектронных элементов в процессоре, равном 10^5 , $\rho_p = 10^2 \text{ см}^{-2}$, а производительность оптоэлектронной процессорной решетки при $L = 100 \text{ см}$ ограничена величиной 10^{11} опер./с, тогда как в случае процессорной решетки на транзисторах, изготовленной методами полупроводниковой технологии, при том же линейном размере решетки $\rho_p = 100 \text{ см}^{-2}$, $N = 10^6$, $\Pi_n \approx 10^{14}$ опер./с.

Дальнейшее повышение производительности процессорной решетки (на локальных операциях) может быть достигнуто только путем перехода на локальную синхронизацию работы процессоров. Например, преобразование синхронно-глобальных ВС в синхронно-локальные достигается путем выравнивания задержек распространения импульсов от генератора синхросигналов к процессорам ВС. В этом случае $\Pi_n = Nv'_n = O(\rho_p L^2 v/d)$.

Таким образом, максимально возможная производительность (при выполнении как глобальных, так и локальных операций) оптоэлектронного параллельного компьютера, рассмотренного в п. 1, достигается при использовании в нем процессорной решетки, выполненной на транзисторах. При этом локальные межпроцессорные связи могут быть как электронными, так и оптическими, а оптические соединения логических элементов внутри процессора в сравнении с электрическими связями неэффективны.

3. Эффективность параллельных вычислений на матричном компьютере с глобальными и локальными межпроцессорными связями. Сравнение параллельного решения задачи глобальным и локальным алгоритмами проведем на примере вычислений дискретного преобразования Фурье (ДПФ) за минимально возможное число тактов.

При числе отсчетов N , представимом в виде произведения взаимно простых целых чисел N_1 и N_2 , ДПФ может быть записано в так называемой «строчно-столбцовой» форме [11]:

$$X_{k_1, k_2} = \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \left(\sum_{n_1=0}^{N_1-1} x_{n_1, n_2} W_1^{n_1 k_1} \right) W_2^{n_2 k_2}, \quad (1)$$

где $w_1 = \exp(-j2\pi/N_1)$, $W_2 = \exp(-j2\pi/N_2)$, $j = \sqrt{-1}$, $k_1 = 0, 1, \dots, N_1 - 1$, $k_2 = 0, 1, \dots, N_2 - 1$.

Первоначально рассмотрим реализацию ДПФ, когда обмен информацией между процессорами производится посредством оптических глобальных связей. При таком вычислении ДПФ структуру параллельного компьютера, описанного в п. 1, удобно представить в виде матричной схемы из $N_1 \times N_2$ процессоров с N_1 горизонтальными и N_2 вертикальными оптическими шинами (рис. 4), посредством которых осуществляются глобальные межпроцессорные взаимодействия (процессоры показаны кружками) по строкам и столбцам процессорной решетки. Такая структура межпроцессорных связей может быть

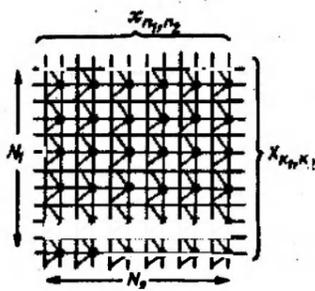


Рис. 4

получена путем настройки (программной или технологической) оптического коммутатора перед решением задачи. Каждая горизонтальная оптическая (или вертикальная) шина выполняет функции трансляционного канала, с помощью которого один из процессоров, связанный с этой шиной, осуществляет передачу своих данных остальным принимающим процессорам этой строки (соответственно столбца).

Отсчеты x_{n_1, n_2} подаются в процессоры по вертикальным шинам, причем в одном и том же такте на процессоры одноименного столбца поступает один и тот же сигнал (отсчет). Функции процессоров ввода отсчетов могут выполнять, например, процессоры верхней строки на рис. 1.

При вычислении ДПФ используется трансляционно-циклическая схема взаимодействия процессоров одноименной строки. В каждом такте один из процессоров одноименной строки является передающим (ведущим) процессором, а остальные — принимающими (ведомыми).

Вычисление ДПФ осуществляется в два этапа. На первом этапе каждый из процессоров вычисляет свою внутреннюю сумму формулы (1), а на втором (с помощью межпроцессорных обменов данными первого этапа) — внешнюю.

На первом этапе каждый процессор, получив очередной отсчет по соответствующей вертикальной шине, производит внутреннее суммирование формулы (1) по индексу n_1 , т. е. умножает принятый отсчет x_{n_1, n_2} на $W_1^{n_1 k_1}$ и добавляет полученное значение к накапливаемой у себя сумме. После получения от источника данных отсчета x_{N_1-1, n_2} , умножения его на $W_1^{(N_1-1)k_1}$ и вычисления результирующей внутренней суммы формулы (1) каждый из процессоров переключается на вычисление ее внешней суммы.

Вычисления внешней суммы производятся путем последовательного выполнения N_2 циклов «обмен — вычисление», причем в каждом цикле выполняются N_1 передач результирующих внутренних сумм процессорами одноименного столбца и $N_1(N_2 - 1)$ приемов этих данных соответствующими процессорами строк. Затем каждый из процессоров умножает полученное число на соответствующее $W_2^{n_2 k_2}$ и производит внешнее суммирование по формуле (1).

В каждом такте работы компьютера один из процессоров одноименной строки является передающим (всего N_1 передающих), а остальные — принимающими (всего $N_1(N_2 - 1)$ принимающих). Передающими бывают все по очереди процессоры одноименной строки.

Вычисление внешней суммы формулы (1) выполняется следующим образом. Вначале первые процессоры каждой строки передают свои результирующие внутренние суммы, а остальные принимают соответствующие данные. Затем каждый из процессоров умножает принятое число на $W_2^{n_2 k_2}$. Далее вторые процессоры каждой строки передают свои данные, а остальные принимают соответствующие данные и умножают их на соответствующие $W_2^{n_2 k_2}$. Затем каждый из процессоров добавляет полученное произведение к накапливаемой у себя внешней сумме формулы (1) и т. д. до тех пор, пока последние процессоры каждой строки не передадут свои данные соответствующим процессорам. Таким образом, при $N_1 \approx N_2$ временная сложность ДПФ составит $\sim \tau' \sqrt{N}$, где τ' — длительность глобального такта (время распространения оптического сигнала по линейному размеру компьютера).

Вычисление ДПФ по формуле (1) на N -процессорной решетке с локальными межпроцессорными связями (локальная реализация ДПФ) может быть осуществлено за время $\sim \tau \sqrt{N}$, где τ — время исполнения операции процессором (длительность процессорного цикла — локального такта). Учитывая увеличение длительности глобального такта с ростом размера процессорной решетки ($\tau' \sim \delta \sqrt{N}$), можно заключить, что при $\tau < \delta \sqrt{N}$ (т. е. при $N > (\tau/\delta)^2$) локальная реализация ДПФ эффективнее глобальной. Из полученных в п. 1 оценок следует, что глобальная реализация ДПФ неэффективна уже при $N \geq 10^4$ из-за необходимости снижения тактовой частоты процессора до

величины, определяемой неравенством $\nu < 10^{12}/N$ Гц.

Локальная реализация ДПФ осуществляется на процессорной решетке из N_1 кольцевых структур (закольцованных строк решетки) по N_2 процессоров в каждой. Трансляция отсчетов x_{n_1, n_2} по столбцам решетки на этапе вычисления внутренних сумм формулы (1) выполняется посредством вертикальных (столбцевых) межпроцессорных локальных связей. На этапе вычисления внешней суммы формулы (1) полная схема обменов результирующими внутренними суммами между процессорами одноименного кольца реализуется путем циклического обмена, состоящего в том, что i -й процессор ($i = 1, \dots, N_2$) пере-

дает слово $(i + 1) \bmod N_2$ -му процессору и получает слово от $(i - 1) \bmod N_2$ -го процессора. В результате оборота всех N_2 слов по процессорному кольцу каждый из процессоров передает свою внутреннюю сумму всем остальным $N_2 - 1$ процессорам одноименного кольца и получает их внутренние суммы и тем самым вычисляет за время $\sim r\sqrt{N}$ свою внешнюю сумму формулы (1).

Отметим, что при использовании быстродействующих процессоров с $\tau \approx 10^{-9}$ с реализация быстрого преобразования Фурье (глобального алгоритма) малоэффективна уже при $N > 10^4$ из-за больших (в сравнении с вычислительными) затрат времени на межпроцессорные коммуникации, обусловленных низкой плотностью размещения оптоэлектронных элементов.

Заключение. Суммируя изложенное, можно сделать следующие выводы.

1. Производительность оптоэлектронного параллельного компьютера с оптическими глобальными межпроцессорными связями в свободном пространстве ограничена величиной $\sim 10^{12}$ опер./с.

2. Оптоэлектронные цифровые процессоры, построенные на базе управляемых источников света и фотоприемников, из-за низкой плотности размещения оптоэлектронных элементов в сравнении с процессорами на транзисторах не конкурентоспособны. Оптические межэлементные связи на уровне процессора в сравнении с электрическими неэффективны.

3. Наиболее перспективна ВС, содержащая процессорную решетку с локальными межпроцессорными связями и оптические шины для обеспечения глобальных межпроцессорных взаимодействий, например, по матричной схеме. Такая система обладает достоинствами как локальной, так и глобальной ВС.

4. Решение задачи с локальными связями между данными (например, преобразование Фурье) на глобальной N -процессорной ВС с оптическими связями в свободном пространстве дает выигрыш во времени (в сравнении с локальным алгоритмом) при $N \leq 10^4$. Тогда как локальная реализация алгоритма позволяет достичь минимально возможной его асимптотической временной сложности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hawkins J. K., Munsey S. A parallel computer organization and mechanizations // IEEE Trans. on Electron. Comput.—1963.—N 6.
2. Мишин А. И., Леус В. А. Асинхронно-локальные вычислительные системы.—Новосибирск: ИМ СО АН СССР, 1991.
3. Хуан А. Об архитектуре оптической цифровой вычислительной машины // ТИИЭР.—1984.—№ 7.
4. Ozaktas H. M., Goodman J. W. Comparison of local and global computation and its implication for the role of optical interconnections in future nanoelectronic systems // Opt. Commun.—1993.—100, N 1—4.
5. Kiamilev F., Esener S. C., Paturi R. et al. Programmable optoelectronic multiprocessors and their comparison with symbolic substitution for digital optical computing // Opt. Eng.—1989.—28, N 4.
6. Stone H. S., Cocke J. Computer architecture in the 1990 s. // Computer.—1990.—24, N 9.
7. Sakano T., Noguchi K., Matsumoto T. Optical limits for spatial interconnection networks using 2-D optical array devices // Appl. Optics.—1990.—29, N 8.
8. Калитеевский Н. И. Волновая оптика.—М.: Наука, 1971.
9. Косцов Э. Г., Мишин А. И. Особенности построения оптических ЦВМ // Микроэлектроника.—1977.—6, № 2.
10. Cinato P., Young K. C. Optical interconnections with in multichip modules // Opt. Eng.—1993.—32, N 4.
11. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток.—М.: Радио и связь, 1985.

Поступила в редакцию 11 декабря 1992 г.