

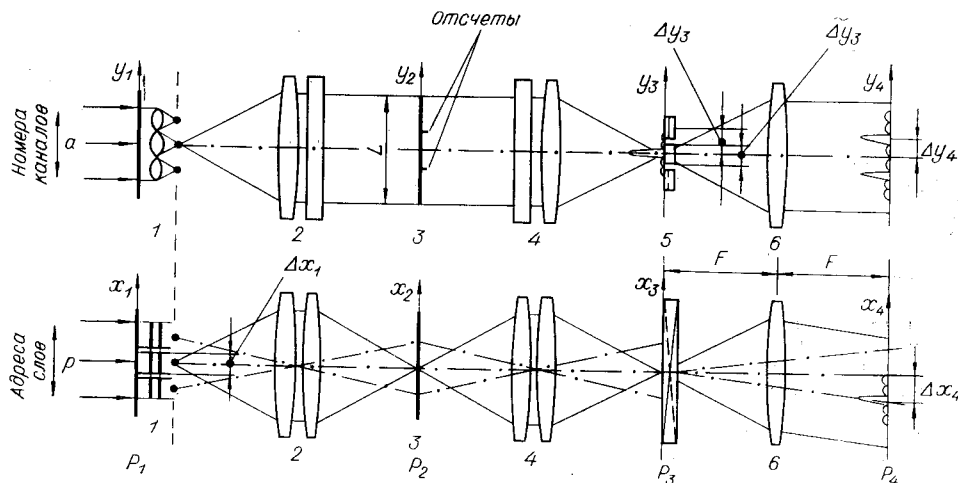
П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ
(Новосибирск)

ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ЛИНЕЙНОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ ПАМЯТИ

Исследования когерентно-оптической системы, предложенной в работе* для аналогового параллельного умножения матриц, показали, что такая система обладает многоканальными свойствами и имеет интересные приложения. В частности, если один из двух транспарантов, используемых в системе для ввода матриц (страниц данных), считать управляющим**, а второй — информационным***, то такая система может применяться в качестве оптического ЗУ с коллективным параллельным доступом к данным, представленным на информационном транспаранте (ИТ). В этом случае размер считываемого слова будет определяться количеством строк ИТ, емкость памяти в словах — количеством столбцов ИТ, а емкость памяти в отсчетах — произведением количества строк на количество столбцов того же транспаранта. Для режима параллельного доступа характерно то, что каждый из пользователей имеет во входной плоскости свою линейку модуляторов, с помощью которых он адресуется к любому слову памяти; в выходной плоскости — свою линейку фотодетекторов, с помощью которых производится считывание восстановленных из памяти слов.

Покажем, что емкость памяти ЗУ с параллельным доступом существенным образом зависит не только от дифракционных ограничений данной системы, но и от числа реализуемых в ней каналов выборки данных. Анализ проведем с учетом максимальных дифракционных фоновых засветок. Полученные результаты позволяют правильно оценить возможности рассматриваемой системы и произвести выбор ее параметров.

На рисунке в двух проекциях приведена принципиальная схема когерентно-оптической системы. Элементами системы являются: 1 — цилиндрический растр; 2, 4 — цилиндрические объективы; 3 — информационный транспарант (ИТ); 5 — клиновый растр; 6 — сферический объектив. Управляющий транспарант (УТ) размещен в плоскости P_1 . Обозначим элементы УТ индексами (a, p) , $a = 0, \pm 1, \dots, \pm A/2$, $p = 0, \pm 1, \dots, \pm P/2$, где a — номер канала (пользователя), а p — адрес слова; элементы ИТ индексами (t, p) : $t = 0, \pm 1, \dots, \pm T/2$, $p = 0, \pm 1, \dots, \pm A/2$, где t — номер отсчета, а p — номер слова; элементы плоскости P_4 индексами (t, a) , где t — номер элемента столбца, a — номер столбца. Количество клиньев в растре 5 равно количеству каналов системы (т. е. $A+1$). Клинья разнонаклонные. При этом клин с номером a отклоняет все пространственно-смещенные и проходящие через него световые пучки (см. ось x_3) на один и тот же линейный участок плоскости P_4 , соответствующий столбцу с но-



* Нежевенко Е. С., Твердохлеб П. Е. Умножение матриц оптическим методом. — Автометрия, 1972, № 6, с. 24—29.

** Элементы транспаранта принимают значения 1 («прозрачен») и 0 («непрозрачен»).

*** Элементы транспаранта могут в общем случае принимать несколько градаций пропускания.

мером a . Поскольку формирование этих пучков производится входной линейкой модуляторов, ориентированных вдоль оси x_1 и соответствующих каналу a , то любое из считываемых ими информационных слов восстанавливается на линейке фотодетекторов, размещенной вдоль столбца a выходной плоскости. Такое построение системы обеспечивает ей возможность независимой работы по $(A+1)$ каналам одновременно.

Установим элементы $(-1, -1)$, $(0, 0)$, $(1, 1)$ УТ в состояние 1. Тогда после освещения входа системы плоской монохроматической волной света в фокальной плоскости цилиндрического раstra будет сформировано три световых «штриха», расположенных по диагонали. Далее штрихи проецируются по оси y в плоскость P_3 , при этом расширенные световые пучки, распространяясь между объективами 2 и 4, производят считывание трех линейных слов $k_{-1}(y_2)$, $k_0(y_2)$ и $k_{+1}(y_2)$. Будем предполагать: отсчеты слова $k_0(y_2)$, за исключением центрального ($t=0$), равны 1, отсчеты слов $k_{-1}(y_2)$ и $k_{+1}(y_2)$ все равны 1. Кроме того, отсчеты имеют размер Δy_2 и расположены вдоль оси y_2 с шагом $\Delta y_2 \geq \widetilde{\Delta y_2}$. Поскольку клинья раstra 5 имеют размер $\widetilde{\Delta y_3}$, то ограничение спектров Фурье слов приведет к тому, что восстанавливаемые на разных столбцах плоскости P_4 слова k_{-1} , k_0 и k_{+1} оказываются «размытыми». Размытие по оси y_4 определяется функцией $\text{sinc}(\pi \widetilde{\Delta y_3}) y_4 / \lambda F$ — одномерной импульсной реакцией отображающей оптической системы между плоскостями P_2 и P_4 . Здесь λ — длина волны света, F — фокусное расстояние объектива 6.

Вдоль оси x система осуществляет двойное проецирование световых штрихов размером Δx_1 в плоскость P_3 . Если пренебречь уширением штриха на этом участке системы, то амплитудное распределение света вдоль оси x_4 будет пропорционально функции $\text{sinc} \pi \Delta x_1 (x_4 + a \Delta x_4) / \lambda F$, где координата $a \Delta x_4$, зависящая от номера включенного канала, определяет место восстановления слов k_{-1} , k_0 и k_{+1} выходной плоскости (или координату линейки фотодетекторов).

С учетом изложенного амплитудное распределение света, пропорциональное изображениям восстановленных слов, будет иметь вид

$$\begin{aligned} k_{-1}(y_4) &= \text{sinc} \frac{\pi \Delta x_1}{\lambda F} (x_4 + \Delta x_4) \sum_{t=-T/2}^{T/2} \int_{-L/2}^{L/2} \text{rect} \left[\frac{y_2 - t \Delta y_2}{\widetilde{\Delta y_2}} \right] \text{sinc} \frac{\pi \widetilde{\Delta y_3}}{\lambda F} (y_4 + y_2) dy_2; \\ k_0(y_4) &= \text{sinc} \frac{\pi \Delta x_1}{\lambda F} x_4 \sum_{\substack{t=-T/2 \\ t \neq 0}}^{T/2} \int_{-L/2}^{L/2} \text{rect} \left[\frac{y_2 - t \Delta y_2}{\widetilde{\Delta y_2}} \right] \text{sinc} \frac{\pi \widetilde{\Delta y_3}}{\lambda F} (y_4 + y_2) dy_2; \\ k_{+1}(y_4) &= \text{sinc} \frac{\pi \Delta x_1}{\lambda F} (x_4 - \Delta x_4) \sum_{t=-T/2}^{T/2} \int_{-L/2}^{L/2} \text{rect} \left[\frac{y_2 - t \Delta y_2}{\widetilde{\Delta y_2}} \right] \text{sinc} \frac{\pi \widetilde{\Delta y_3}}{\lambda F} (y_4 + y_2) dy_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где L — размер стороны транспаранта в плоскости P_2 .

Из выражений (1) следует, что суммарный уровень дифракционного фона в окрестности точки $(0, 0)$ плоскости P_4 будет зависеть от двух факторов:

степени размытия отсчетов вдоль нулевого столбца и расстояния ($\Delta y_4 = \Delta y_2$) между отсчетами;

степени размытия столбцов и расстояния (Δx_4) между ними.

Существует еще один фон, который, вообще говоря, следует учитывать. Имеется в виду перекрестный фон, появляющийся в выходной плоскости из-за плотного размещения клиньев раstra. В результате «хвосты» спектров Фурье слов, восстанавливаемых, например, по каналам $a = \pm 1$, попадают на клин, соответствующий промежуточному каналу (см. рисунок, плоскость P_3). Тем не менее этим фоном будем пренебрегать. Шаг Δy_3 между клиньями выберем таким, чтобы энергия попадающих на него «хвостов» была пренебрежимо малой в сравнении как с энергией сигнала, передаваемой в выходную плоскость, так и с энергией дифракционного фона, возникающего в выходной плоскости вследствие размытия отсчетов и столбцов. Естественно, что увеличение шага Δy_3 повлечет за собой уменьшение количества каналов, одновременно действующих в системе.

Если количество параллельных каналов является заданным, то шаг между клиньями в плоскости P_3 будет равен $\Delta y_3 = L / (A+1)$.

Пусть $\widetilde{\Delta y_3} = \Delta y_3 / \delta_1$, где $\delta_1 \geq 1$ — коэффициент, выбираемый из условия существенного превышения энергии сигнала над энергией перекрестных помех (два соседних «хвоста»). Тогда, если исходить из предположения, что на размере Δy_3 клина размещается нулевой порядок дифракции от отсчета размером $\widetilde{\Delta y_2}$, получим $\widetilde{\Delta y_2} = 2\lambda F / \Delta y_3$. Очевидно, что размер Δy_4 , характеризующий размытие импульсной реакции вдоль оси y , также равен $2\lambda F / \Delta y_3$.

Шаг между отсчетами будем выбирать по формуле

$$\Delta y_4 = \widetilde{\Delta y_4} + \delta_2 \widetilde{\Delta y_4}, \quad (2)$$

где δ_2 — коэффициент ($\delta_2 \geq 0$). Первое слагаемое в (2) определяет размер размытого отсчета, а второе — размер между краями размытых отсчетов, выбираемых из соображения обеспечения в выходной плоскости заданного отношения сигнал/дифракционный фон.

Зная шаг Δy_4 , можно найти количество отсчетов, которое можно разместить на транспаранте со стороны L , т. е.

$$(T+1) = L/(1+\delta_2)\widetilde{\Delta y}_4 = L^2/2\delta_1(1+\delta_2)\lambda F(A+1). \quad (3)$$

Формулу (3) можно представить в виде

$$(T+1) = \frac{L/(A+1)}{2\delta_1(1+\delta_2)(\lambda F/L)}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что возможность работы системы в режиме коллективного доступа дается ценой уменьшения эффективного размера стороны транспаранта, а следовательно, уменьшения количества отсчетов в слове. Знаменатель этого выражения — эффективный размер шага между отсчетами, зависящий от требуемого отношения сигнал/дифракционный фон в выходной плоскости.

Зависимость емкости слова от количества каналов системы следует также из формулы

$$(T+1)(A+1) = \frac{L}{2\delta_1(1+\delta_2)(\lambda F/L)} = \text{const}, \quad (5)$$

полученной из (4). Можно видеть, что произведение количества отсчетов на количество каналов при фиксированных параметрах системы является постоянной величиной.

Количество слов, хранимых в памяти системы, можно рассчитать аналогичным образом. Прежде всего примем во внимание, что шаг между столбцами в выходной плоскости равен шагу следования клиньев в плоскости P_3 , что выражается равенством $\Delta x_4 = \Delta y_3$. Допустим далее, что $\Delta x_4 = \Delta x_4/\delta_1$. Тогда

$$\Delta x_1 = 2\lambda F\delta_1/\Delta y_3,$$

а

$$(P+1) = \frac{L^2}{2\delta_1\lambda F(A+1)} = \frac{L/(A+1)}{2\delta_1(\lambda F/L)}. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что при многоканальной работе количество слов также уменьшается в $(A+1)$ раз, а произведение количества страниц на количество каналов, как и в случае (5), является постоянной величиной, т. е.

$$(P+1)(A+1) = \frac{L}{2\delta_1(\lambda F/L)} = \text{const}. \quad (7)$$

С учетом (4) и (6) общая емкость памяти системы равна

$$(P+1)(T+1) = \frac{(L/(A+1))^2}{4\delta_1^2(1+\delta_2)(\lambda F/L)^2}. \quad (8)$$

Формула (8) показывает, что при работе системы в режиме $(A+1)$ параллельных каналов уменьшается емкость ее памяти в $(A+1)^2$ раз.

Требуемые углы наклона клиньев раstra можно определить из уравнения $\sin \varphi_a = a\Delta x_4/F$, $a = 0, \pm 1, \dots, \pm A/2$.

В заключение найдем параметры оптической системы с $D/F = 1:4$, $F = 400$ мм, $L = KD/\sqrt{2} \sim 60$ мм ($K < 1$) и $\lambda = 0,6 \cdot 10^{-3}$ мм. Примем $\delta_1 = 2,5$, $\delta_2 = 0,5$. Можно показать, что в этом случае отношение сигнал/дифракционный фон в окрестности точки $(0, 0)$, где складываются по амплитуде когерентные дифракционные засветки от 4 ближайших окружающих отсчетов, составляет величину порядка 18:1, а отношение сигнал/перекрестный фон — величину порядка 44:1. Тогда из (5) и (7) следует, что $(T+1)(A+1) \sim 2 \cdot 10^3$, а $(P+1)(A+1) \sim 3 \cdot 10^3$. Если в системе реализовать работу по $(A+1) = 10$ параллельным каналам, то емкость слова $(T+1) \sim 200$ отсчетов, а количество слов $(P+1) \sim 300$. При этом полная емкость памяти системы — $(T+1)(P+1) = 6 \cdot 10^4$ отсчетов. Емкость памяти увеличивается на два порядка при одноканальной работе.

Пример показывает, что при многоканальной работе рассматриваемая система может оперировать страницами сравнительно небольшой размерности. Поэтому ее можно применять в качестве буферного оптического ЗУ. «Подкачка» данных может производиться по электрическому или оптическому каналу. В первом случае ИТ должен быть электрически управляемым, во втором — оптически управляемым.

Поступило в редакцию
23 июля 1979 г.