

гиперкуб добавить линию задержки величиной $D = T + 3\tau$, то максимальное количество транзитных передач уменьшится на 1, поскольку при этом последовательность двух передач через задержки $D = T + \tau$, $D = T + 2\tau$ заменяется одной передачей через введенную задержку $D = T + 3\tau$. При помощи этого приема, добавляя или исключая задержки, можно получить необходимый компромисс между временем передачи и количеством используемой аппаратуры. Алгоритм работы связанных процессоров при этом изменяется весьма незначительно.

Отображая алгоритмы передачи информации и топологию связей на традиционные КС, получаем множество типов традиционных КС, из которых на основе компромисса между временем передачи информации и количеством используемого оборудования можно выбрать наиболее приемлемую для конкретного применения КС.

Заключение. Рассмотрен метод реализации различных коммуникационных сред при помощи сверхбыстродействующих оптических элементов, результирующий сигнал в которых получается через время, в 10^2 — 10^5 раз превосходящее период следования обрабатываемых оптических импульсов. Показано, что количество линий связи для реализации такой КС в N раз меньше, чем при использовании традиционных методов (N — количество объединяемых процессорных элементов). Применение широкополосных миниатюрных линий связи, свободных от различных наводок и помех, позволяет реализовать оптическими средствами наиболее громоздкую, трудоемкую и дорогостоящую компоненту МВК — коммуникационную сеть. Другая компонента МВК — набор процессорных элементов — также может быть реализована оптическими средствами в виде одного оптического процессорного элемента, который выполняет функции N традиционных процессорных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Perra P. V. et al. // Proc. of the IEEE.—1989.—77, N 12.—P. 17.
2. Hillis D. The Connection Machine.—Cambridge, Mass.: MIT Press, 1985.
3. Торчинин В. П. Организация многопроцессорных вычислительных комплексов с переменным количеством процессорных элементов // Автометрия.—1992.—№ 1.

Поступила в редакцию 22 апреля 1991 г.

УДК 681.325 : 535.8

О. К. Колесницкий, В. Г. Красиленко

(Винница)

АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЙ КАРТИННОГО ТИПА ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЦЕССОРОВ

(Обзор)

Систематизированы сведения о различных подходах к построению аналого-цифровых преобразователей изображений картинного типа (АЦП КТ) с оптическими картинными (параллельными) входом и выходами, предназначенных для преобразования входного полутонного изображения в набор бинарных разрядных срезов. Обсуждается возможная элементная база для их построения и принципы классификации. На основе анализа различных структур и их реализаций приводятся количественные оценки параметров АЦП КТ и формулируются задачи для дальнейших исследований.

Введение. В последнее время в области обработки изображений наблюдается переход от использования точных и функционально гибких, но не обеспечивающих требуемой производительности универсальных ЭЦВМ, с одной

стороны, и узкоспециальных, менее точных, но высокопроизводительных аналоговых оптических процессоров — с другой, к разработке и исследованию цифровых оптоэлектронных процессоров (ЦОЭП) [1—4], объединяющих в себе преимущества ЭЦВМ и аналоговых оптических процессоров, т. е. обладающих функциональной гибкостью, высокой точностью и производительностью.

Операндами в ЦОЭП являются бинарные картины (дискретные по пространству и двухградационные по уровню интенсивности света изображения). Большинство реальных изображений — непрерывные функции интенсивности света от времени и пространственных координат, поэтому для обработки их в ЦОЭП они должны быть оцифрованы, т. е. представлены набором бинарных картин. Процесс оцифровки реальных изображений заключается в их дискретизации по времени (взятие выборок изображения в конкретные моменты времени) и пространству (замена непрерывных по пространству изображений системой отсчетов, взятых с определенным шагом по осям X и Y), квантовании по уровню всех отсчетов и их кодировании. Все эти операции могут выполняться с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) изображений, в результате действия которых интенсивности каждого отсчета ставится в соответствие n -разрядный цифровой код (для двоичного кода $n = \log_2 L$, где L — количество уровней квантования). Для использования в ЦОЭП эти коды должны быть представлены оптическими сигналами и сгруппированы в бинарные картины. Бинарная картина, составленная из оптических сигналов, соответствующих одноименным разрядам кодов интенсивности отсчетов, называется разрядным срезом (РС).

Известные устройства оцифровки изображений со сканированием [5] и с построчным преобразованием [6] не пригодны для использования в ЦОЭП. Во-первых, их необходимо дополнить устройствами набора страниц (матричными индикаторами) для преобразования последовательности электрических кодовых сигналов в оптические бинарные картины, во-вторых, несмотря на удовлетворительную производительность ($\sim 4 \cdot 10^8$ бит/с), они имеют предел по темпу ввода в ЦОЭП (обычно 50 кадров/с), что будет ограничивать быстродействие ЦОЭП в целом. Решить проблему увеличения темпа ввода реальных изображений позволит создание многоканальных АЦП с оптическими входами и выходами, все каналы которых работают параллельно во времени. Оптические входы всех каналов образуют входную оптическую апертуру (картинный вход) АЦП. В зависимости от способа выдачи РС (последовательно во времени или одновременно) эти многоканальные АЦП могут иметь 1 или n выходных оптических апертур (картинные выходы). Такие многоканальные АЦП, имеющие картинные входы (выходы), будем называть АЦП картинного типа (АЦП КТ).

Разрядные срезы с выхода АЦП КТ поступают в ЦОЭП, где могут накапливаться в памяти страничного типа или направляться в операционную часть, в которой производится их обработка по соответствующим алгоритмам.

Для визуализации результатов решения некоторых задач обработки изображений в ЦОЭП могут понадобиться цифроаналоговые преобразователи картинного типа (ЦАП КТ), преобразующие набор разрядных срезов в многоградационное изображение. ЦАП КТ в данной статье детально не рассматриваются.

В литературе достаточно широко освещены вопросы построения обрабатывающей части ЦОЭП [1—4], оптических страничных запоминающих устройств [7] и др., где предполагается, что обрабатываемые изображения уже представлены в виде набора РС, но почти нет сведений об устройствах ввода и оцифровки полутоновых изображений картинного типа.

Цель статьи — проведение отсутствующей в настоящее время в литературе систематизации сведений о различных подходах к построению АЦП КТ, их анализ, классификация, выявление проблем и направлений дальнейших исследований в области АЦП КТ.

Элементная база. Хотя спектр физических эффектов, используемых в элементах для параллельной обработки изображений, достаточно широк и

продолжает расширяться, на сегодняшний день можно выделить три основных вида элементной базы для АЦП КТ:

1) пространственно-непрерывные оптоэлектронные структуры (ПНОЭС), к которым относятся различные оптически и электрически управляемые транспаранты (ОУТ и ЭУТ), например, ПРОМ, типа ФП — ЭОМ и др. [8], электронно-оптические преобразователи и т. д. Термин «пространственно-непрерывные» относится не к разрядным срезам, а к самим элементам ОУТ, в которых имеются непрерывные по пространству фотоприемные и электрооптические слои;

2) пространственно-дискретные оптоэлектронные структуры (ПДОЭС) в виде матриц оптоэлектронных ячеек на полупроводниковых, в том числе фоточувствительных и светоизлучающих или светомодулирующих приборах [8, 9];

3) оптические бистабильные элементы (ОБЭ), в которых оптическим является не только информационный сигнал, но и сигнал питания (накачка, смещение) [8, 10].

Кроме основных функциональных узлов, при построении АЦП КТ необходимы вспомогательные элементы: всевозможные источники света (для считывания, задания эталонных сигналов и др.), элементы оптической связи: линзы, объективы, зеркала, светорасщепители, мультипликаторы изображений, поляризаторы и другие.

Перечисленная элементная база не удовлетворяет комплексу требований к двумерным устройствам обработки изображений. Так, ПНОЭС характеризуются высокой разрешающей способностью (до 300 лин/мм [8]), но низким быстродействием (единицы — десятки миллисекунд) и плохой равномерностью характеристик по апертуре (разброс 10—15%), что ограничивает количество различных градаций серого; для ПДОЭС характерно среднее быстродействие (1—10 мкс), лучшая, чем у ПНОЭС, равномерность по апертуре, но низкая разрешающая способность (1—10 лин/мм) и отсутствие на сегодняшний день эффективной технологии для изготовления матриц ПДОЭС с большим количеством элементов; ОБЭ характеризуются высоким быстродействием (10^{-9} — 10^{-12} с), но пока не нашли широкого применения из-за больших мощностей накачки и в большинстве случаев разной длины волны входного и выходного света.

Классификация. Классификационная таблица АЦП КТ представлена на рис. 1. Основным признаком классификации АЦП КТ является метод АЦ-преобразования, так как он на формальном уровне описывает процесс АЦ-преобразования в виде последовательности операций. При переходе от формального описания к реальной схеме АЦП КТ производится синтез или выбор устройств, реализующих элементарные операции, и соединение их информационными связями, согласно алгоритму работы. Наличие обратной связи (ОС) характеризует структуру АЦП КТ, а остальные признаки классификации касаются уже элементной базы. Данная классификация не является универсальной, но дает представление о разнообразии структур АЦП КТ и используемых при их реализации физических эффектах. Дальнейшие исследования позволят углубить и расширить данную классификацию. Рассмотрим известные и разработанные авторами подходы к построению АЦП КТ.

АЦП КТ развертывающего преобразования. Все АЦП КТ, функционирующие по данному методу, имеют структурное быстродействие $T = 2^n \tau$, где τ — длительность такта работы АЦП КТ.

В АЦП КТ с ОС [11] (рис. 2, а) входное изображение X подают на оптическое пороговое устройство (ОПУ), порог срабатывания которого монотонно изменяется от одной градации интенсивности в первом такте до 2^n градаций в последнем. В результате на выходе ОПУ с регулируемым порогом (ОПУ с РП) получаем совокупность длительностей оптических сигналов, пропорциональных соответствующим интенсивностям отсчетов входного изображения. Эти оптические сигналы размножаются мультипликатором изображений (МИ) и направляются на n ОУТ. Сигналы записи и стирания для ОУТ вырабатываются формирователями импульсов (ФИ) соответственно по фронту и срезу

Принцип действия любого ОПУ заключается в том, что точки входного изображения с интенсивностью меньше пороговой, на выходе ОПУ оказываются темными, а точки с интенсивностью выше пороговой — светлыми. Как будет показано далее, оптические пороговые устройства являются основным функциональным узлом многих АЦП КТ, поэтому рассмотрим более подробно варианты его реализации.

ОПУ должно обладать резкой пороговой передаточной характеристикой, поэтому при использовании ПНОЭС, обычно обладающих пологой передаточной характеристикой, применяют различные виды ОС: внешнюю оптическую или внутреннюю фотоэлектрическую [8]. Такие ПНОЭС, как РПР-прибор (режим перестраиваемой решетки) [12] и ЖК ПВМС с периодической функцией фотоотклика [12], также можно использовать в качестве ОПУ. В РПР-приборе, преобразующем входную интенсивность в частоту фазовой решетки, пороговая обработка достигается помещением в фурье-плоскость изображения, считываемого с РПР-прибора, щели, пропускающей нужную полосу пространственных частот.

В [11] предложено реализовать оптические пороговые устройства в виде ПДОЭС, содержащей матрицы фотоприемников, пороговых усилителей и светоизлучателей. В литературе описано множество схемотехнических решений пороговых ячеек на различных фоточувствительных негатронах — полупроводниковых приборах с отрицательным дифференциальным сопротивлением на ВАХ (фототиристоры, однопереходные транзисторы, S-диоды, λ-диоды и т. д.), применяемых в основном в качестве запоминающих и логических элементов. Вопросы использования известных и синтеза новых ячеек для построения АЦП КТ являются актуальными.

ОПУ на ОБЭ достаточно широко освещены в литературе [8, 10]. Наиболее перспективны матрицы эталонов Фабри — Перо и SEED-приборы [13].

Приведенные варианты реализации относятся к оптическим пороговым устройствам с постоянным порогом, однако в АЦП КТ зачастую нужны ОПУ с регулируемым порогом. Их можно реализовать на базе ОПУ с постоянным порогом по двум основным схемам:

1) в виде модулятора света (МС) и ОПУ [11] (см. рис. 2, а). Если порог срабатывания ОПУ выбран P_0 , то порог системы из МС и ОПУ $\Pi = P_0/K$, где $K = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$ — коэффициент передачи МС ($0 < K < 1$);

2) в виде управляемого источника коллимированного светового потока (К), светообъединителя и ОПУ [14] (рис. 2, б), при этом общий порог $\Pi = P_0 - x_n$, где x_n — интенсивность на выходе источника света (ИС). Чувствительность данного ОПУ с РП в 2ⁿ раз выше, чем ОПУ с РП на рис. 2, а при использовании ОПУ с одинаковыми порогами P_0 .

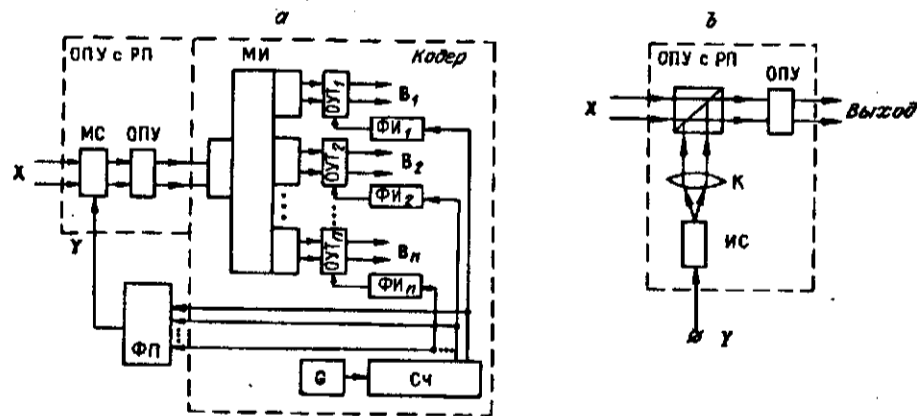


Рис. 2

Управление изменением порога в этих ОПУ с РП осуществляется с помощью электрических сигналов Y : для модуляторов света, реализованных, например, на ЦТСЛ-керамике [8], — это напряжение, а для ИС на основе полупроводниковых лазеров — ток накачки.

Кроме этих двух схем, возможна непосредственная реализация ОПУ с РП с управляющим электрическим входом. Это, например, ЖК ОУТ, в которых порог срабатывания зависит от амплитуды и (или) частоты питающего напряжения [8], или различные ячейки ПДОЭС, в которых порог определяется напряжением питания или опорным напряжением (компараторы и т. п.).

В АЦП КТ развертывающего преобразования без обратной связи [15] также используется преобразование интенсивностей точек входного изображения в совокупность длительностей оптических сигналов, однако для их измерения применяется двумерный регистр сдвига в глубину, что является нерациональным по аппаратурным затратам и в связи с неудобством осуществляемого в этом случае унитарного кодирования (в результате АЦ-преобразования получают не n РС в двоичном коде, а 2^n РС в унитарном).

В рассмотренных АЦП КТ [11, 15] пространственное распределение интенсивности входного изображения преобразуется в совокупность прямо пропорциональных длительностей световых сигналов, т. е. используется принцип широтно-импульсной модуляции (ШИМ). При этом рациональная схема измерения длительностей оптических сигналов [11] (см. рис. 2, а) содержит элементы памяти (ОУТ) с режимами, локально управляемыми светом записи и стирания (например, приборы ПРОМ, «Фототитус» или ФП-ЖК с двухчастотным питанием и локально управляемым светом стиранием), которые функционально сложны. Предложенный в [16, 17] способ АЦ-преобразования изображений позволяет в схеме измерения длительностей сигналов использовать функционально более простые элементы памяти — стробируемые D -зашелки картинного типа, но при этом необходимо, чтобы длительности задавались задержкой короткого оптического импульса относительно запускающего, т. е. используется фазоимпульсная модуляция (ФИМ). Кроме того, этот способ, благодаря использованию фазоимпульсной модуляции, позволяет осуществлять преобразование по любой функциональной зависимости в любой позиционный двоичный код, а также может использоваться для логической обработки изображений.

Структурная схема АЦП КТ данного типа представлена на рис. 3, а, где фазоимпульсный модулятор картинного типа (ФИМ КТ) выполнен в виде совокупности широтно-импульсного модулятора картинного типа (ШИМ КТ) и устройства выделения перепадов оптических импульсов (УВПОИ), с выхода которого короткие оптические импульсы через мультипликатор изображений поступают на картинные входы D -зашелок, стробируемых сигналами с разрядных выходов управляющего двоичного счетчика. После цикла преобразования на D -зашелках будут записаны разрядные срезы в двоичном коде. ШИМ КТ

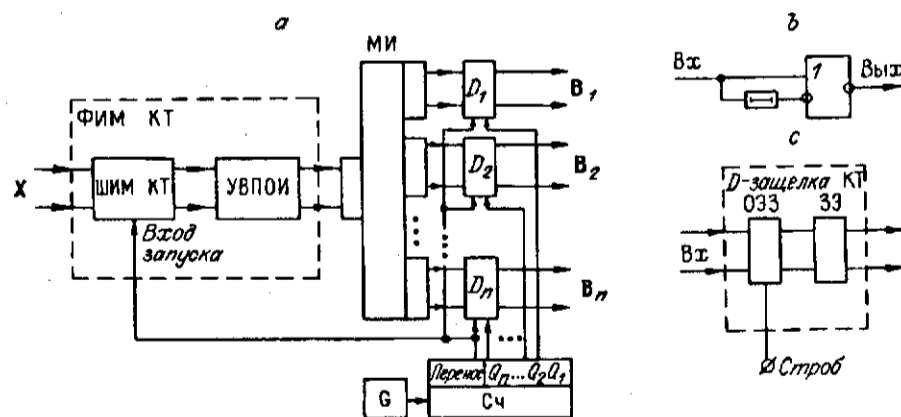


Рис. 3

реализуется в виде ОПУ с РП, порог срабатывания которого изменяется монотонно. УВПОИ картинного типа можно выполнить, например, на ОУТ по эквивалентной логической схеме на рис. 3, *b* или в виде ОУТ МДП-ЖК [8], обладающих свойством импульсного отклика на перепады входного оптического сигнала. Электрически стробируемые *D*-зашелки реализуемы непосредственно на ПДОЭС или по схеме на рис. 3, *c* в виде совокупности оптоэлектронного затвора (ОЭЗ) и нестробируемого запоминающего элемента (ЗЭ) (ОПУ с гистерезисом).

При реализации *D*-зашелок на ОБЭ полезным может оказаться их оптическое стробирование подачей на их картинные входы вместе с входным изображением (ВИ) импульсных, равномерных по плоскости световых полей [17], уровень которых выбран так, чтобы в сумме с уровнем единичного информационного сигнала с выхода МИ он превышал порог срабатывания *D*-зашелки, а отдельно (так же как и уровень единичного сигнала с выхода МИ) был меньше этого порога.

ФИМ КТ, кроме варианта, представленного на рис. 3, *a*, может быть реализован непосредственно (без УВПОИ), например, на РПР-приборе [12] при использовании узкой щели, пропускающей диапазон пространственных частот, соответствующий размаху одной градации яркости. В [9] предложено реализовать ФИМ КТ в виде матрицы одновибраторов с биспин-фотоприемниками [18] в качестве времязадающих элементов. При этом в различных схемах можно получить различные зависимости длительности ВИ от входной интенсивности, в том числе с нелинейным характером. Вид зависимости не принципиален, важно лишь, чтобы эти зависимости были однозначными. Функцию ФИМ КТ выполняет интерферометр Фабри — Перо с помещенной в него фоточувствительной пластиной [19]. Толщина пластины изменяется в зависимости от входной интенсивности, что позволяет осуществлять дополнительную фазовую модуляцию проходящего через интерферометр светового потока. Задавая начальный фазовый сдвиг (определяемый расстоянием между зеркалами интерферометра), можно производить селекцию изображения по интенсивности, так как на выход интерферометра поступает свет от тех участков входного изображения, для которых суммарный фазовый сдвиг кратен λ . При монотонном изменении начального фазового сдвига от 0 до λ , закрепив одно из зеркал интерферометра на пьезоэлектрическом кристалле, получим ФИМ КТ.

В [14] предложен АЦП КТ развертывающего преобразования, содержащий двумерный преобразователь оптического сигнала в частоту импульсов и счетчик оптических импульсов картинного типа [3]. Двумерный преобразователь свет—частота можно реализовать в виде матрицы биспин-фотоприемников [18], преимущество которых заключается в простоте реализации и наличии частотного выхода.

АЦП КТ поразрядного кодирования имеют структурное быстроедействие $T = n\tau$. В АЦП КТ поразрядного кодирования [12], использующем ЖК ОУТ с периодической функцией фотоотклика, разрядные срезы получают последовательно во времени, ослабляя с помощью модулятора света входной сигнал в каждом такте в 2^{i-1} раз, где i — номер такта. Недостаток этого АЦП КТ — кодирование РС кодом Грея, который неудобен для использования в ЦОЭП, работающих в основном в двоичной системе счисления. Для получения разрядных срезов в двоичном коде необходимо использовать дополнительно фазосдвигающие пластинки, что накладывает более жесткие ограничения на точность изготовления и юстировку элементов системы.

Еще один оптоэлектронный АЦП КТ без обратной связи [20] содержит n блоков формирования РС. Его структурная схема представлена на рис. 4, *a*, где входное изображение X_1 поступает на устройство вычитания (УВ), которое выполнено на ОУТ с порогом (П) и линейной передаточной характеристикой (рис. 4, *b*). На выходе УВ i -го разряда получаем изображение S_i :

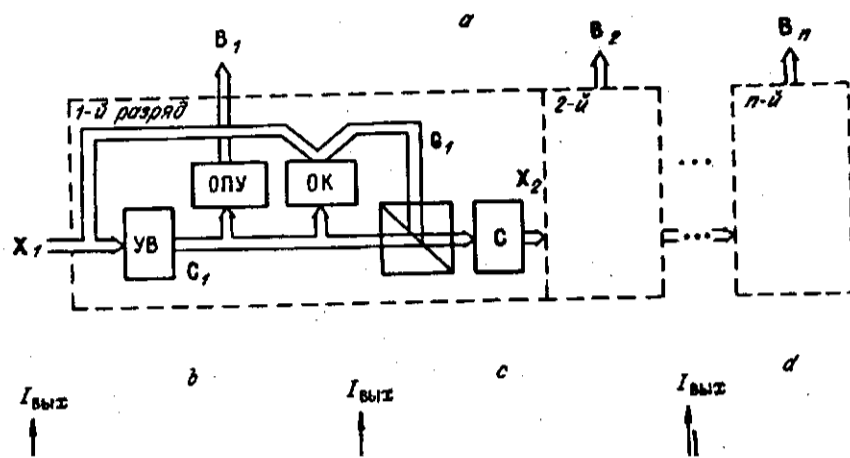


Рис. 4

$$\{c_{k,i}\}_i = \begin{cases} \{x_{k,i}\}_i - \Pi_i & \text{при } \{x_{k,i}\}_i \geq \Pi_i; \\ 0 & \text{при } \{x_{k,i}\}_i < \Pi_i. \end{cases}$$

Пороговые значения устройств вычитания в различных разрядах соотносятся как веса соответствующих разрядов. Для двоичного кода

$$\Pi_1 = x_m/2, \dots, \Pi_i = \Pi_{i-1}/2, \dots, (i = 2, \dots, n),$$

где x_m — максимальное значение интенсивности во входном изображении.

Изображение C_i после прохождения через оптическое пороговое устройство с характеристикой, представленной на рис. 4, с, является выходным РС и поступает на управляющий вход оптического коммутатора (ОК) на ОУТ с характеристикой, изображенной на рис. 4, d, на информационном входе которого присутствует изображение X_i , вследствие чего на выходе ОК — изображение G_i :

$$\{g_{k,i}\}_i = \begin{cases} 0 & \text{при } \{x_{k,i}\}_i > \Pi_i; \\ \{x_{k,i}\}_i & \text{при } \{x_{k,i}\}_i \leq \Pi_i, \end{cases}$$

а сигнал на выходе суммирующего ОУТ (С) (с характеристикой в соответствии с рис. 4, b при $\Pi = 0$) $X_{i+1} = C_i \cup G_i$ является входным для блока формирования следующего разряда.

В этом АЦП КТ поразрядного кодирования устройства вычитания в разных разрядах имеют разные пороги срабатывания Π_i , что нерационально. Если выбрать коэффициент усиления суммирующего ОУТ в каждом разряде не 1, как в [20], а 2, то можно будет использовать в качестве устройства вычитания ОУТ с одинаковыми порогами $\Pi = x_m/2$. Недостатками данного устройства являются большие аппаратные затраты и широкая номенклатура ОУТ.

Авторами предложено три способа поразрядного АЦ-преобразования [14, 21, 22] изображений, которые названы соответственно способами «вычерпывания», «дополнения» и «симметрирования». Математический способ «вычерпывания» описан в [23], а реализация по разомкнутой схеме [20] показана на

рис. 4, а. Сущность работы АЦП КТ «вычерпывания» с ОС [21] (рис. 5, а) состоит в запоминании входного изображения X в устройстве для аналогового запоминания и вычитания изображений (УАЗВИ), а затем в каждом i -м ($i = 1, \dots, n$) такте: 1) в пороговой обработке изображения из УАЗВИ на ОПУ с РП по порогу $\Pi_i = x_m/2^i$ (для двоичного кода), в результате чего формируется i -й РС B_i ; 2) в коррекции запомненного в УАЗВИ изображения путем вычитания из его точек, превысивших порог, величины $x_m/2^i$, задаваемой с помощью оптически управляемого источника бинарных эталонных картин с регулируемым уровнем светлых участков (ИЭК).

Затем цикл повторяется. Регулировка величины управляющего сигнала Y , эталонных уровней ИЭК и режимов УАЗВИ производится от устройства управления (УУ).

АЦП КТ «дополнения» с обратной связью, функциональная схема которого по конфигурации не отличается от схемы на рис. 5, а, содержит, вместо УАЗВИ, устройство для аналогового запоминания и суммирования изображений (УАЗСИ), а ИЭК имеет инверсный выход. Сущность работы АЦП КТ «дополнения» состоит в запоминании входного изображения X в УАЗСИ, а затем в каждом i -м такте ($i = 1, \dots, n$): 1) в пороговой обработке на ОПУ с РП

изображения из УАЗСИ по порогу $\Pi_i = \sum_{j=1}^n (x_m/2^j)$, в результате чего формируется i -й РС B_i ; 2) в коррекции запомненного в УАЗСИ изображения путем добавления к точкам, которые оказались меньше порога, величины $x_m/2^i$, задаваемой с помощью ИЭК.

Затем цикл повторяется.

АЦП КТ «симметрирования», два варианта функциональных схем которого представлены на рис. 5, б, с, содержит следующие основные функциональные узлы: устройство для аналогового запоминания и суммирования (вычитания) изображений (УАЗСВИ); ОПУ с постоянным порогом ($Y = \text{const}$), ИЭК с прямым и инверсным оптическими выходами. Сущность работы АЦП КТ «симметрирования» состоит в запоминании входного изображения в УАЗСВИ, а затем в каждом i -м такте ($i = 1, \dots, n$): 1) в пороговой обработке изображения из УАЗСВИ на ОПУ по порогу $\Pi = x_m/2$, в результате чего формируется i -й РС B_i ; 2) в коррекции запомненного в УАЗСВИ изображения путем добавления к точкам, оказавшимся ниже порога, величины $x_m/2^{i+1}$, задаваемой с помощью ИЭК, и вычитания этой величины из точек, превысивших порог.

Затем цикл повторяется.

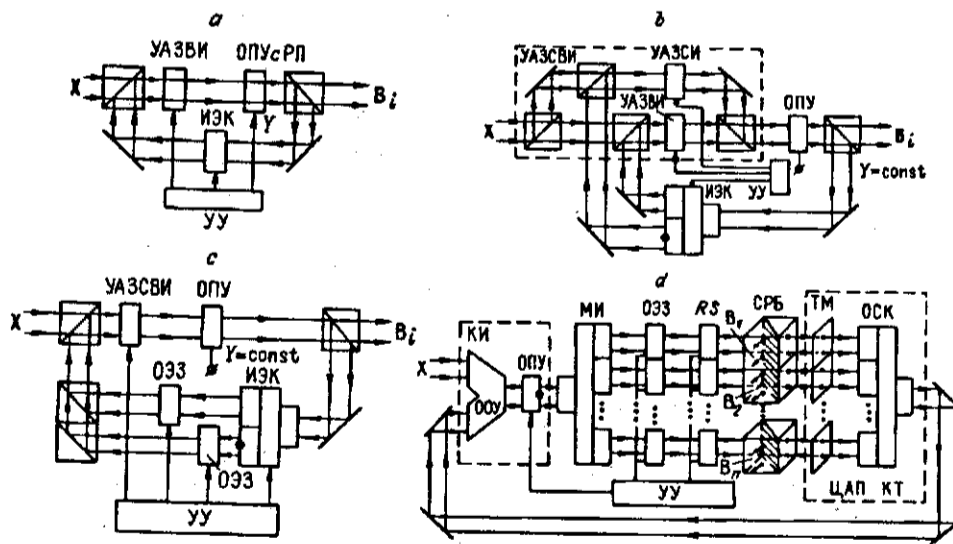


Рис. 5

Преимущество АЦП КТ «симметрирования» заключается в том, что не требуется изменять управляющий сигнал для ОПУ ($Y = \text{const}$), т. е. в качестве последнего можно использовать простейшие ОПУ, однако реализация УАЗСВИ требует дополнительных затрат либо оборудования (см. рис. 5, б), либо времени (см. рис. 5, с). Так, на рис. 5, б показана реализация УАЗСВИ на двух ПВМС, первый из которых работает в режиме УАЗСИ, а второй — в режиме УАЗВИ, их выходные сигналы объединяются на светообъединителе и поступают на вход оптического порогового устройства. УАЗСВИ можно реализовать и на одном ПВМС (см. рис. 5, с), разделив во времени операции суммирования и вычитания, однако это приводит к снижению быстродействия. В обоих случаях необходимо, чтобы ИЭК имел два выхода — прямой и инверсный, что легко реализовать при считывании с ПВМС, работающем на эффекте поворота плоскости поляризации в скрещенных поляризаторах (прямой выход) и в параллельных (инверсный выход).

В предложенных АЦП КТ с ОС используется аналоговая обработка изображений в УАЗВИ, УАЗСИ, УАЗСВИ. УАЗВИ можно реализовать, например, на ПВМС ПРОМ, «Фототитус» или ЖК ПВМС с двухчастотным питанием и локально управляемым светом стиранием [8]. УАЗСИ реализуется на технологически и функционально более простых ПВМС, например ЖК [8], характеризующихся в отличие от ПВМС ПРОМ и «Фототитус» значительно меньшими напряжениями питания и одинаковыми длинами волн света для входного и выходного изображений, что весьма важно для схем с ОС.

Поразрядные АЦП КТ с ОС «вычерпывания», «дополнения» и «симметрирования» не уступают по быстродействию устройству [20], но значительно проще его, обладают возможностью контроля состояния (при анализе изображения в УАЗВИ (УАЗСИ или УАЗСВИ) после n тактов преобразования), а также имеют более широкие функциональные возможности за счет способности аналого-цифрового преобразования с любой функциональной зависимостью и в любой позиционный код.

В связи с разработкой в последнее время оптического операционного усилителя (ОУ) для изображений на ПНОЭС [24] появилась возможность реализовать АЦП КТ поразрядного кодирования с обратной связью согласно структурной схеме на рис. 5, d, содержащей компаратор изображений (КИ), реализованный на ОУ и ОПУ (характеристика по рис. 4, d), мультипликатор изображений, n ОЭЗ, n двумерных RS-триггеров, каждый из которых имеет оптический картинный R-вход, электрический (общий для всего массива) S-вход и картинный оптический выход [25]; светорасщепительный блок (СРБ), n теневых масок (ТМ) с коэффициентами пропускания, выбранными в соответствии с весами разрядов используемого кода, и оптический сумматор картин (ОСК). Совокупность n ТМ и ОСК представляет собой ЦАП КТ. Входное изображение X подается на первый картинный вход компаратора изображений, а сигнал от устройства управления устанавливает 1-й картинный RS-триггер в единичное состояние. С его выхода равномерная по уровню картина поступает через СРБ, ЦАП и отражатели на второй картинный вход компаратора изображений, имея уровень $x_1 = x_m/2$. На выходе оптического операционного усилителя излучают те точки, уровень которых больше x_1 , а на выходе оптического порогового устройства — те точки, уровень которых меньше x_1 (картина инвертируется). Эти оптические сигналы, пройдя через открытый ОЭЗ₁ на картинный R-вход 1-го RS-триггера, сбросят в нуль соответствующие им точки изображения, в результате чего на выходе RS-триггера будет старший РС B_1 . ОПУ должно иметь память и может быть реализовано тоже в виде картинного RS-триггера с инверсным выходом. В следующем такте 2-й триггер возбуждается сигналом от устройства управления по S-входу, ОПУ сбрасывается, ОЭЗ₂ открывается, и на второй вход компаратора изображений поступает сумма изображений B_1 с уровнем x_1 и плоского светового потока от 2-го RS-триггера с уровнем $x_2 = x_m/4$. Эта сумма сравнивается с входным изображением, в результате чего получаем картину, сбрасывающую в нуль нужные точки 2-го RS-триггера, на выходе которого формируется второй разрядный срез B_2 , и т. д. в течение n тактов. Для прямого

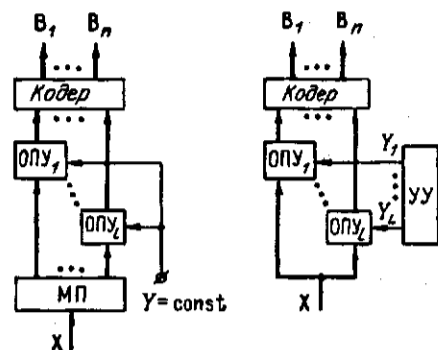


Рис. 6

содержит многоканальный масштабный преобразователь (МП), $(2^n - 1)$ ОПУ с $Y = \text{const}$ и кодер. В АЦП КТ по такой структуре [26, 27] многоканальный МП реализован в виде отрезков волоконно-оптических жгутов различной длины, создающих ослабление входного изображения с требуемыми коэффициентами, а оптические пороговые устройства выполнены на матрицах пороговых фотоприемников с порогом, равным одной градации уровня входного сигнала.

Непосредственная реализация схемы по рис. 6, б для изображений не описана в литературе, но ее легко синтезировать на различных ОПУ. Недостатком АЦП считывания являются большие аппаратные затраты, а также необходимость кодера для преобразования $2^n - 1$ РС в унитарном коде с выходов ОПУ в n РС в двоичном коде. Такой кодер (шифратор) может быть построен на логических элементах картинного типа (ЛЭ КТ) по известным выражениям. Элементная база ЛЭ КТ та же, что и для АЦП КТ, т. е. всевозможные оптические пороговые устройства на ПНОЭС, ПДОЭС и ОБЭ.

При различении 2^n градаций уровня АЦП КТ считывания должно иметь $2^n - 1$ ОПУ. Однако в [12] показано, что использование в качестве ОПУ ЖК ОУТ с периодической функцией фотоотклика позволяет реализовать АЦП КТ считывания с n ОПУ (совмещены на одном ЖК ОУТ) и получать разрядные срезы не в унитарном, а в двоичном коде Грея. Для этого при получении 3-разрядного кода Грея перед ЖК ОУТ ставят маску с периодически чередующимися полосами, ослабляющими входное изображение соответственно в 1, 2 и 4 раза, а выходной сигнал ЖК ОУТ подают на матрицу пороговых фотоприемников, на которой и получают все три разрядных среза одновременно.

Достигнутый уровень и перспективы. Для обеспечения конкурентоспособности со сканирующими [5] и построчными [6] АЦП изображений АЦП КТ должны иметь производительность $> 10^9$ бит/с при темпе выдачи разрядных срезов, существенно превышающем 50 кадров/с. Производительность АЦП КТ $P = M \times N \times n/T$, где $M \times N$ — размер матрицы отсчетов; n — количество достоверных РС в двоичном коде; T — время преобразования. Рассмотрим возможности достижения такой производительности и темпа ввода для некоторых структур АЦП КТ при реализации их на различных видах элементной базы.

Из всех структур АЦП КТ развертывающего преобразования наиболее перспективна схема на рис. 3, а, так как она реализуема на любом из трех видов элементной базы и имеет широкие функциональные возможности (преобразование с любой функциональной зависимостью в любой код, пригодность для логической обработки изображений [14, 16]). При использовании ПНОЭС, например ЖК ОУТ [6], достигаются следующие показатели: $M \times N = 1000 \times 1000$ с шагом пространственной дискретизации ~ 50 мкм, $T = 2^n \tau$, где $\tau \sim 1$ мс — время записи изображения в ЖК ОУТ. Количество достоверных

двоичного кода коэффициент пропускания i -й ТМ $k_i = 1/2^{i-1}$. Тогда амплитуда единичных оптических сигналов на картинном выходе каждого RS-триггера $x_T = x_m/(2k_0)$, где k_0 — коэффициент передачи оптического тракта, состоящего из светорасщепительного блока, ОСК и отражателей (см. рис. 5, d), $0 < k_0 < 1$.

АЦП КТ считывания. Как известно из теории измерений, АЦП считывания можно построить по двум основным избыточным структурам (рис. 6, а, б: жирная линия — оптические сигналы, тонкая — электрические). Схема на рис. 6, а

РС ограничено $n = 3$, так как разброс передаточной характеристики ОУТ по апертуре (геометрический шум) 10—15 % [8], и поэтому количество различных градаций интенсивности не более 8. При этом $P \sim 3,75 \cdot 10^8$ бит/с и темп ввода $PCv = 1/T \approx 62$ кадров/с, т. е. АЦП КТ на ПНОЭС пока находятся на уровне традиционных АЦП изображений. Для увеличения P и v необходимо повышать быстродействие ЖК ОУТ и уменьшать геометрический шум хотя бы до 1 %, что позволит различать до 100 градаций интенсивности.

В [9] предложены различные схемотехнические решения для реализации структуры по рис. 3, а на ПДОЭС и проработаны конструктивно-технологические аспекты их изготовления. Показано, что по гибридной технологии ИС можно изготавливать АЦП КТ в виде матрицы, составленной из стопы «линеек», с $M \times N \approx 32 \times 32$ при шаге пространственной дискретизации ~ 2 мм; $T < 10$ мкс, $n \geq 4$. При этом $P \sim 4 \cdot 10^8$ бит/с и $v \sim 10^5$ кадров/с.

Для повышения P и v необходимо увеличить количество отсчетов, разрешающую способность ПДОЭС и равномерность параметров ячеек. Один из путей — использование интегральной технологии, а именно объединение технологии изготовления фотоприемников на прозрачной подложке (например, кремний на сапфире [28]) и технологии многослойных ИС [29]. Это позволит увеличить количество отсчетов до 500×500 при шаге дискретизации не хуже 100 мкм, сохранив остальные параметры, и достичь $P \sim 10^{11}$ бит/с.

АЦП КТ (см. рис. 3, а) можно реализовать и на оптически бистабильных элементах, например на SEED-приборах или матрицах эталонов Фабри — Перо [13], характеризующихся плотностью размещения элементов до 10^7 см⁻² и временем переключения до 10^{-12} с. Наилучшие результаты получены в SEED-приборах [13], работающих в режиме оптических RS-триггеров. Созданы матрицы 32×64 с площадью элемента 100 мкм², характеризующиеся энергией переключения ~ 1 пДж и временем переключения ~ 1 нс. Для АЦП КТ на таких матрицах при $n = 4$ будет достигнута $P \sim 8 \cdot 10^{11}$ бит/с и $v \sim 6 \cdot 10^7$ кадров/с, однако для переключения каждой матрицы понадобятся лазеры (одиночные или матрицы) с суммарной оптической мощностью ~ 2 Вт (1 мВт/элемент). Создание мощных одиночных лазеров со стабильной амплитудой в импульсе, а также матриц полупроводниковых лазеров с большим количеством элементов и малым разбросом их параметров является сложной задачей.

Большие значения геометрического шума ОУТ на сегодняшний день делают неэффективными АЦП КТ поразрядного кодирования с обратной связью, в которых происходит накопление погрешности от такта к такту. Разброс параметров по апертуре снижает количество различимых градаций и в АЦП КТ поразрядного кодирования без ОС, а также в АЦП КТ считывания.

Заключение. В результате рассмотрения известных вариантов реализации АЦП КТ [11, 12, 19, 20, 26] было выявлено, что во всех предшествующих исследованиях структуры АЦП КТ и алгоритмы их работы разрабатывались под имеющуюся элементную базу, т. е. по принципу элементы — структура. Такой принцип исключает системный подход к разработке АЦП КТ, хотя на первом этапе он был необходим и сыграл свою положительную роль. В данной статье проведена систематизация процесса АЦ-преобразования изображений, алгоритмов их работы, структур и элементных баз. При этом использовался подход структуры — элементы, который позволил на основе формального описания процесса двумерного АЦ-преобразования и составляющих его основных операций проанализировать известные и синтезировать некоторые новые [14—17, 21, 22, 27] алгоритмы и структуры АЦП КТ и принципы их реализации.

В целом проведенные исследования показали реальность создания АЦП КТ с $P \sim 10^9$ — 10^{12} бит/с и $v \sim 10^2$ — 10^7 кадров/с, пригодных к использованию в ЦОЭП, но для этого необходимо решать следующие задачи:

1. Совершенствовать параметры имеющихся элементов: повышать быстродействие у ПНОЭС, увеличивать количество ячеек в матрице и разрешающую способность у ПДОЭС; уменьшать управляющую оптическую мощность у ОБЭ; снизить геометрический шум.

2. Синтезировать новые структуры самокорректирующихся и самонастраивающихся АЦП КТ, не критичных к геометрическому шуму элементной базы, и искать новые физические эффекты и явления для элементной базы, отвечающей комплексу требований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Твердохлеб П. Е. Матричный оптико-электронный процессор // Автометрия.—1981.— № 3.
2. Денисов В. М., Матвеев Ю. Н., Очин Е. Ф. Структура цифрового оптоэлектронного процессора многоуровневых изображений по пространственно-непрерывным разрядным срезам // Электрон. моделирование.—1984.— № 6.
3. Красиленко В. Г., Заболотная Н. И. Матричный линейно-алгебраический процессор обработки изображений // Оптические и оптико-электронные средства обработки информации (Сб. науч. тр.).—Л.: ФТИ, 1989.
4. Акаев А. А., Дордоев С. З. Оптоэлектронная цифровая вычислительная система в остаточной арифметике для обработки изображений // Автометрия.—1989.— № 3.
5. Бондаренко Ю. В., Будцев В. Я., Касперович А. Н. Исследование высокочувствительной системы регистрации двумерных изображений на основе супервидикона ЛИ-702 // Автометрия.—1988.— № 2.
6. Моисеев В. В., Наймарк С. И. Прием полутонового оптического изображения пороговым многоэлементным фотодиодным преобразователем // Автометрия.—1987.— № 6.
7. Ванюшев В. В., Вьюкина Н. Н., Гибии И. С. и др. Архитектура информационной системы на основе голографической памяти большой емкости // Автометрия.—1989.— № 3.
8. Пространственные модуляторы света /А. А. Васильев, Д. Касасент, И. Н. Компанец, А. В. Парфенов.—М.: Радио и связь, 1987.
9. Разработка теории и принципов построения универсальных устройств логической обработки изображений: (Заключительный отчет) /ВНТИЦ.—№ ГР 01900020099; Инв. № 02910006360.—Винница, 1990.
10. Гиббс Х. Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света: Пер. с англ.—М.: Мир, 1988.
11. А. с. 1029120 СССР. Аналого-цифровой преобразователь изображений /В. А. Смирнов, Ю. Г. Беров.—Опубл. 15.07.83, Бюл. № 26.
12. Применение методов фурье-оптики /Под ред. Г. Старка: Пер. с англ. под ред. И. Н. Компанца.—М.: Радио и связь, 1988.
13. Федоров В. Б. Оптические логические элементы для высокопроизводительных оптических процессоров // Квантовая электрон.—1990.— № 12.
14. Разработка теории и принципов построения универсальных устройств логической обработки изображений: (Заключительный отчет) /ВНТИЦ.—№ ГР 01890081153; Инв. № 02900006127.—Винница, 1989.
15. А. с. 1451769 СССР. Способ записи изображений /В. П. Кожемяко, В. Г. Красиленко, Л. И. Тимченко и др.—Опубл. 15.01.89, Бюл. № 2.
16. Положительное решение на заявку 4719317/25. Аналого-цифровой преобразователь изображений /В. П. Кожемяко, В. Г. Красиленко, О. К. Колесницкий, Н. И. Заболотная.—Принято 26.07.90.
17. Положительное решение на заявку 4695883/24. Способ и устройство для записи и хранения изображений /В. Г. Красиленко, Н. И. Заболотная, О. К. Колесницкий, С. Б. Одиноков.—Принято 27.04.90.
18. Кнаб О. Д. Биспин — новый тип полупроводниковых приборов // Электрон. пром-сть.—1989.— № 8.
19. Оптическая голография: Пер. с англ. /Под ред. Г. Колфилда.—М.: Мир, 1982.—Т. 1, 2.
20. А. с. 742855 СССР. Многоканальный аналого-цифровой преобразователь /С. А. Попов, В. Б. Смолков, С. К. Ли и др.—Опубл. 25.06.80, Бюл. № 23.
21. Положительное решение на заявку 4755960/25. Аналого-цифровой преобразователь изображений /В. П. Кожемяко, В. Г. Красиленко, О. К. Колесницкий, А. Ф. Рева.—Принято 28.01.91.
22. Красиленко В. Г., Колесницкий О. К. Способы и устройства параллельного поразрядного АЦП-преобразования изображений // II Всесоюз. конф. по оптической обработке информации: Тез. докл.—Фрунзе: Илим, 1990.
23. Волчков В. Г., Компанец И. Н., Ли С. К. и др. Параллельные АЦП-преобразования и вычисления в оптоэлектронных устройствах // Автометрия.—1979.— № 1.

24. Васильев А. А., Одинокоев С. Б., Парфенов А. В., Якимович А. П. Оптический операционный усилитель для обработки изображений // II Всесоюз. конф. по оптической обработке информации: Тез. докл.—Фрунзе: Илим, 1990.
25. А. с. 1444889 СССР. Бистабильное устройство для хранения и обработки изображений / В. Н. Дубчак, В. Г. Красиленко, Н. Г. Яцковская.—Опубл. 15.12.88, Бюл. № 46.
26. А. с. 1527670 СССР. Способ записи изображения / В. П. Кожемяко, В. А. Подорожнюк, С. Н. Белан и др.—Опубл. 07.12.89, Бюл. № 45.
27. Положительное решение на заявку 4498330/24. Устройство для обработки изображений / В. П. Кожемяко, В. Г. Красиленко, В. А. Подорожнюк и др.—Принято 19.04.89.
28. Радиоэлектроника за рубежом. Обзоры.—М.: НИИЭИР, 1989.—Вып. 6(38).
29. Баранов Ю. Л., Круглов И. И. Полупроводниковые приборы со структурой кремний на изоляторе: состояние и перспективы изготовления.—М.: ЦНИИ «Электроника», 1989.

Поступила в редакцию 18 сентября 1990 г.

УДК 681.327 : 681.7

А. А. Вербовецкий, И. А. Шилов

(Москва)

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕЖПРОЦЕССОРНОЙ СВЯЗИ И КОММУТАЦИИ ДЛЯ СУПЕРЭВМ

Предложены структурные, схематехнические и конструктивные решения построения пассивных систем межпроцессорной связи и коммутации (СМСК) на основе волоконной оптики для суперЭВМ. Рассмотрены варианты как одноволновых систем, так и систем со спектральным уплотнением информации, предназначенных для коммутации большого числа центральных процессоров (ЦП) и запоминающих устройств (ЗУ). Произведена оценка основного параметра таких систем, которая, в частности, показывает, что СМСК со спектральным уплотнением информации может одновременно и независимо коммутировать по принципу «каждый с каждым» порядка 10^4 ЦП с 10^4 ЗУ при скорости передачи данных порядка 1000 Мбит/с. Приведена конструкция построения компактной одноволновой СМСК.

Введение. Связь и коммутация — области оптоэлектроники, которые наиболее перспективны и близки к внедрению в суперЭВМ, так как их реализация в наименьшей степени требует новых технологий. В частности, обе эти области почти полностью могут быть обеспечены современным уровнем технологии оптических волокон, излучателей, приемников, а также существующей микронной технологией.

Действительно, уже в настоящее время в современных ЭВМ протяженные внешние связи выполняются в основном волоконно-оптическими. Однако длина связи для ЭВМ является величиной относительной, и для суперЭВМ ее мерой может служить такт синхронизации. При такте ~ 1 нс связи длиной ~ 2 м (задержка ~ 10 нс) уже можно считать большими и рассматривать возможность применения оптики.

Еще одна предпосылка использования оптики при построении систем связи и коммутации (ССК) внутри ЭВМ — возможность создания высокоплотного многоконтактного оптического разъема. Действительно, в настоящее время существуют определенные трудности в реализации электрического многоконтактного (~ 1000) СВЧ-разъема с высокой плотностью контактов $\sim 1\text{мм}^{-2}$ (современный уровень $\sim 0,1\text{мм}^{-2}$) для ячеек (модулей) ЭВМ.

Вопросам возможности построения волоконно-оптических многоканальных коммутаторов посвящен ряд работ [1—7]. Однако в большинстве из них для построения таких коммутаторов используются матрицы активных опто-