

07;12
©1995 г.

ОПТИЧЕСКИЕ МНОГОКАСКАДНЫЕ КОММУТАТОРЫ ДВУМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.Б.Федоров

Вычислительный центр коллективного пользования РАН,
117334, Москва, Россия
(Поступило в Редакцию 1 июля 1994 г.)

Показано, как с использованием различных типов блоков оптических связей, выполненных на основе поляризационно-чувствительных элементов, матриц индивидуально управляемых модуляторов плоскости поляризации света и проекционной оптики, возможно создание компактных высокопроизводительных многокаскадных коммутаторов изображений. Анализируется влияние оптической утечки сигналов в ортогональную поляризацию на контрастность передаваемых через коммутатор изображений. Оцениваются основные параметры таких коммутаторов.

Введение

В настоящее время все большее значение приобретают коммутирующие устройства (коммутаторы), осуществляющие обмен информацией между многими портами (каналами) при произвольной картине их взаимных соединений. Это объясняется важной ролью, которую играют такие устройства в высокопроизводительных телекоммуникационных системах, вычислительных устройствах с массовым параллелизмом, системах обработки сигналов.

В последние годы опубликовано много работ, посвященных созданию коммутаторов, в которых для передачи сигналов используются оптические связи в свободном пространстве. Принципиальное преимущество таких связей перед электрическими, вытекающее из фундаментального различия фотона и электрона, состоит в возможности передачи информации в виде двумерных изображений (или параллельным двоичным кодом) с использованием двух ортогонально поляри-

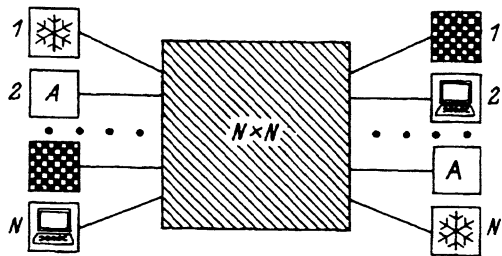


Рис. 1. Общая схема коммутатора изображений.

зованных p - и s -компонент (рис. 1). Это позволяет значительно повысить производительность коммутатора за счет большой пропускной способности каналов связи. Для коммутаторов большого размера наилучшим образом подходят многокаскадные соединительные сети, содержащие $O(N \log_2 N)$ двоичных переключателей. Однако практическая реализация таких коммутаторов с передачей по соединяемым парам каналов двумерных изображений требует решения нескольких проблем. Одна из них состоит в построении такой оптической системы, которая обеспечивает равенство длин оптических путей световых пучков при любой картине взаимных соединений входных и выходных портов для p - и s -поляризованных компонент и имеет числовую апертуру, достаточную для передачи по соединяемым каналам изображений с большим числом элементов. Мало исследовано влияние на качество передаваемых изображений оптической утечки сигналов в ортогональную компоненту, обусловленной неидеальностью и несовершенством переключающих и поляризационно-чувствительных элементов. Такая утечка в отличие от ослабления сигналов из-за поглощения света приводит к принципиальным ограничениям возможных параметров оптических коммутаторов.

В ряде работ [1-4] предложены оптические коммутирующие устройства с пространственными оптическими связями, которые могут быть использованы для передачи изображений. Однако коммутатор [3] содержит большое число двоичных переключателей (равное квадрату числа входных или выходных портов) и имеет сложную оптическую систему. Поэтому его практическая разработка целесообразна только в случае небольшого числа портов. Оптическая система коммутатора, рассматриваемого в [1,2,4] основана на использовании модифицированного интерферометра Майкельсона с решеткой оборачивающих призм. Недостаток такой системы состоит в виньетировании выходных изображений. Кроме того, коммутатор имеет достаточно громоздкую и "неудобную" (оптические входы и выходы размещаются в ортогональных плоскостях) конструкцию.

В данной работе предлагается несколько вариантов построения на основе поляризационно-чувствительных элементов компактных многокаскадных оптических коммутаторов для переключения двумерных изображений между $2N^2$ входными и $2N^2$ выходными каналами. Анализируется влияние перекрестных помех, возникающих из-за утечки оптических сигналов в ортогональную компоненту, на контрастность и возможный разброс мощности информационных сигналов в выходном изображении. Оцениваются основные параметры таких коммутаторов.

Многокаскадный неблокирующий коммутатор с N входными и N выходными портами (размера $N \times N$) состоит из $K = \log_2 N$ последовательно расположенных каскадов двоичных переключателей, соединенных между собой линиями связи с топологией соединительной сети Бэннана. На рис. 2 приведена схема многокаскадного неблокирующего оптоэлектронного коммутатора. В коммутаторе в качестве двоичных переключателей используются управляемые оптические модуляторы вращающие во включенном состоянии на 90° плоскость поляризации p - и s -компонент. Каскады линий связи, показанные на рис. 2 закрашенными прямоугольниками, обеспечивают постоянные оптические соединения для p - и s -поляризованных световых пучков. Поскольку по N входным и N выходным каналам коммутатора информация может передаваться двумя ортогональными компонентами, то размер такого неблокирующего оптоэлектронного коммутатора равен $2N \times 2N$ и общее число модуляторов плоскости поляризации (МПП) такое же, как и число двоичных переключателей в электронном коммутаторе.

Три типа блоков с M входными и M выходными оптическими каналами связей показаны на рис. 3. Основными элементами этих блоков являются интерференционные поляризационно-чувствительные кубики (ПЧК) или призмы. Как показали экспериментальные и теоретические исследования [5-7], при определенных толщинах слоев поляризующего диэлектрического покрытия угловая апертура ПЧК может достигать $\theta = \pm 10^\circ$ для p - и s -поляризованных компонент при хороших оптических характеристиках по светопропусканию, коэффициенту светоделения и фактору деполаризации. Теоретически [8] из-за сферичности волновых фронтов при углах падения $\theta < 10^\circ$ степень деполаризации γ_p не превышает величины $\gamma_p \approx 0.25 \sin^4 \theta \approx 2 \cdot 10^4$. При таких же углах падения светового пучка эта величина сравнима с предельной величиной оптической утечки γ_m в ортогональную поляризацию для идеального МПП [8] $\gamma_m \approx \sin^2(\pi \sin^2 \theta / n_m^2) \approx 2.5 \cdot 10^4$, где $n_m = 1.5$ — усредненный показатель преломления обыкновенного и необыкновенного лучей в МПП.

Если в блоке A угол призмы α удовлетворяет условию

$$\cos \alpha = 2^{-0.5} (1 + 1/8n^2)^{0.5} + 1/4 \approx (1/2)^{0.5} + 1.4n, \quad (1)$$

где n — показатель преломления призмы, то одновременные входные и выходные каналы располагаются на оптической оси, параллельной гипотенузной грани призмы.

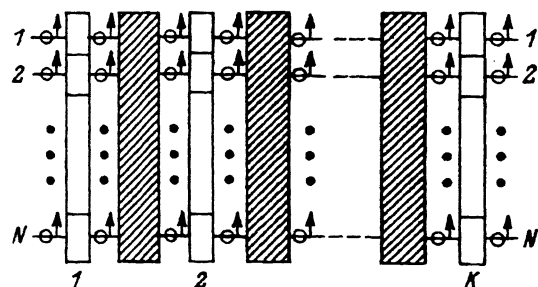


Рис. 2. Структура K -каскадного коммутатора размера $N \times N$ на основе поляризационно-чувствительных элементов.

Символами \uparrow и \circ обозначены p - и s -поляризованные компоненты света.

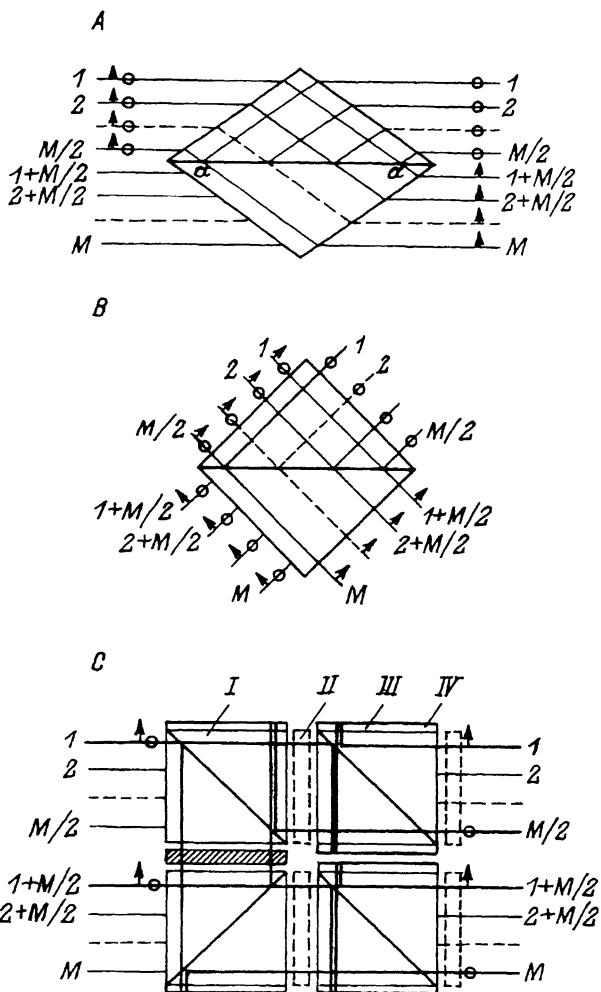


Рис. 3. Три типа блоков оптических связей между M -входными и M -выходными каналами, выполненные на основе поляризационно-чувствительной призмы A , поляризационно-чувствительного кубика B и четырех поляризационно-чувствительных кубиков C :

I — поляризационно-чувствительный кубик, II и III — соответственно полу- и четверть-волновые пластинки, IV — отражающее зеркало.

Для $n = 1.73$ угол $\alpha = 30^\circ$, при этом угол (90°) равен углу Брюстера. В блоке C полуволновые пластины, показанные на рис. 3 штриховыми линиями, могут отсутствовать, если установленные на выходах ПЧК развернуты на 90° вокруг горизонтальной оси^[9,10]. В блоках A и B p -поляризованные световые пучки реализуют между входами и выходами соединение типа “бабочка” (рис. 4, а), а s -поляризованные световые пучки — соединение типа “кроссовер” между портами $1, 2, \dots, M/2$ и портами $1 + M/2, 2 + M/2, \dots, M$. В блоке C p -поляризованные световые пучки соединяют одноименные каналы (рис. 4, б), а s -поляризованные световые пучки реализуют соединение типа “кроссовер” между M -входами и M -выходами. Как доказано в [1],

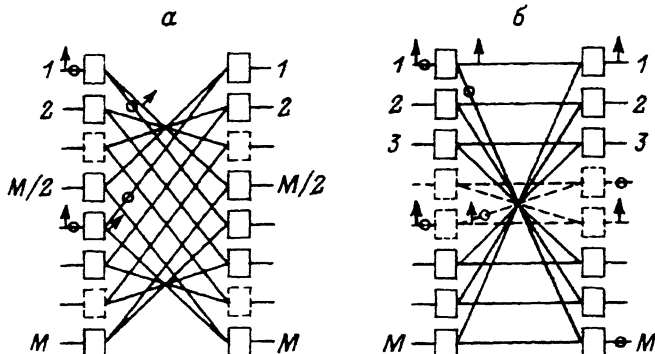


Рис. 4. Схема связей, реализуемых р- и s-поляризованными компонентами света в блоке А или В (а) и блоке С (б).

картины соединений на рис. 4, а, б топологически эквивалентны широко известным межсоединениям Бэняна и совершенной тассовки.

Оптическая система каждого из блоков обеспечивает равные длины оптических путей при всех возможных соединениях пар входных и выходных кавалов и, как это можно показать, позволяет применять оптику с предельной числовой апертурой u каналов связи $u_A = n \sin \alpha / (1 + \cos \alpha) M$, $u_B = n/4$ и $u_C = n/4M$ соответственно для блоков А, В и С. Наибольшая числовая апертура оптических каналов связи может быть достигнута в блоке В. При выполнении соотношения (1) числовая апертура u_A для $n = 1.5-1.8$ примерно в 1.3 раза меньше, чем числовая апертура u_C блока С. Следует отметить, что величина u_C может быть в 4 раза большей (т. е. быть такой же, как и для блока В), если в оптической системе блока С растры линз разместить не только на входах и выходах, но также и перед четвертьволновыми и полуволновыми пластинками, как это сделано в [1].

Архитектура многокаскадных коммутаторов изображений

При построении многокаскадных коммутаторов изображений с картиной междукаскадных соединений, реализуемой блоками А, В, С необходимо использовать блоки с различным числом оптических каналов M . В случае неблокирующих коммутаторов размера $2N \times 2N$ с топологией соединительной сети, эквивалентной сети Бэняна, необходимы блоки с $M = N, N/2, N/4, \dots, 2$ портами. Числовая апертура оптической системы таких коммутаторов ограничивается числовой апертурой блока с наибольшим значением $M = N$.

В качестве примера на рис. 5 приведена схема двумерного оптоэлектронного коммутатора размера 8×8 , в котором используются блоки междукаскадных соединений типа В с $M = 8, 4, 2$. Длины оптических путей в таком коммутаторе выравниваются с помощью компенсаторов, выделенных серым тоном. Размер компенсатора выбирается из условия $l_c = l_p / (n_c - 1)$, где l_c и l_p — длины близлежащих сторон компенсатора и ПЧК соответственно, n_c — показатель преломления компенсатора. Если компенсатор изготовлен из стекла с $n_c = 1.8$ (тяжелый флинт), то $l_c = 1.25l_p$. Использование в коммутаторе зеркал изменяет реализуемую блоком В картину междукаскадных соединений (рис. 5).

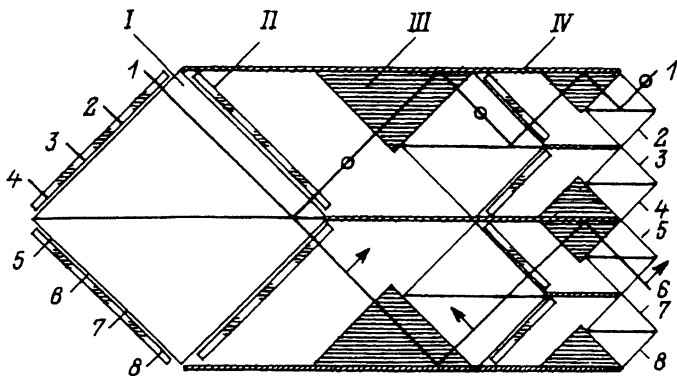


Рис. 5. Оптоэлектронный неблокирующий многокаскадный коммутатор изображений размера 8×8 с блоками оптических связей типа *B*.

I — поляризационно-чувствительный кубик, *II* — управляемые модуляторы плоскости поляризации света, *III* — компенсатор, *IV* — отражающее зеркало.

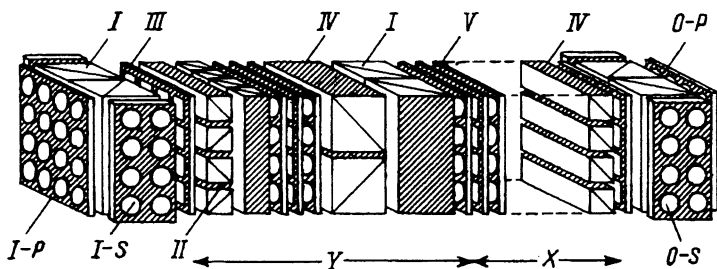


Рис. 6. Оптоэлектронный неблокирующий коммутатор размера 32×32 с пространственными оптическими связями на основе блоков типа *C*.

I — поляризационно-чувствительные параллелепипеды с квадратным основанием; *II* — полуволновая пластинка; *III* — матрица управляемых модуляторов плоскости поляризации света; *IV* — четвертьволновая пластинка с отражающим зеркалом, *V* — матрица объективов; *I-P*, *I-S* — входные, *O-P* — выходные каналы *p*- и *s*-поляризованных изображений.

Однако она остается эквивалентной топологии неблокирующего коммутатора Бэняна.

Компактные объемные оптоэлектронные неблокирующие коммутаторы изображений размера $2N^2 \times 2N^2$, где $N = 2^k$, $k = 1, 2, 3, \dots$, получаются при квадратных матрицах МПП. Пример построения такого коммутатора размера 32×32 ($N = 4$, $K = 5$) с использованием блоков *C* показан на рис. 6. Он состоит из двух развернутых относительно друг друга на 90° вокруг горизонтальной оси идентичных модулей *X* и *Y*, которые обеспечивают маршрутизацию связей в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В каждый из модулей входят две квадратные матрицы, состоящие из 16 индивидуально управляемых МПП. Еще одна такая матрица размещена перед ПЧК, которые разделяют выходные ортогонально поляризованные изображения. Передача изображений осуществляется с использованием растров объективов с одинаковыми фокусными расстояниями. Подобным образом могут быть выполнены коммутаторы изображений с другим числом портов.

Наибольшей простотой обладает конструкция коммутатора с поляризационно-чувствительными призмами. Однако в случае неколлимированных световых пучков из-за больших аббераций, вносимых призмами [11], такие коммутаторы могут использоваться только для передачи изображений с малым числом элементов (пикселей). Коммутаторы с блоками B имеют наибольшую числовую апертуру оптических каналов. В то же время взаимное сопряжение в таких коммутаторах модулей маршрутизации горизонтальных и вертикальных связей в конструктивном отношении представляет собой достаточно сложную задачу. Кроме того, коммутаторы с блоками B не позволяют использовать квадратные матрицы объективов и МПП. Наиболее компактен коммутатор с блоками C . При одинаковых поперечных размерах длины каждого каскада межсоединений в таком коммутаторе примерно в 2 или 1.25 раз меньше, чем в случае использования блоков A и B .

Перекрестные помехи в коммутаторах при передаче изображений

При конструировании коммутаторов большого размера, основанных на использовании поляризационных эффектов, наиболее существенным ограничивающим фактором являются перекрестные помехи между оптическими каналами. Основным источником таких помех служат сигналы ортогональной поляризации, возникающие в модуляторах плоскости поляризации и поляризационно-чувствительных элементах. Эти сигналы проходят в нежелательные каналы и тем самым создают помехи, ухудшающие контрастность передаваемых изображений. Величина контрастности изображений в выходных каналах коммутатора зависит как от картины соединений, так и от вида изображений, передаваемых по другим каналам. Ниже будут сделаны оценки контрастности изображения (отношения сигнал/помеха) в выходных каналах K каскадного коммутатора Бэняна в наихудшем Γ_{\min} , наилучшем Γ_{\max} и наиболее вероятном Γ_p случаях при следующих предположениях.

Все световые сигналы, формирующие изображения, полностью некогерентны, и поэтому сигналы одной поляризации складываются без интерференции.

Уменьшение мощности светового информационного сигнала происходит только из-за утечки части сигнала в ортогональную компоненту в переключающих и соединительных каскадах с сохранением общей световой мощности (рис. 7, a). Общая утечка сигнала в МПП и поляризационных элементах каскада оптических связей γ_b при включенном ($U = U_0$) и γ_c при невключенном ($U = 0$) состояниях МПП одинакова ($\gamma = \gamma_u = \gamma_c$) и не зависит от направления поляризации. Другими факторами, приводящими к изменению мощности световых сигналов, пренебрегается.

Все световые сигналы, формирующие входные изображения, имеют одинаковую мощность. Мощность A_0 p -поляризованных сигналов равна мощности B_0 s -поляризованных сигналов.

Контрастность входных изображений $\Gamma_{in} \gg 1/\gamma$.

Наихудшая контрастность изображения Γ_{\min} на выходе коммутатора соответствует случаю, когда при передаче через пару соединенных входных и выходных оптических каналов изображения, например

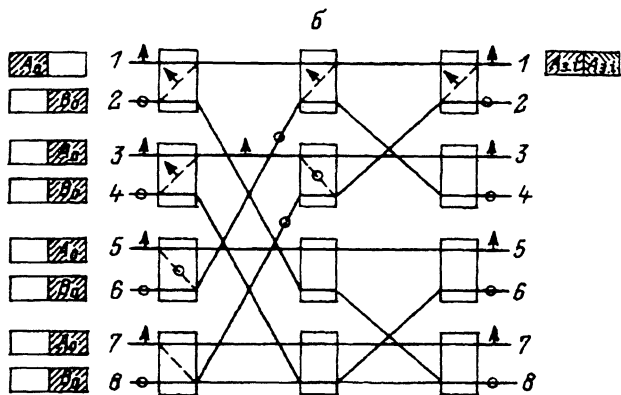
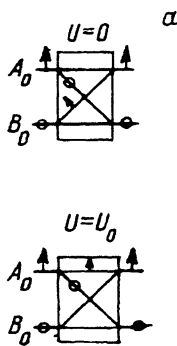


Рис. 7. Эквивалентная схема управляемого модулятора плоскости поляризации света для невключенного $U = 0$ и включенного $U = U_0$ его состояний, учитывающая утечку оптического информационного сигнала в ортогональную поляризацию (а), и пример картины связей в коммутаторе размера 8×8 с топологией соединительной сети Бэняна, который иллюстрирует изменение контрастности изображения в наихудшем случае (б).

а: при $U = 0$ $A_{1,i} = (1 - \gamma_b)A_0$, $A_{1,n} = \gamma_b B_0$, $B_{1,i} = (1 - \gamma_b)B_0$, $B_{1,n} = \gamma_b A_0$; при $U = U_0$ $A_{1,i} = (1 - \gamma_c)B_0$, $B_{1,n} = \gamma_c A_0$, $B_{1,i} = (1 - \gamma_c)A_0$, $B_{1,n} = \gamma_c B_0$.

парафазно-кодированной двоичной единицы "10", где 1 и 0 соответствуют большому и малому уровням мощности светового сигнала, в каждом каскаде к сигналу 0 добавляется перекрестная помеха γA_0 , создаваемая сигналами, передаваемыми через другие каналы коммутатора. Пример такой картины соединений для частного случая коммутирующей сети Бэняна размера 8×8 показан на рис. 7, б. Изображение парафазной двоичной единицы "10" передается между 1-м входом и 1-м выходом. По всем остальным входным каналам передается парафазно-кодированный двоичный нуль "01". При передаче изображения двоичной единицы мощность информационного сигнала на входе второго каскада переключателей $A_{1,i} = (1 - \gamma)A_0$, на входе третьего каскада переключателей $A_{2,i} = (1 - \gamma)^2 A_0$, на 1-м выходе коммутатора $A_{3,i} = (1 - \gamma)^3 A_0$. Мощность перекрестной помехи изменяется соответственно как $A_{1,n} = \gamma B_0$, $A_{2,n} = [\gamma + \gamma(1 - \gamma)]B_0$, $A_{3,n} = [\gamma + \gamma(1 - \gamma) + \gamma(1 - \gamma)^2]B_0 = [1 - (1 - \gamma)^3]B_0$, следовательно, для

Максимальное число каскадов K_{\max} в оптоэлектронном коммутаторе изображений на основе поляризационно-чувствительных элементов.

Γ_{\min}	γ_{\max}			
	0.01	0.02	0.05	0.10
10	9	4	-	-
5	18	9	3	-
3	28	14	5	-
2	40	20	8	4
1	69	35	14	7

наихудшей контрастности изображения Γ_{\min} на выходе K -каскадного коммутатора получим

$$\Gamma_{\min} = A_{K,i}/A_{K,n} = (1 - \gamma)^k / 1 - (1 - \gamma)^k. \quad (2)$$

Выражение (2) можно представить в виде соотношений

$$K_{\max} \log_2(1 - \gamma_{\max}) = \ln(1 + 1/\Gamma_{\min}), \quad (3a)$$

$$\gamma_{\max} K_{\max} = \log_2(1 + 1/\Gamma_{\min}), \quad \gamma_{\max} \ll 1, \quad (3б)$$

$$\gamma_{\max} K_{\max} \Gamma_{\min} \approx 1, \quad \gamma_{\max} \ll 1, \quad \Gamma_{\min} \gg 1, \quad (3в)$$

которые наглядно отображают связь между максимально допустимой утечкой γ_{\max} , максимально возможным числом каскадов K_{\max} и контрастностью изображения Γ_{\min} в наихудшем случае. Значение этих величин для нескольких конкретных примеров приведены в таблице.

Как видно из таблицы, при относительно высоких требованиях к контрастности выходных изображений ($\Gamma_{\min} \geq 10$) создание коммутатора Бэняна достаточно большого размера (например, 512×512) возможно только с использованием поляризационных элементов и МПП с малой общей утечкой $\gamma \leq 0.01$. Снижение в таком коммутаторе контрастности выходных изображений до $\Gamma_{\min} \approx 2$ приводит к увеличению допустимой утечки сигналов до $\gamma \approx 0.05$. При такой же величине утечки сигналов контрастность выходных изображений в коммутаторе Бэняна размера 32×32 возрастает до $\Gamma_{\min} \approx 3$. Данные в последней строке таблицы характеризуют предельные значения K и γ_{\min} , соответствующие $\Gamma_{\min} = 1$. Поскольку в этом случае $(1 - \gamma)^K = 0.5$, то мощность выходного информационного сигнала $A_{K,i} = 0.5A_0$.

Максимальная контрастность Γ_{\max} выходного изображения соответствует случаю, когда в каждой каскаде коммутирующей системы снижение уровня передаваемого информационного сигнала компенсируется сигналами утечки. Для картины соединений, приведенной на рис. 7, б, контрастность изображения на выходе 1 будет максимальной и равной Γ_{in} , если через все входные каналы передается изображение "двоичной единицы" или "двоичного нуля". Непосредственно ясно, что $\Gamma_{\max} = \Gamma_{in}$ и $A_{K,i} = A_0$ будет справедливо и для K каскадного коммутатора Бэняна.

Если считать, что появление в входных изображениях "двоичной единицы" и "двоичного нуля" равновероятно, то при прохождении изображения через коммутатор с нечетным числом каскадов наиболее вероятна ситуация, когда в половине каскадов ортогонально поляризованными компонентами будут передаваться "одноименные" информационные сигналы (например, только "двоичные единицы"), а в остальных каскадах "разноименные" (например, "двоичная единица" и "двоичный ноль"). Для этой ситуации грубую оценку контрастности Γ_p выходного изображения можно сделать с помощью соотношения

$$\Gamma_p \approx (1 - \gamma)^{K/2} / 1 - (1 - \gamma)^{K/2}. \quad (4)$$

Используя (3) и (4), получим

$$\Gamma_p \approx \Gamma_{\min} [1 + (1 + 1/\Gamma_{\min})^{0.5}];$$

$$\Gamma_p \approx 2\Gamma_{\min}(1 + 1/4\Gamma_{\min}), \quad \text{если } \Gamma_{\min} > 3. \quad (5)$$

Из соотношений (5) следует, что $\Gamma_p/\Gamma_{\min} \approx 23$ при $\Gamma_{\min} = 2$ и $\Gamma_p/\Gamma_{\min} \approx 2$ для $\Gamma_{\min} > 3$, т.е. контрастность в наиболее вероятном случае примерно вдвое превышает контрастность наихудшего случая. Этот вывод можно применить и для оценки контрастности выходных изображений в случае коммутаторов Бэняна с четным числом каскадов.

При выводе соотношений (2)–(5) предполагалось, что контрастность входных изображений Γ_{in} существенно превышает величину $1/\gamma$. Учесть влияние Γ_{in} на контрастность выходных изображений можно следующим образом. Контрастность входного изображения определяется как $\Gamma_{\text{in}} = A_0(1)/A_0(0)$, где $A_0(1)$ и $A_0(0)$ — световая мощность, соответствующая логическим уровням сигналов 1 и 0 (то же самое остается справедливым и для s -поляризованных сигналов $B_0(1)$ и $B_0(0)$). Передачу через коммутатор комбинации " $A_0(1), A_0(0)$ " (или комбинации " $A_0(0), A_0(1)$ ") парафазно-кодированного p -поляризованного сигнала можно представить как одновременную передачу по тому же пути двух комбинаций сигналов " $A_0(1), 0$ " и " $0, A_0(0)$ " (или комбинаций " $0, A_0(1)$ " и " $A_0(1), 0$ ") с $A_0(0) = 0$, т.е. с нулевой мощностью уровня логического нуля. Если для каждой из этих двух комбинаций таким же образом, как это делалось при выводе соотношения (2), найти изменение информационного сигнала и сигнала помехи, то с учетом некогерентности всех световых сигналов для контрастности выходного изображения Γ_{out} парафазно-кодированного изображения в наихудшем случае будем иметь

$$\Gamma_{\text{out}} = \frac{A_{K,i}}{A_{K,n}} = \frac{(1 - \gamma)^K A_0(1) + [1 - (1 - \gamma)^K] A_0(0)}{[1 - (1 - \gamma)^K] A_0(1) + [1 - (1 - \gamma)^K] A_0(0)}. \quad (6)$$

Используя соотношения (2) и (6), для Γ_{out} и $A_{K,i}$ получим

$$\Gamma_{\text{out}} = \Gamma_{\min} [1 + (\Gamma_{\min} \Gamma_{\text{in}})^{-1}] / (1 + \Gamma_{\min} \Gamma_{\text{in}}^{-1}), \quad (7)$$

$$A_{K,i} = A_0(1)(1 - \gamma)^K [1 + (\Gamma_{\min} \Gamma_{\text{in}})^{-1}]. \quad (8)$$

Как следует из (7) и (8), в наихудшем случае контрастность изображения Γ_{out} и уровень мощности $A_{K,i}$ сигнала в i -м выходе коммутатора весьма слабо зависят от контрастности входного изображения Γ_{in} и определяются главным образом величиной утечки γ . Если $\Gamma_{in} = \Gamma_{min}$, то $\Gamma_{out}/\Gamma_{min} \cong 0.5$ для $\Gamma_{min}^2 \gg 1$. Если $\Gamma_{in} > \Gamma_{min}$, то различие между Γ_{out} и Γ_{min} уменьшается. Например, для $\Gamma_{in} = 10$ и $\Gamma_{min} = 2$ отношение $\Gamma_{out}/\Gamma_{min} = 0.875$. В предельном случае ($\Gamma_{min} = 1$) контрастность выходного изображения $\Gamma_{out} = 1$, предельные значения K и γ (см. последнюю строку таблицы) не зависят от контрастности входного изображения. Влияние Γ_{in} на величину сигнала $A_{K,i}$ пренебрежимо мало.

В случае наилучшей контрастности изменение уровней парафазнокодированного сигнала из-за утечки части передаваемого сигнала в ортогонально поляризованную компоненту компенсируется утечкой информационных сигналов, передаваемых этой ортогональной компонентой, и входное изображение передается через коммутатор без изменения мощности уровней $A_{K,i} = A_0(1)$, $A_{K,n} = A_0(0)$ и контрастности $\Gamma_{min} = \Gamma_{in}$.

Таким образом, можно сделать вывод, что в K каскадном коммутаторе Бэяна наличие в МПП и поляризационно-чувствительных элементах утечки сигнала в ортогональную компоненту приводит к разбросу в выходном изображении мощности $A_{K,i}$ информационных сигналов от значения A_0 во входном изображении до значения $A_{K,i} \leq 0.5A_0$, определяемого соотношением (8), и контрастности от $\Gamma_{out} = \Gamma_{in}$ до значения, определяемого соотношением (7). Это будет справедливо не только при передаче изображений, в которых каждый бит представлен двумя разделенными в пространстве позициями (парафазный код), но и при передаче каждого бита изображения временным манчестерским кодом. Следует отметить, что оптические потери, связанные с поглощением излучения в МПП и оптических элементах, приведут к уменьшению интенсивности выходного изображения, но картина ее распределения по полю выходного изображения останется (в первом приближении) такой же, как и в коммутаторе без оптических потерь.

Параметры оптоэлектронных коммутаторов изображений

Основными параметрами коммутаторов изображений являются число пикселей или число бит, которые могут быть переданы по соединенным парам оптических каналов, скорость передачи информации по каналам связи, его общая производительность и время реконструкции. Оценка этих параметров будет сделана на примере объемного неблокирующего оптоэлектронного коммутатора размера 128×128 ($N = 8$, $K = 7$) с блоками междукаскадных связей типа C , в котором входные изображения формируются матрицами вертикально излучающих полупроводниковых лазеров [12], а регистрация выходных изображений осуществляется матрицами фотоприемников.

Число пикселей в изображении $m \times m$ определяется размером наименьшего ПЧК и угловой апертурой оптической системы. Если в качестве источников используются одномодовые лазеры с гауссовым распределением, то, как показано в [13], дифракционные потери во многокаскадных дифракционно-ограниченных оптических системах при оптимальном радиусе гауссового пучка не превышают нескольких процентов при концентрации энергии более 95% в формируемых на выходе

пикселах. При такой концентрации световой энергии практически исключаются помехи между соседними пикселями и максимальная плотность пикселей ρ_{\max} в передаваемых по соединяемым каналам изображениях может быть оценена соотношением

$$\rho_{\max} = (2u_A/3\lambda)^2 = (n/6\lambda)^2. \quad (9)$$

При использовании источников излучения с длиной волны $\lambda = 0.9 \mu\text{м}$ и $n = 1.5$ на основании (9) найдем, что расстояния между центрами соседних пикселей равно $\sim 30 \mu\text{м}$. Учитывая неизбежные aberrации оптической системы и требование простоты ее юстировки, а также возможности создания матриц полупроводниковых лазеров и матриц фотоприемников, можно считать, что в практических разработках реально формировать и передавать по оптическим каналам изображения с числом пикселей $m \times m \approx 10^5 - 10^4$ и расстоянием между центрами пикселей $50 - 100 \mu\text{м}$ при размере изображения $L \times L \approx 1 \text{ см}^2$.

Скорость передачи информации по любой соединенной паре оптических каналов V есть произведение числа пикселей в передаваемом изображении и частоты следования изображений F , достижимой при заданной вероятности потери информации. Предельное значение величины V определяется допустимым уровнем непрерывно генерируемой световой мощности P , допустимым уровнем тепловыделения Q_e в матрицах лазеров и Q_r в матрицах фотоприемников и пороговой чувствительностью фотоприемников E . Если апертурные потери и потери из-за поглощения в оптических элементах пренебрежимо малы, то скорость передачи данных $V = QL^2/E$. В матрицах с большим числом фотоприемников E не превышает ~ 10 фДж [14], коэффициент полезного действия полупроводниковых лазеров $\eta \approx 10\%$ [12]. Таким образом, при допустимом тепловыделении $Q_e = 10 \text{ Вт/см}^2$ и $Q_r = 1 \text{ Вт/см}^2$ и размере матриц $L^2 \approx 1 \text{ см}^2$ в случае матриц лазеров с общей мощностью излучения $P = \eta Q \approx 1 \text{ Вт}$ возможна скорость передачи информации $V = 0.1$ Пбит/с. Для поддержания такой скорости должна быть обеспечена частота следования изображений $F = 1 - 10$ Гбит/с с числом пикселей $m \times m \approx 10^5 - 10^4$. При этом пиковая общая производительность коммутатора составит $\dot{W} = NV \approx 10$ Пбит/с.

Время реконструкции t_r есть полное время, необходимое для изменения состояния МПП для реализации новой картины соединения входных и выходных каналов. Для модуляторов на основе смектических жидких кристаллов это время в лучшем случае составляет несколько микросекунд [15]. Для матриц электрооптических МПП на основе кристаллов DKDP с компенсацией тепловых изменений в электрооптических коэффициентах вблизи точки Кюри и электродами специальной формы время t_r может быть уменьшено до 10 нс [16].

Как следует из соотношения (7), чтобы в оптоэлектронном коммутаторе размера 128×128 обеспечить контрастность выходных изображений $\Gamma_{\min} = 3 - 5$, величина световой утечки γ в МПП и поляризационно-чувствительных элементах межкаскадных связей должна быть меньше, чем $\sim 0.04 - 0.025$, что реально для практических разработок [1]. О габаритных размерах оптоэлектронного коммутатора изображений можно судить из конструкции, приведенной на рис. 6. При поперечном сечении $2.5 \times 2.5 \text{ см}$ общая длина коммутатора с 128-входными и 128-выходными оптическими портами равна примерно 15 см .

Выполненный анализ показывает, что на основе пространственных связей, реализованных методами и средствами классической оптики, и матриц модуляторов плоскости поляризации света возможно создание компактных объемных оптоэлектронных многокаскадных коммутаторов изображений. Передачи информации по соединяемым парам оптических каналов параллельным кодом открывает возможность создания оптоэлектронных коммутаторов, которые по общей производительности и плотности информационного потока ($\text{бит}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$) могут на несколько порядков величины превосходить электронные аналоги. Основным фактором, ограничивающим возможное число портов в коммутаторах при передаче изображений, является снижение их контрастности с ростом числа портов вследствие неидеальности и несовершенства поляризационно-чувствительных элементов и управляемых модуляторов плоскости поляризации света. При допустимой контрастности выходных изображений не менее 4–5 реально создание оптоэлектронных неблокирующих коммутаторов с топологией межсоединений, эквивалентной сети Бэняна, с 512-входными и 512-выходными портами.

Список литературы

- [1] *Jahns J., Murdocca M.* // Appl. Opt. 1988. Vol. 27. N 15. P. 3155–3160.
- [2] *McCormick F.B., Tooley F.A.P., Cloonan T.J.* et al. // OSA Proc. on Photonic Switching / Ed. by H. Scott, J.W. Goodman. 1991. Vol. 8. P. 48–55.
- [3] *Fukui M., Kitayama K.* // Appl. Opt. 1992. Vol. 31. N 26. P. 5542–5547.
- [4] *Cloonan T.J., Richard G.W., Lentine A.L.* et al. // Appl. Opt. 1992. Vol. 31. N 35. P. 7471–7492.
- [5] *Муцай В.Н., Федоров В.Б.* // Квантовая электрон. 1980. Т. 7. N 5. С. 1028–1036.
- [6] *Mouchart J., Begel J., E. Duda J.* // Appl. Opt. 1989. Vol. 28. N 14. P. 2848–2853.
- [7] *Pezzaniti J.L., Chipman R.A.* // Optical Computing Topical Meeting. 1991 Technical Digest Series. Washihgton (OSA), 1991. Vol. 6. P. 156–159.
- [8] *Shamir J., Caulfield H.G., Johnson R.B.* // Appl. Opt. 1989. Vol. 28. N 2. P. 311–324.
- [9] *Fyodorov V.B.* // Optical Memory & Neural Networks. 1992. Vol. 1. N 4. P. 303–313.
- [10] *Fyodorov V.B.* // Optical Computing & Processing. 1993. Vol. 3. N 2. P. 123–128.
- [11] *Li Y., Wang T., S. Wang T.* et al. // Appl. Opt. 1992. Vol. 31. N 26. P. 5548–5558.
- [12] *Kasahara K., Numai T., Ogura I.* et al. // NEG Res. Develop. 1992. Vol. 33. N 3. P. 424–436.
- [13] *Федоров В.Б., Митяков В.Г.* // Опт. и спектр. 1984. Т. 73. Вып. 5. С. 878–883.
- [14] *Гусев В.К., Рослова М.Л., Федоров В.Б., Шилов И.А.* // Радиотехника. 1982. N 6. С. 22–30.
- [15] *Eldering C.A., Brinkley S.T., Matloff N.* et al. // Proc. SPIE. 1989. Vol. 1151. P. 72–82.
- [16] *Pilipovich V.A., Polyakov V.I., Konoiko A.I.* // Optical Computing & Processing. 1991. Vol. 1. N 4. P. 333–335.