

Л.И. Акопов

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МОДУЛЯЦИИ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ, ПЕРЕДАЧИ И СБОРА ИНФОРМАЦИИ

Первые исследования и разработки по созданию устройств оптической обработки информации базировались в основном на возможности компактного хранения двоичной информации — единиц и нулей (темных и светлых участков) и параллельности ее считывания. Эти достоинства стали особенно ощутимы с появлением голографической записи, при которой кроме интенсивности фиксировалась информация о фазе излучения, что содействовало повышению плотности записи и надежности хранения информации. Наряду с использованием оптических методов обработки в цифровых вычислительных машинах развитие когерентной оптики и голографии сделало оптические средства незаменимыми при аналоговой обработке данных, в частности двумерных функций-изображений. Оптическое преобразование Фурье, пространственная фильтрация и улучшение качества изображений, а также геометрическое преобразование, способное обеспечить кроме требуемого изменения двумерной функции инвариантность к масштабу при оптическом распознавании образов, содействовали такому представлению [1-9]. При этом операции над двумерными массивами выполняются практически мгновенно,

что и обуславливает высокую производительность когерентных вычислителей. Многоканальность оптических аппаратных средств в сочетании с реализацией соединительных линий световыми пучками, распространяющимися в световодах или в свободном пространстве, а также отсутствие взаимодействия между оптическими сигналами в процессе распространения продолжают стимулировать разработчиков к созданию как когерентных, так и некогерентных оптических процессоров.

Между тем, модуляция поляризации света во всякого рода системах оптической обработки практически сводилась к модуляции амплитуды, а использование свойств поляризованного излучения в функционировании логических элементов носило предварительный характер [10].

Значительный интерес вызывает поляризационная модуляция света в оптических устройствах обработки информации, осуществляющих разложение оптических сигналов по заданной системе функций [11]. Работа этих устройств основана на применении электрически управляемых анизотропных сред, меняющих поляризацию проходящего излучения. Это дает возможность обработки знакопеременных сигналов. Та-

кую же возможность обеспечивают фото-анизотропные среды, изменяющие свои свойства под действием поляризованного излучения [12].

Одной из возможностей использования параллелизма в оптике является метод вычислений на основе символической подстановки. Основное отличие этого метода от традиционной булевой алгебры заключается в том, что распознаются не только значения входных данных, но и их взаимное расположение. В [13] предложено поляризационное кодирование для этого метода, а в [14] описано поляризационно-цветовое кодирование, позволявшее, используя оптический управляемый транспарант и бихроматический источник света, осуществить наряду с разделением каналов выполнение логических и арифметических операций, однако в различных системах счисления.

Использование поляризованного излучения и поляризационных приспособлений можно расширить и на оптическое представление отрицательных значений двумерных функций. Такое представление повышает быстродействие систем выделения характерных признаков изображения или его кодирования, используемого при передаче.

Оптимальное преобразование, осуществляющее переход от статистически связанных элементов изображения к относительно независимым элементам трансформанты (результата преобразования), обеспечивает устранение содержащейся в изображении избыточности, т.е. сжатие информации, а также безопасность передачи - защищенность передаваемой информации от посторонних приемников. Нахождение такого преобразования является известной задачей и называется преобразованием по собственным векторам, или преобразованием Карунена-Лозва (ПКЛ). Хотя вид оптимального преобразования получен в аналитической форме, его применение на практике связано с рядом трудностей. Это препятствует осуществлению аппаратной реализации ПКЛ. В основном, оно используется при машинном моделировании с целью определения предельной эффективности (при заданной среднеквадратичной ошибке) любых других преобразований [15, 16].

Известно несколько других, субоптимальных преобразований, обеспечивающих получение коэффициентов с меньшей корреляцией, чем у элементов исходного изображения, и, соответственно, концентрацией большей части энергии в малом числе коэффициентов. Такие преобразования более просты в реализации, чем оптимальное ПКЛ. Наиболее известным и широко применявшимся до последнего времени является двумерное преобразование Фурье, которое легко реализуется оптическими системами. Однако передача Фурье-образа по каналу связи является весьма сложной задачей, так как фиксируется квадрат модуля амплитуды, а сохранение фазы при прохождении через канал связи в реальном масштабе времени является проблематичным.

В настоящее время широко используются и другие субоптимальные преобразования, такие, как преобразования Уолша-Адамара, Хаара, косинусное и другие, характеризующиеся некоторыми особенностями с точки зрения кодирования изображений. Устойчивость к ошибкам в канале передачи обусловлена процессом усреднения, присущим всем ортогональным спектральным преобразованиям. Величина каждого элемента восстановленного изображения представляет собой взвешенную сумму всех пространственно-частотных составляющих исходного изображения. Поэтому общая потеря четкости, вызванная действием помех в канале передачи на трансформанту, менее заметна, чем дискретные дефекты, приводящие к искажению изображения при передаче его в пространственном представлении. Переход от пространственных аргументов к аргументам трансформант характеризуется "сохранением энергии". Это свойство позволяет передавать лишь ту часть коэффициентов трансформанты, в которой заключена основная энергия изображения, отбросив коэффициенты с малой амплитудой. Как известно, до последнего времени передача трансформант изображений осуществлялась обычно по радиоканалу, а само кодирование осуществлялось с помощью ЭВМ. Задачи оптической связи ставят проблему оптической реализации кодирования изображения с тем, чтобы полученная трансформанта передавалась в оптическом канале связи в реальном масштабе времени [16-19].

Преобразование Уолша-Адамара определяется для двумерного случая следующим образом

$$F(k, l) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} f(x, y) \text{Wal}(k, l, x, y)$$

или в матричной форме:

$$F(k, l) = A \cdot f(x, y) A^T$$

где  $f(x, y)$  - функция или матрица, описывающая изображение;  $\text{Wal}(k, l, x, y)$  - функция Уолша, которые в двумерном случае представляются в виде масок (рис. 1), принимая значение +1 или -1;  $x, y$  - пространственные координаты;  $k, l$  - номера функции Уолша, равные числу смен знака функций;  $A$  - матрица Адамара, элементы которой также +1 или -1 (рис. 2). Так как и функции Уолша и матрицы Адамара являются симметричными, то для обратного преобразования используется тот же алгоритм, что и для прямого [20, 21].

Опишем способы реализации ортогональных преобразований двумерной функции - входного изображения без процесса непосредственного оцифровывания элементов изображения. Разработаны матрицы фотоприемных устройств с пространственно-управляемой чувствительностью [22-26]. Главной особенностью их работы является одновременное очувствление всех элементов, т.е. возможность формирования интегральных признаков изображения непосредственно на фотоприемной панели. Можно формировать как структур-

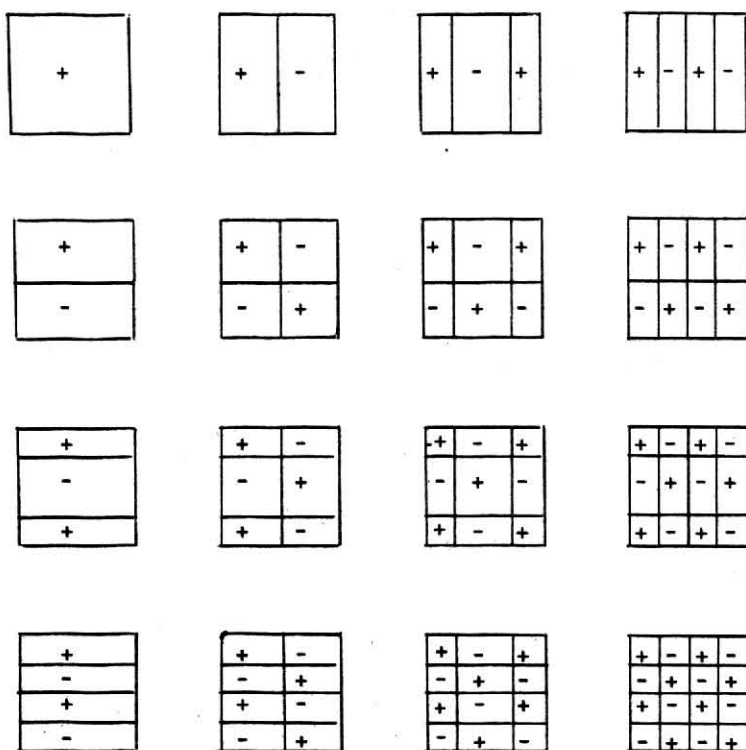


Рис. 1

ные, так и статические признаки изображения, т.е. менять режим работы фотоприемника, переходя от интегрального к поэлементно-последовательному опросу. На каждом такте работы матрицы осуществляется перегруппировка ее элементов, оцувствляемых со знаком "плюс" или "минус". Это дает возможность без потерь нормировать сигнал на полный световой поток, поступающий на всю матрицу.

Уменьшение числа тактов достигается с помощью синтеза масок Уолша фазовым управляемым транспарантом. В таких управляемых транспарантах используется эффект управляемого двулучепреломления в ориентированных слоях нематических жидких кристаллов. Т.е., если принять начальное комплексное пропускание ячеек транспаранта равным +1, то для света, у которого электрический вектор лежит в одной плоскости с направлением распространения света и направлением молекул жидкого кристалла, изменение фазовой задержки на  $\pi$  соответствует комплексному пропусканию, равному -1 [27-29].

В [30-32] описываются когерентно-оптические системы, осуществляющие одномерное преобразование Уолша-Адамара с использованием специально синтезированной с помощью ЭВМ голографической маски, причем элементы -1 в матрицах Адамара заменены нулями, что учитывается при определении значений коэффициентов преобразования. В [32] сообщается о возможности подобным способом реализации двумерного преобразования, однако, как и в случае с фотоприемной матрицей и фазовым транспарантом, несмотря на "параллельность" ввода изображения, вычисление коэффициентов преобразования происходит последовательно. Этим же недостатком обладают системы, описанные в [33, 34].

Параллельность вычисления коэффициентов преобразования может осуществляться с помощью матричного оптического преобразователя, реализующего умножение трех матриц, заданных на трех амплитудных транспарантах [35-39]. Формирование световых пучков между транспарантами осуществляется сфероцилиндрическими оптическими блоками. Составляющие элементов результирующей матрицы регистрируются фотоприемниками с накоплением и затем суммируются электронными методами.

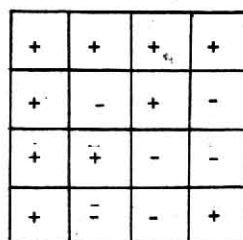


Рис. 2

Другим методом, осуществляющим параллельность вычисления коэффициентов, может служить параллельный оптико-электронный анализатор изображений [40-42]. Основой функционирования устройств, реализующих этот метод, являются операция мультиплицирования исходного изображения и параллельность его умножения на базисные функции.

Однако каждая функция или матрица во всех этих устройствах из-за амплитудной модуляции оптической несущей представляется последовательно в позитивном и негативном видах. Поэтому интегрирование по положительным и отрицательным значениям при вычислении коэф-

фициентов происходит раздельно и занимает достаточно много времени. В общем случае (при обратном преобразовании) во входных функциях-трансформантах - меняется как абсолютное значение элементов, так и знак, т.е. все функции знакопеременны и, если их число равно  $n$ , то число тактов интегрирования составляет  $2^n$ . Введение в эти системы линейно поляризованного света и двуслойных транспарантов, один слой которого формирует распределение амплитуды, а другой знак, позволяет реализовать оптическое представление знакопеременных функций или матриц и осуществлять как прямое, так и обратное преобразование за один такт, с одновременным получением в выходной плоскости соответствующих комбинаций световых полей по поляризации и интенсивности. Результат формируется интегрированием по положительным и отрицательным значениям с использованием призмы Волластона и фотоэлектрической схемы сравнения [43].

При прямом преобразовании изображение реального объекта может отображаться на экран электронно-оптического преобразователя, позволяющего решить проблемы фрагментизации изображения и усиления яркости слабоосвещенных объектов [44, 45]. Базисные маски изготавливаются на основе фотоанизотропного материала с наведенным двулучепреломлением [12, 46] или набором линейных поляризаторов, а параллельность умножения (просвечивания) на базисные маски происходит с помощью линзового растра. Результат прямого преобразования может формироваться подачей электрических сигналов с выходов схемы сравнения на шины матричного жидкокристаллического транспаранта (амплитудного и фазового). Таким же образом формируется трансформанта на приемном конце после ее передачи для осуществления обратного преобразования.

Экспериментальная проверка описанной реализации прямого и обратного преобразований проводилась по схеме, показанной на рис. 3, следующим образом: излучением от осветителя ОИ-19 просвечивал-

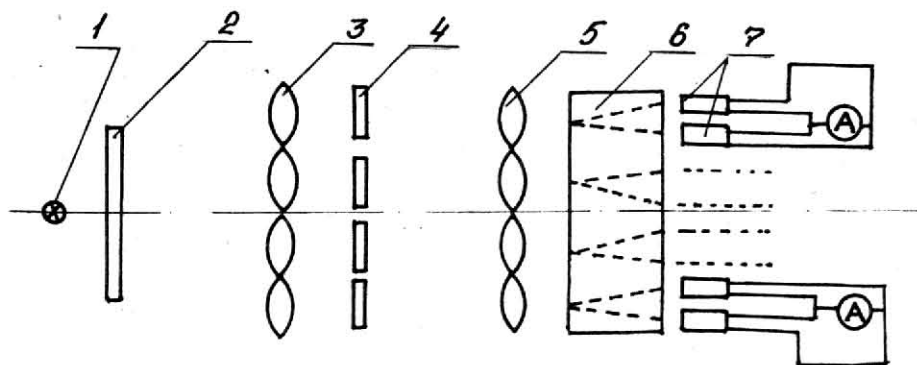
ся объект (символ "единицы"). Изображение входного символа размножалось линзовым растром и совмещалось с масками Уолша. Маски были изготовлены "ручным способом" из линейных поляризаторов, ориентированных ортогонально, соответственно +1 и -1.

Интенсивность световых потоков, прошедших через каждую маску, разделялась призмой Волластона на два потока с "вертикальной" и "горизонтальной" поляризациями и измерялась двумя фотоприемниками, включенными последовательно с миллиамперметром "навстречу друг другу".

На рис. 4, а показано распределение интенсивности прошедшего через входной объект излучения (изготовленный на матовой поверхности символ "единицы"), на рис. 4, б - результат преобразования, полученного описанным методом, на рис. 4, в - коэффициенты преобразования на ЗВМ С0-05. Результат обратного преобразования трансформанты, выполненного на ЗВМ, представлен на рис. 5, а. Соответственно, измерения дали значения, указанные на рис. 5, б.

С целью проверки возможности сжатия информации в результате преобразования были обнулены все элементы, кроме первой строки и первого столбца (зональный отбор). С помощью пластин в полволны, расположенных в отрицательных местах трансформанты, и масок Уолша по схеме (см. рис. 3) было осуществлено обратное преобразование. На рис. 6 представлены "сжатая" трансформанта (а) и восстановленные изображения при оптической реализации преобразования (б) и на ЗВМ соответственно (в).

Передача коэффициентов преобразования может происходить по многомодовому волоконному световоду, одномодовому световоду, сохраняющему поляризацию [47-50] и открытому пространству. При использовании в качестве канала связи многомодового волоконного световода следует использовать спектральное и частотное разделение, т.е. передаваемую трансформанту синтезировать с помощью матри-



1 - источник излучения; 2 - объект; 3, 5 - линзовый растр; 4 - маски Уолша; 6 - призма Волластона; 7 - фотоприемники

Рис. 3

|     |    |    |   |
|-----|----|----|---|
| 0,5 | 9  | 11 | 0 |
| 9   | 13 | 12 | 0 |
| 0   | 0  | 13 | 0 |
| 0   | 0  | 14 | 0 |

а

|      |     |    |    |
|------|-----|----|----|
| 7    | -2  | -3 | 3  |
| 2,5  | 2,5 | -1 | -1 |
| -1,5 | -1  | 0  | -1 |
| -1   | -1  | 0  | -1 |

б

|      |      |       |      |
|------|------|-------|------|
| 20,3 | -4,7 | -11,7 | 9,3  |
| 6,7  | 8,7  | -23   | -4,3 |
| -3,3 | -3,3 | -1,3  | -1,3 |
| -3,7 | -2,7 | -0,7  | -1,7 |

в

Рис. 4

|     |     |     |      |
|-----|-----|-----|------|
| 0,2 | 0,7 | 3,7 | 0,2  |
| 1,7 | 2,2 | 5,0 | 1,7  |
| 0,7 | 1,2 | 4,2 | -0,7 |
| 0,2 | 0,7 | 3,7 | -0,2 |

а

|     |     |     |      |
|-----|-----|-----|------|
| 0,3 | 0,3 | 2,8 | 0,3  |
| 1,9 | 1,9 | 4,1 | 1,9  |
| 0,8 | 0,8 | 2,8 | -0,8 |
| 0,1 | 0,1 | 2,1 | -0,1 |

б

Рис. 5

|      |    |    |   |
|------|----|----|---|
| 7    | -2 | -3 | 3 |
| 2,5  | 0  | 0  | 0 |
| -1,5 | 0  | 0  | 0 |
| -1   | 0  | 0  | 0 |

а

|      |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|
| 0,7  | 0,6 | 1,9 | 0,2 |
| 1,3  | 1,2 | 2,6 | 1,5 |
| 0,1  | 0   | 1,2 | 0   |
| -0,1 | 0   | 1,1 | 0   |

б

|      |     |     |      |
|------|-----|-----|------|
| 0,4  | 0,6 | 4,1 | 0,1  |
| 2,6  | 3   | 7,1 | 2,1  |
| -0,4 | 0,6 | 4,1 | 0,1  |
| -0,9 | 0,1 | 3,6 | -0,4 |

в

Рис. 6

цы двуцветных (для кодирования знака элемента трансформанты) световодов, частота модуляции излучения которых определяется амплитудой элемента [51].

Использование поляризационной модуляции излучения ввиду ее устойчивости при передаче по открытому пространству известно [52, 53]. В [53] описана линия связи оптического диапазона, осуществляющая передачу амплитудно и поляризационно модулированных сигналов. Однако воспользоваться этим методом при передаче по оптическому волокну невозможно, поскольку даже в одномодовом волокне, сохраняющем вид поляризации, не сохраняется ориентация поляризации линейно поляризованного излучения. Указанный факт не позволяет идентифицировать поляризационно модулируемые каналы на передающем и приемных концах линии связи. Если же сигнал одного знака передавать линейной поляризацией, а другого - циркулярной, то в процессе распространения по оптическому волокну, сохраняющему вид поляризации, последний не изменяется, хотя ориентация линейной поляризации может меняться.

Распознавание вида поляризации на приемном конце происходит с помощью специальной голограммы, записанной двумя (право- и лево-) циркулярно поляризо-

ванными лучами. Запись такой "векторной" голограммы на фотоанизотропный материал, который регистрирует суммарное распределение поляризации, возникающее при падении на плоскость регистрации одной волны нормально, а другой - под некоторым углом, приводится в [54-56]. При этом при просвечивании этой голограммы циркулярно поляризованным светом восстанавливается один - либо только "мнимый", либо только "действительный" фронт "предметной" волны. При просвечивании же линейно поляризованной волной восстанавливаются оба порядка дифракции. Таким образом, применение такой голограммы в сочетании с тремя фотоприемниками, регистрирующими нулевой и два первых порядка дифракции, позволяет регистрировать и амплитуду и знак переданной информации. Выход фотоприемника, регистрирующего нулевой порядок, является амплитудным. Наличие сигнала на выходе двух других указывает на один знак переданного элемента трансформанты; отсутствие сигнала на одном из этих фотоприемников - на другой. Сигналы с выходов этих фотоприемников подаются, соответственно, на амплитудные и знаковые входы двуслойного транспаранта, синтезируя таким образом трансформанту на приемном пункте, которая подвергается обратному преобразованию.

Примечательно, что преобразование Уолша-Адамара получило в последнее время распространение не только для кодирования изображений при их передаче, но и для спектрального анализа. Спектральный анализ с использованием принципа расположения и перемещения щелей спектрального прибора в соответствии с матрицами Адамара получил название "спектроскопия Адамара" [57-61].

Суть метода состоит в том, что в фокальной плоскости обычного спектрометра помещается многощелевая диафрагма, ширина которой равна удвоенному спектральному интервалу  $\Delta\lambda$ , ограниченному выходным отверстием прибора. Диафрагма состоит из совокупности прозрачных и непрозрачных участков, которые перекрывают спектральные интервалы в пределах кратных пределу разрешения прибора  $\delta\lambda$ . Структура участков в диафрагме соответствует структуре циклической S матрицы - производной от матрицы Адамара, состоящей из единиц и нулей. Преимущество спектрометра Адамара по сравнению с наиболее распространенным Фурье-спектрометром связано с меньшей чувствительностью к механическим вибрациям и с выдачей результатов в виде, удобном для вычислений на ЭВМ [23, 59].

Однако при этом все-таки необходимы перемещения диафрагмы на  $N-1$  шагов, где  $N$  определяется из соотношения  $2\Delta\lambda = (2N-1)\delta\lambda$ . Для каждого из  $N$  берется отсчет, и с помощью ЭВМ решаются уравнения.

В [60] описано использование для синтеза диафрагмы управляемой маски нематических жидких кристаллов, которая в сочетании со скрещенными поляризаторами дает возможность менять конфигурацию диафрагмы без механического перемещения. При этом все-таки сохраняются последовательность вычислений и ограниченность анализируемого спектра.

Учитывая ранее описанное оптическое кодирование отрицательного значения элемента, целесообразно в спектрометрах Адамара использовать стационарные маски со структурной матрицы Адамара, изготовленные из скрещенных поляризаторов. Причем, возможно, будет необходимо применение оптически управляемого транспаранта (для перевода некогерентного излучения в когерентное) и мультипликатора изображения, изготовленного из дифракционной решетки специального профиля [61], либо только линзового растра. Это позволит избежать механических перемещений, обеспечит параллельность вычисления, расширит анализируемый спектр и может представлять интерес для дальнейших исследований.

Применение поляризационного разделения в волоконно-оптических линиях связи может повысить скорость передачи и цифровой информации без повышения требований к ширине полосы пропускания передающего и приемного устройств. Наиболее подробный теоретический анализ поляризационного разделения с гетеродинным приемом проведен в [62], а практическая система и ее компоненты предложены в [63, 64]. Проведенный анализ

и экспериментальные исследования возможности использования поляризационного разделения в цифровых системах оптической связи показали, что наиболее перспективным является совместное поляризационно-амплитудное разделение. Передающее устройство для этого предложено в [65]. Такое разделение позволяет использовать одномодовые волокна (не сохраняющие поляризацию). При этом из-за усложнения электронного устройства разделения амплитуд число каналов должно ограничиваться тремя. В случае только поляризационного разделения необходимо использование одномодового волокна, сохраняющего поляризацию, и взаимно ортогональных круговых поляризаций излучения (для исключения влияния случайных поворотов плоскости поляризации).

Перейдем теперь к рассмотрению использования поляризационных элементов в интерферометрии, основанной на наблюдении интерферограммы, изменяющейся в результате воздействия на один из лучей. При этом устанавливается соответствие между величиной воздействия и сдвигом интерференционных полос. Когда интерферирующие лучи линейно поляризованы, внешние воздействия могут вызвать поворот плоскости поляризации предметного пучка. Если величина воздействия такова, что плоскости поляризации интерферирующих лучей становятся взаимно ортогональными, то интерференционная картина, очевидно, наблюдаться не будет. Такие "мертвые точки" при измерениях особенно часто имеют место в интерферометрических волоконно-оптических датчиках. Однако, как уже упоминалось, если опорная и предметная волны встречаются под углом  $\theta$ , отличным от нуля, причем предметный луч перпендикулярен плоскости регистрации, то имеет место распределение суммарной поляризации по пространственной координате. Поляризация суммарного светового поля будет в общем случае эллиптической. При определенных условиях эллипс вырождается в прямую. Координаты наблюдений линейной поляризации:

$$X = \frac{m\lambda}{2\sin\theta},$$

где  $m=0, 1, 2, \dots$ ;  $\lambda$  - длина волны.

В зависимости от четности  $m$  плоскость поляризации в местах ее линейности образует с помощью поляризации опорного пучка углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , определяемые из формулы:

$$\operatorname{tg} \varphi_{1,2} = \frac{B \cos \alpha \pm A}{B \sin \alpha},$$

где  $\alpha$  - угол между плоскостями поляризации предметной и опорной волн;  $A$  и  $B$  - амплитуды опорной и предметной волн соответственно [66]. При  $A=B$   $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\pi}{2}$ . То есть одновременное наблюдение интерференционных полос возможно через скрещенные анализаторы, расположенные в одной плоскости (рис. 7).

Наблюдение полученной картины двумя фотоприемниками через соответственно

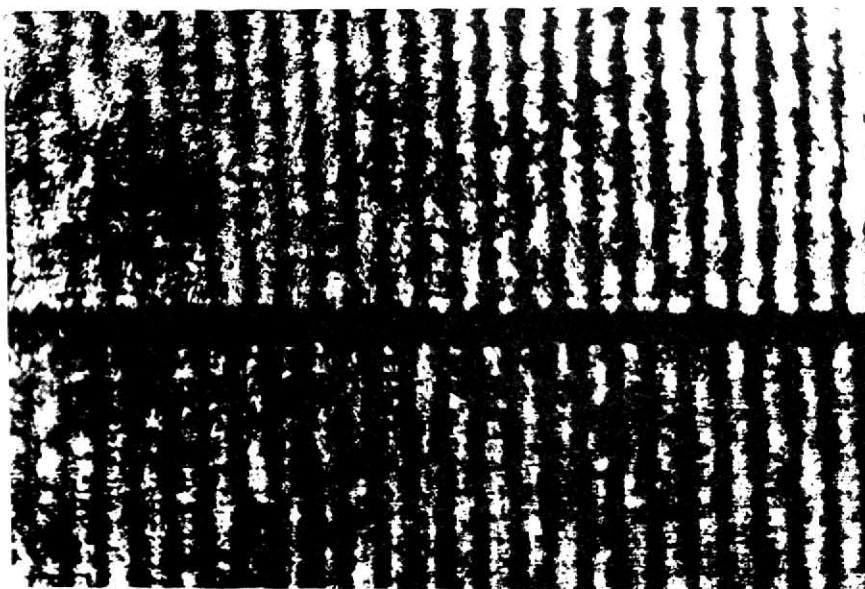


Рис. 7

расположенные щели обеспечивает регистрацию сдвига полос с удвоенной частотой. То есть чувствительность датчика возрастает в два раза.

Можно надеяться, что возможности модуляции поляризации света в оптических процессорах и датчиках далеко не исчер-

паны и дальнейшие исследования откроют новые функциональные перспективы.

Автор искренне благодарит Чавчанидзе О.Н. за проведение расчетов и плодотворные обсуждения, а также Завриеву Е.К. и Пароняна В.Л. за помощь в работе.

#### Л и т е р а т у р а

1. Кравцов Н.В., Чирков Л.Е., Поляченко В.Л. Элементы оптоэлектронных информационных систем. М.: Наука, 1970.
2. Микаэлян А.Л., Бобричев В.И. Голографические системы памяти. Оптические методы обработки информации: Сб. / Под ред. С.Б. Гуревича. Л.: Наука, 1976, с. 5-22.
3. Акаев А.А., Майоров С.А. Когерентно-оптические вычислительные машины. Л.: Машиностроение, 1977.
4. Акопов Л.И., Аязян А.А., Федоров В.Ю., Цицишвили Е.Г. Связь параметров систем обработки оптической информации с характеристиками оптических элементов // ОМП, 1978, № 8, с. 5-7.
5. Bryngdahl Olof *Geometrical transformations in optics*, // *Journal of the Optical Society of America*, 1974, vol. 64, N 8, p. 1092-1099.
6. Оптическая обработка информации / Под ред. Д. Кейсесента. М.: Мир, 1980.
7. Березный А.Е., Сисакян И.Н. Оптические преобразования координат. Оптическая запись и обработка информации. Куйбышев. изд. 1986, с. 101-106.
8. Акопов Л.И., Акопова Л.М., Зубченко Э.С. и др. Оптическое трансформирование изображений // Тр. Института кибернетики АН ГССР. Оптоэлектроника, квантовая электроника и прикладная оптика. Тбилиси: Мецниереба, 1983, с. 72-75.
9. Гасанов Э.Э. Об оптическом преобразовании координат после двух отражений // Компьютерная оптика: Сб. / МЦНТИ, М., 1988, Вып. 3, с. 70-73.
10. Клапп Л. Память и логика в оптической вычислительной машине. Оптическая обработка информации: Сб. / Под ред. С.А. Ерковича. М.: Мир, 1966, с. 89-101.

11. Жогликов В.А., Кияшко Б.В. Поляризационная модуляция света в оптических аналоговых системах обработки информации // Автометрия, 1980, № 2, с. 36-43.
12. Козенков В.М., Баращевский В.А. Органические фотоанизотропные материалы и их применение / Тез. докл. II Всес. науч.-техн. конф. "Проблемы развития радиооптики", М., 1985. Ч. I, с. 18, 19.
13. Brenner K. New implementation of symbolic substitution logic. Appl. Opt. 1986, 25, N 18, p. 3061.
14. Воеводкин Г.Г., Дианов Е.М., Кузнецов А.А., Нефедов С.М. Символьная подстановка и элемент Фрадкина на основе структуры МДП-ЖК // Автометрия, 1989, № 3, с. 103-107.
15. Уинтц Т. Кодирование изображений посредством преобразований // ТИИЭР, 1972, т. 60, № 7, с. 69-84.
16. Претт У.К. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982.
17. Джайн А.К. Сжатие видеoinформации // ТИИЭР, 1981, т. 69, № 3, с. 71-114.
18. Методы передачи изображений / Под ред. У.К. Претта. М. Радио и связь, 1983.
19. Бегашвили Г.А., Акопов Л.И., Шевченко А.В. и др. Задача передачи изображений в системах оптической связи // Техника средств связи. Сер. "Внутриобъектовая связь", 1985. Вып. 1, с. 89-93.
20. Трахтман А.М., Трахтман В.А. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах. М.: Советское радио, 1975.
21. Эндрюс Г. Применение вычислительных машин для обработки изображений. М.: Энергия, 1977.
22. Берковская К.Ф., Лаптева Н.В., Подласкин Б.Г. Оптоэлектронный анализатор изображений. Авт. свид. СССР № 360000. Бюлл. изобр., 1974, № 4.
23. Берковская К.Ф., Гуревич С.В., Кириллова Н.В. и др. Возможности реализации адамаровского спектроанализатора на фотоприемном устройстве типа "маскон" // Оптическая обработка информации. Л.: Наука, 1978, с. 147-164.
24. Григорьев Г.К., Подласкин Б.Г. Особенности работы фотоприемных матриц в режиме преобразования Адамара // Автометрия. 1979, № 2, с. 135.
25. Берковская К.Ф., Кириллова Н.В., Подласкин Б.Р. и др. Формирование интегральных признаков изображения на фотоприемной матрице // Оптоэлектронные методы обработки изображений. Л.: Наука, 1982, с. 175-184.
26. Берковская К.Ф., Жуковский Э.Е., Кириллова Н.В. и др. Фотоприемная мозаика с изолированными чувствительными элементами. Там же, с. 166-169.
27. Васильев А.А., Вашурин А.В., Компанеец И.Н. Фазовые управляемые транспаранты в когерентно-оптических устройствах, реализующих преобразования Уолша и Гильберта // Квантовая электроника, 1977, 4, № 9, с. 1917-1925.
28. Васильев А.А. Управляемые жидкокристаллические транспаранты для устройств преобразования и кодирования оптических сигналов // Тр. ФИАН, т. 126. М.: Наука, 1981, с. 3-75.
29. Васильев А.А., Касасент Д., Компанеец И.И., Парфенов А.В. Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987.
30. Chen Y.S., Wang Y.T., Li X.Y. The optical realization of the Walsh transformation by a coherent system // Acta Phys. Sin, vol. 29, 1980, p. 1307-1313.
31. Wang Y.T., Li X.Y., Chen Y.S. Optical realization the Walsh transformation by a single element // Acta Phys. Sin, vol. 29, 1980, p. 1599.
32. Chen Y.S. et al. Optical Walsh-Hadamard transform for orders 32 and 64. Appl. Optics. vol. 27, N 12, 1988, p. 2608-2612.
33. Мей М. Обработка изображений с помощью эффекта Вейгерта // Автометрия, 1981, № 5, с. 86-92.
34. Bartelt U. One-dimensional image transformation in white light // Optics Communication. vol. 38, N 4, 1981, p. 239-242.

35. Нежевенко Е.С., Твердохлеб А.Е. Умножение матриц оптическим методом // Автометрия, 1972, № 6, с. 24-29.

36. Кривенков Б.Е., Твердохлеб П.Е., Чугуй Ю.В. Оптический метод кодирования изображений при помощи преобразования Адамара // Автометрия, 1974, № 6, с. 83-87.

37. Твердохлеб А.Е. Многоканальное вычисление квадратичной формы некогерентными методами // Автометрия, 1980, № 6, с. 106-108.

38. Кривенков Б.Е., Твердохлеб П.Е., Чугуй Ю.В. Некогерентная оптическая система для выполнения матричных преобразований // Автометрия, 1975, № 3, с. 32-40.

39. Твердохлеб П.Е. Организация системы для многоканальной параллельной обработки данных // Автометрия, 1981, № 1, с. 3-17.

40. Анамян А.Л., Блок А.С., Верштейн В.М. и др. Анализатор изображений. Авт. свид. СССР № 742980. Бюл. изобр., 1980, № 24.

41. Блок А.С., Воронин В.Р., Крупицкий Э.И. и др. Оптико-электронное устройство кодирования штриховых изображений // Автометрия, 1981, № 2, с. 113-114.

42. Блок А.С., Крупицкий Э.И., Куликов В.В. Оптико-электронный анализ изображений на основе параллельного формирования множества линейных функционалов // Оптико-электронные методы обработки изображений. Л.: Наука, 1982, с. 70-75.

43. Акопов Л.И., Бегиашвили Г.А., Воеводкин Г.Г. и др. Оптическое аналоговое устройство для умножения трех знакопеременных матриц. Авт. свид. СССР № 1226438. Бюл. изобр., 1986, № 15.

44. Акопов Л.И., Завериева Е.К., Паронян В.Л. Оптическая обработка изображений с целью анализа и передачи // Тез. докл. 14-й Всес. научн.-техн. конф. "Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстропротекающих процессов", М., 1989, с. 87.

45. Акопов Л.И., Воеводкин Г.Г., Дианов Е.М. и др. Передача изображений реальных объектов по одиночному волоконному световоду методом спектрального кодирования и их регистрация // ОМП, 1989, № 8, с. 16-19.

46. Жданов В.Г., Малиновский В.К. Фотоиндуцированное двулучепреломление и дихроизм в пленках  $As_2S_3$  // Письма в ЖТФ, т. 3, вып. 18, 1977, с. 943-944.

47. Kutar Arut, Shenoy M.R., Thyagarajan, Polarization characteristics of elliptic - cor fiber with stress induced anisotropy // Journal of Lightwave Technology, vol. LT-5, N 2, 1987, p. 193-197.

48. Берикашвили В.Ш. Световоды, сохраняющие поляризацию излучения // Электронная промышленность, 1987, № 8, с. 39-41.

49. Будинин А.Б., Дианов Е.М., Дячков Г.Л. и др. Влияние структуры анизотропных волоконных световодов на сохранение линейной поляризации излучения // Радиотехника, 1988, № 8, с. 85-89.

50. Александров А.В., Григорянц В.В., Залогин А.Н. и др. Сохранение поляризации в анизотропных одномодовых волоконных световодах с эллиптической напрягающей оболочкой // Радиотехника, 1988, № 8, с. 90-95.

51. Акопов Л.И., Завериева Е.К., Паронян В.Л. Параллельная оптическая обработка и помехоустойчивая передача изображений. Компьютерная оптика (в печати).

52. Avramenko P.F. et al. Method for transmission two-dimensional information and apparatus for effecting same. Заявка № 1493709. 30.XI.1977. Великобритания.

53. Биков В.Е. Линия связи оптического диапазона. Авт. свид. СССР № 296271. Бюл. изобр., 1971, № 8.

54. Накичашвили Ш.Д. Поляризационная голографическая запись на реальных фотоанизотропных материалах // Оптика и спектроскопия. 1977, т. 42, вып. 2, с. 390-396.

55. Накичашвили Ш.Д. К вопросу об опорной волне в поляризационной голографии // Письма в ЖТФ. 1980, № 1, с. 6-9.

56. Эбралидзе Т.Д. О формировании заданного распределения светового поля // Журнал техн. физики, 1982, т. 52, вып. 9, с. 1865-1868.

57. Sloan N.S.A., Fine T., Philips P.G., Harwit M. Coder for multiplex spectrometry, Appl. Opt., vol. 8, N 10, 1969, p. 2103-2106.

58. Decker J.A.Jr., Harwit M. Experimental Operation of a Hadamard spectrometer, Appl. Opt., vol. 8, N 12, 1969.

59. Зайдель А.И., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976.

60. Stephens C., Stinson. Interest corows in Hadamard transforms for spectroscopy. Chem. and Eng, Neus, 1988, 66, N 9, p. 22-26.

61. Бобров С.Т., Котлецов Б.Н., Туркевич Ю.Г. Синтезированные дифракционные решетки с порядками одинаковой интенсивности. Микроэлектроника, 1975, т. 4, с. 375-378.

62. Kazovsky L.G. Phase - and polarization - diversity coherent optical techniques // Journal of Lightwave tehnology, vol. 7, N 12, 1989, p. 279-292.

63. Волоконно-оптическая система связи с поляризационной модуляцией и гетеродинным когерентным детектированием. Заявка ЕПВ № 0241039. Изобретения за рубежом Н 04 В 9/00 134-06-88, с. 14.

64. Watherall W.B. Polarization matching mixer. Патент США, № 4723315.

65. Передающее устройство для системы связи по волоконно-оптической линии. Заявка Японии № 62-25300, Изобр. за рубежом Н04 В 9/00 134-05-88, с. 44.

66. Акопов Л.И., Завриева Е.К., Мелкадзе В.И. и др. Преимущество использования линейно поляризованного света в интерферометрии // Тез. докл. 13-й Всес. научн.-техн. конф. "Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстрол протекающих процессов". М., 1987, с. 200.