

НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В ОПТИКО-ЦИФРОВЫХ ПРОЦЕССОРАХ

Описаны оптико-цифровые процессоры, осуществляющие ранговую и морфологическую фильтрацию. В рассматриваемых процессорах операции свертки выполняются естественно параллельными оптическими корреляторами. Следующие за ними арифметические и логические операции выполняются оптическим методом. Вследствие применения пороговой декомпозиции полутоновые изображения обрабатываются последовательно слой за слоем. Приведен оптико-цифровой метод вычисления локальных гистограмм для взвешенных и бинарных окрестностей любого размера и формы. Обсуждены возможные конфигурации оптических корреляторов. В заключение приведены примеры эффективного применения гибридных процессоров.

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование оптических систем для обработки изображений дает возможность быстро вычислять корреляции и свертки двумерных (2-D) функций аналоговым образом. Превосходство оптики по сравнению с электроникой возникает из-за способности оптических систем обрабатывать входные сигналы параллельно. Операция корреляции является основной в распознавании образов. Классический некогерентный $8f$ -коррелятор (f - фокусное расстояние), запатентованный Гольдбергом [1] под названием "статистическая машина", состоит из двух линз. Первая линза создает изображение транспаранта, пропускание которого по интенсивности есть первая из коррелируемых функций. Увеличение этого изображения - единичное; изображение возникает в плоскости транспаранта, соответствующего второй коррелируемой функции. Вторая линза интегрирует оптическое произведение обоих коэффициентов пропускания. Корреляционный сигнал записывается с помощью точечного фотодетектора, расположенного на оси коррелятора. Отсюда видно, что $8f$ - коррелятор пригоден для обработки униполярных действительных сигналов, какими являются обычные изображения (так как они суть двумерные распределения интенсивности). Поскольку формирующий изображение коррелятор Гольдберга линеен и инвариантен к сдвигу, он требует механического движения одного из транспарантов для поиска корреляционного максимума.

За последние 50 лет интерес оптиков, занимающихся обработкой информации, привлекала Фурье-оптика. Это было связано с тем, что она предоставляла возможность обрабатывать комплексные сигналы, которые появились в оптике вследствие открытия лазера, голографии и согласованной фильтрации [2]. Двухлинзовый когерентный $4f$ -коррелятор представляет собой некоторую модификацию коррелятора Гольдберга. В когерентном корреляторе обе линзы действуют как Фурье-преобразователи. В таком корреляторе согласованные и фазовые фильтры расположены в плоскости пространственных частот. Это делает возможным выполнение операций свертки, корреляции и пространственной фильтрации. Двумерное преобразование Фурье неинвариантно к сдвигу в том смысле, что Фурье-спектр расположен на оси когерентного процессора независимо от сдвига анализируемого сигнала во входной плоскости. В плоскости пространственных частот комплексная амплитуда спектра сигнала умножается на комплексный коэффициент пропускания фильтра. Этот фильтр является голограммой произвольно расположенного импульсного отклика. Из-за пространственной неинвариантности Фурье-преобразователей когерентный коррелятор не требует механического движения транспаранта. Когерентные процессоры очень эффективно решают задачи распознавания образов. Их возможности ограничиваются только малой скоростью и малой разрешающей способностью современных пространственных модуляторов света (ПМС). ПМС работают как входные устройства в плоскости предмета и фильтра. Кроме обработки изображений, реализуемой в плоскости пространственных частот (это - классическая схема применения Фурье-оптики), существует возможность

обработки (с использованием некогерентного света) в плоскости изображения устройства, называемого теньвым коррелятором со сбросом (ТКС). ТКС, использующие для освещения предмета белый свет, выполняют операции свертки и корреляции, сохраняя преимущества когерентного процессора (а именно: высокое быстродействие, параллельный режим работы и отсутствие необходимости механического движения) [3, 4]. Для того чтобы вычислить в ТКС, работающем как коррелятор, свертку коррелированных транспарантов, достаточно повернуть один из них относительно продольной оси ТКС на 180° . В результате этого поворота направления осей координат меняются на противоположные. Возможные конфигурации оптических процессоров, выполняющих операцию свертки, подробно обсуждаются в разделе 5.

Упомянутые выше методы оптической реализации свертки сочетались в последнее время с нелинейной цифровой фильтрацией, основанной на использовании локальной свертки, выполняемой методом движущегося окна. Ранговые статистики и морфологические фильтры, обсуждаемые в этой работе, составляют два известных класса объектов, применяемых при нелинейной фильтрации [5-9]. С математической точки зрения они неэквивалентны, однако их применение в обработке изображений дает похожие результаты. В разд. 2 и 3 рассмотрены свойства ранговых фильтров, состоящие в их способности работать с использованием пороговой декомпозиции. Приведены также разработанные в последнее время оптико-цифровые методы вычисления локальной гистограммы. Особый интерес представляют гибридные оптоэлектронные процессоры, способные осуществлять ранговую и морфологическую фильтрацию, в которых свертка выполняется оптическим образом.

2. ПОРОГОВАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ И РАНГОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

Пороговая декомпозиция была предложена Фичем и др. [10] как метод, который заменял трудоемкую операцию сортировки довольно несложным суммированием единиц в области фильтрующего окна. Элемент $V(\mathbf{k})$ исходного цифрового изображения $\{V(\mathbf{k})\}$ может быть представлен в виде суммы k -ых элементов бинарных слоев $\{X_q(\mathbf{k})\}$:

$$V(\mathbf{k}) = \sum_{q=1}^{Q-1} X_q(\mathbf{k}), \quad (1)$$

где $\mathbf{k} = (k_1, k_2)$ - координата текущего элемента исходного изображения, $k_1 = 1, \dots, N_1$, $k_2 = 1, \dots, N_2$, Q - количество уровней квантования изображения $\{V(\mathbf{k})\}$, размерность исходной матрицы $N = N_1 \times N_2$. Бинарные слои $\{X_q(\mathbf{k})\}$ получаются путем разложения с использованием порога q :

$$X_q(\mathbf{k}) = \begin{cases} 1 & \text{при } V(\mathbf{k}) \geq q \\ 0 & \text{при } V(\mathbf{k}) < q \end{cases}. \quad (2)$$

Связь пороговой декомпозиции с ранговой фильтрацией заключается в том, что ранговая фильтрация исходного полутонового изображения, квантованного на Q уровней, эквивалентна параллельной ранговой фильтрации его бинарных слоев с последовательным поэлементным сложением результатов. Полутоновое преобразованное изображение, квантованное на Q уровней, получается в виде

$$RO^r \{V(\mathbf{k}); w(\mathbf{m})\} = \sum_{q=1}^{Q-1} RO^r \{X_q(\mathbf{k}); w(\mathbf{m})\}, \quad (3)$$

где RO^r - значение преобразованного сигнала, получаемое как результат воздействия рангового фильтра r -го порядка на множество элементов, указанных в фигурных скобках, $w(\mathbf{m})$ определяет форму окрестности S k -го элемента:

$$w(\mathbf{m}) = \begin{cases} 1 & \text{при } (\mathbf{k} - \mathbf{m}) \in S \\ 0 & \text{при } (\mathbf{k} - \mathbf{m}) \notin S \end{cases} \quad (4)$$

3. ОПТИКО-ЦИФРОВОЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ГИСТОГРАММ

Знание локальной гистограммы, вычисленной в окрестности S всех элементов исходного изображения, существенно для выполнения задач ранговой фильтрации. Скорость цифрового вычисления локальной гистограммы уменьшается, если увеличивать окно фильтра или делать его непрямоугольным. Это не относится к оптико-цифровым процессорам. В оптическом процессоре операция локальной свертки бинарного слоя с неподвижным окном фильтров совершается параллельным образом и фактически мгновенно, независимо от размера и формы окна.

Локальная гистограмма $\{h_{k,q}^2(j)\}$ для окрестности S k -го бинарного ($Q=2$) слоя $\{X_q(\mathbf{k})\}$ обладает нормирующим свойством

$$h_{k,q}^2(0) + h_{k,q}^2(1) = N_S, \quad (5)$$

где N_S - количество элементов, составляющих окрестность S .

Гистограмма $h^Q(q)$ исходного изображения может быть вычислена с учетом гистограмм его бинарных слоев, так как количество отсчетов на q -ом полутоновом уровне гистограммы равно разности числа нулей в бинарных слоях $(q+1)$ -го и q -го уровней. Эта разность и разность числа единиц для указанных уровней, конечно, совпадают (с точностью до знака):

$$h^Q(q) = h_{q+1}^2(0) - h_q^2(0) = h_q^2(1) - h_{q+1}^2(1). \quad (6)$$

Теорема о гибридном методе вычисления локальной гистограммы была предложена Кобером и другими в [11] и экспериментально проверена в [12]. Согласно этой теореме, локальную гистограмму исходного изображения внутри любой окрестности S можно вычислить путем поэлементного вычитания распределений, которые являются свертками последовательных бинарных слоев с бинарной апертурой $\{w(\mathbf{m})\}$, определяющей окрестность S :

$$h_k^Q(q) = [X_q(\mathbf{k}) * w(\mathbf{k})] - [X_{q+1}(\mathbf{k}) * w(\mathbf{k})], \quad (7)$$

где $*$ обозначает свертку. Для доказательства теоремы (7) заметим, что локальная гистограмма бинарного слоя $\{X_q(\mathbf{k})\}$ может быть представлена в виде сверточной суммы

$$h_{q,k}^2(1) = \sum_{(\mathbf{k}-\mathbf{m}) \in S} X_q(\mathbf{k}-\mathbf{m}) = \sum_{\mathbf{m} \in \mathbf{Z}^2} [X_q(\mathbf{k}-\mathbf{m}) \times w(\mathbf{m})] = X_q(\mathbf{k}) * w(\mathbf{k}). \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что для любого $(\mathbf{k}-\mathbf{m})$ элемента исходного изображения значение свертки q -слоя с подвижным бинарным окном равно в точке \mathbf{k} количеству отсчетов внутри окна с центром в \mathbf{k} , для которых $V(\mathbf{k}-\mathbf{m}) \geq q$. С учетом (6) теперь можно доказать (7).

Аналогичная теорема доказана для взвешенного сканирующего окна [13]. Взвешенную полутоновую маску составляют целочисленные множители $\{z(\mathbf{m})\}$, на которые умножаются элементы окрестности S . В цифровой обработке ранговый фильтр r -го порядка для взвешенной окрестности внутри бинарного q -слоя отвечает r -му порядковому значению для такого множества элементов окрестности, в котором каждый элемент повторяется $z(\mathbf{m})$ раз. Если свертка выполняется оптическим образом, то взвешенная полутоновая маска действует как поглощающий транспарант.

Теорема об оптико-цифровом вычислении локальной гистограммы для взвешенной апертуры доказывает, что локальную гистограмму для взвешенной окрестности S_z исходного изображения можно вычислять путем поэлементного вычитания распределений, которые являются свертками q -го и $(q+1)$ -го слоев с взвешенной маской $\{z(\mathbf{m})\}$:

$$h_k^q(q) = [X_q(\mathbf{k}) * z(\mathbf{k})] - [X_{q+1}(\mathbf{k}) * z(\mathbf{k})] . \quad (9)$$

Доказательство теоремы аналогично приведенному для бинарной маски $\{w(\mathbf{m})\}$.

4. ОПТИКО-ЦИФРОВЫЕ ПРОЦЕССОРЫ

Структурная схема оптико-цифрового процессора приведена на рис. 1, на котором квадраты представляют страницы данных, а окружности - блоки обработки. Исходное полутоновое изображение представляется в виде пакета бинарных слоев цифровым методом. Затем слои передаются последовательно на устройство воспроизведения исходного изображения (т.е. на первый ПМС) оптического сверточного процессора. Во второй входной плоскости этого процессора другой ПМС вводит бинарную или взвешенную маску. ПМС управляет размером и формой маски. Результаты оптической свертки записываются с помощью ПЗС-камеры; они составляют пакет полутоновых сверточных распределений. Для корректного определения порядка морфологической операции все сверточные изображения квантуются. Затем поэлементно вычисляется сумма полученных таким образом бинарных слоев. Результирующее изображение оказывается полутоновым. В случае применения морфологических фильтров промежуточные результаты подаются на вход устройства воспроизведения исходного изображения; таким образом, создается контур обратной связи.



Рис. 1. Блок-схема оптико-цифрового процессора

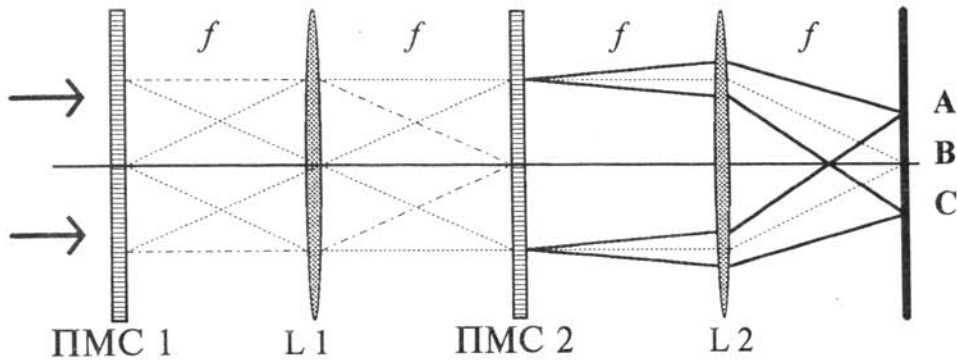


Рис.2. Схема оптического когерентного 4f-коррелятора

5. ОПТИЧЕСКИЕ СВЕРТОЧНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ

Начнем обзор оптических сверточных процессоров с когерентного 4f-коррелятора, схема которого показана на рис.2. Лазерный параллельный пучок освещает пространственный модулятор ПМС1; он служит устройством ввода бинарных слоев $\{X_q(\mathbf{k})\}$ исходного изображения. В Фурье-плоскости, которая совпадает с задней фокальной плоскостью линзы L1, комплексная амплитуда Фурье-преобразования $F\{X_q(\mathbf{k})\}$ бинарного слоя оптически умножается на амплитудное пропускание фильтра. Это пропускание есть пропускание Фурье-голограммы, на которой записан спектр движущейся апертуры или структурного элемента $F\{w(\mathbf{m})\}$. Так как запись голографическая, она делается с определенной несущей частотой, которая задается формой и наклоном опорной волны, используемой при записи. Пропускание апертурной маски тождественно импульсному отклику фильтра. Вследствие дифракции света, падающего на голограмму, возникают три пучка, которые подвергаются Фурье-преобразованию с помощью линзы L2. В выходной плоскости коррелятора получаются три неперекрывающихся распределения света - A, B и C. Распределение A описывает комплексную амплитуду свертки исходного слоя с окном. В случае бинарных транспарантов оно соответствует распределению интенсивности

$$A = X_q(\mathbf{k}) * w(\mathbf{k}) . \quad (10)$$

Внеосевое расположение распределения A связано с несущей частотой фильтра. Распределение B состоит из двух перекрывающихся распределений, а именно: изображения исходного слоя и свертки исходного слоя с автокорреляционной функцией бинарной движущейся апертуры

$$B = \{X_q(\mathbf{k})\} + [X_q(\mathbf{k})] * [w(\mathbf{m}) \bullet w(\mathbf{m})] . \quad (11)$$

Жирная точка обозначает операцию автокорреляции. Для задач обработки это осевое распределение непригодно, хотя оно содержит почти всю энергию входного сигнала. Распределение C есть корреляционная функция исходного слоя с апертурной маской. Оно существенно для задач распознавания образов.

$$C = X_q(\mathbf{k}) \bullet w(\mathbf{k}) . \quad (12)$$

У когерентного 4f-коррелятора есть два серьезных недостатка. Во-первых, он

энергетически неэффективен. Теоретический анализ показывает, что при работе ПМС2 в полутоновом амплитудном режиме эффективность коррелятора (которая по определению есть отношение мощности пучка A к мощности входного сигнала, измеряемого непосредственно за ПМС1) достигает 4%. Если ПМС2 работает в бинарном амплитудном режиме, то эффективность увеличивается до 10%. Наконец, при фазовом режиме работы ПМС2 эффективность достигает 40%. Если ПМС2 представляет собой телевизионный дисплей на жидких кристаллах, то упомянутые выше значения уменьшаются вдвое, так как только половина каждой элементарной секции дисплея прозрачна. Во-вторых, когерентный шум влияет на запись распределения A в оптоэлектронном интерфейсе с дискретной структурой. Для подавления когерентных помех можно пользоваться светом, некогерентным в пространстве или во времени. Временная некогерентность - это свойство полихроматического света, испускаемого точечным источником. В принципе можно пользоваться широкополосным светом, но ахроматические Фурье-объективы как рефракционные, так и дифракционные (фазовые пластинки), характеризуются малой эффективностью и малым абсолютным отверстием, которое не совпадает с обычными размерами ПМС. Пространственной некогерентности лазерного пучка можно добиться с помощью вращающегося диффузора, который вызывает случайные возмущения волнового фронта. ПМС1 модулирует падающий некогерентный свет по интенсивности. В Фурье-плоскости пропускание фильтра модулирует по интенсивности спектр мощности исходного слоя. Следовательно, операция согласованной фильтрации приводит к свертке коэффициентов пропускания (по интенсивности) исходного слоя и апертурной маски.

Пространственно-некогерентный 4f-коррелятор был использован в исторически первом эксперименте по реализации медианной фильтрации с пороговой декомпозицией, предложенном Очоа и др. [14]. Когерентный 4f-коррелятор с амплитудно-кодированным фильтром был разработан Касасентом и его сотрудниками (см., например, [15]).

В завершение обзора нелинейных гибридных систем с когерентными оптическими сверточными процессорами мы должны напомнить об оригинальном подходе к морфологической фильтрации, который был предложен Федором и Фриманом [16]. В их процессоре свертка осуществляется оптическим образом в корреляторе с одновременным преобразованием. Обычное бинарное ядро заменяется комплексным ядром (фактически - действительным биполярным одномерным ядром) с асимметричной мнимой и действительной частями. В результате бинарная морфологическая фильтрация, которая основана на расширении (минимум) и эрозии (максимум), может быть выполнена независимо от абсолютной интенсивности исходного изображения и, кроме того, параллельно в областях, в которых функция $I(k)$ постоянна.

В оптических некогерентных корреляторах свертку можно осуществлять тремя способами: пользуясь теневой проекцией, угловой проекцией или плоскостью дефокусированного изображения [17]. У безлинзового ТКС, показанного на рис.3, самая простая конфигурация. Освещающая часть коррелятора состоит из полихроматического источника и диффузора. С диффузором соприкасается первый ПМС. Его пропускание

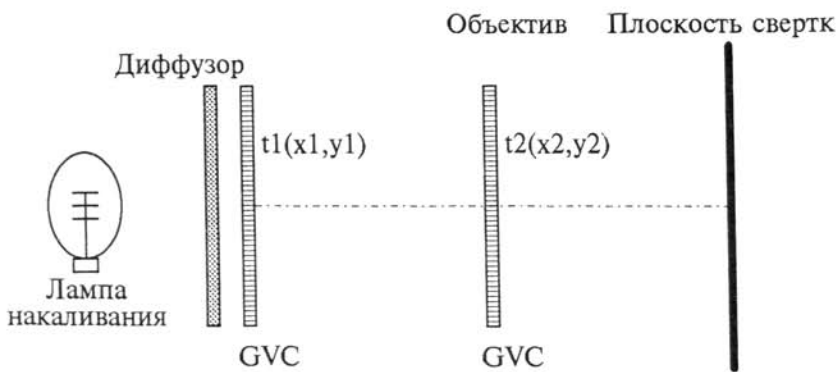


Рис. 3. Оптическая схема безлинзового теневого коррелятора со сбросом

пропорционально функции $t_1(x_1, y_1)$. Информация, закодированная в первом ПМС, свободно распространяется в телесном углу, величина которого определяется угловой характеристикой диффузора. Пучок света проходит через второй ПМС, который генерирует вторую коррелируемую функцию $t_2(x_2, y_2)$. Он находится на произвольном расстоянии z_1 от первого ПМС. На некотором расстоянии z_2 от второго ПМС регистрируется тенеграмма. Из анализа, приведенного в [4], следует, что распределение интенсивности, сформированное в плоскости свертки светом, прошедшим через первый ПМС и точечное отверстие, находящиеся в точке $(x_2=0, y_2=0)$ плоскости (x_2, y_2) , определяется выражением

$$I_{\text{out}}(x_3, y_3) \propto I_{\text{in}}(x_1, y_1) t_1(-z_2 x_1 / z_1, -z_2 y_1 / z_1) . \quad (13)$$

Точечный источник, находящийся в осевой точке плоскости (x_1, y_1) , формирует в плоскости свертки изображение второго транспаранта

$$I_{\text{out}}(x_3, y_3) \propto t_2[(z_1 + z_2)x_2 / z_1, (z_1 + z_2)y_2 / z_1] . \quad (14)$$

Из (13) и (14) следует, что результирующее сверточное распределение задается выражением

$$I_{\text{out}}(x_3, y_3) \propto \left[I_{\text{in}}(x_1, y_1) t_1 \left(\frac{-z_2 x_1}{z_1}, \frac{-z_2 y_1}{z_1} \right) \right] * t_2 \left(\frac{(z_1 + z_2)x_2}{z_1}, \frac{(z_1 + z_2)y_2}{z_1} \right) . \quad (15)$$

Изменяя расстояние z_1 между транспарантами, можно управлять количеством интегралов свертки. Увеличение числа интегралов вызывает уменьшение количества произведений, составляющих сверточную сумму (т.е. одну точку в плоскости свертки). Когда расстояние z_1 увеличивается, подобным образом ведет себя количество разрешаемых точек в плоскости свертки. Когда z_1 уменьшается, количество произведений, выполняемых в плоскости (x_2, y_2) (то есть число слагаемых сверточной суммы), увеличивается.

Безлинзовые ТКС были использованы в матричных оптических процессорах, в которых для выполнения логических операций обрабатывались тенеграммы [18]. Возможности их применения для выполнения задач какого-то другого характера ограничены, так как эти ТКС некомпактны из-за присутствия длинных отрезков свободного распространения света. Тем не менее пространственная разрешающая способность, достигаемая в безлинзовых ТКС, выше, чем ожидаемая на основании приведенных выше дифракционных характеристик [19].

Одна из возможных конфигураций ТКС, в которой используется угловая проекция [17, 20], приведена на рис. 4. Параллельный пучок падает на ПМС1 и проходит сквозь

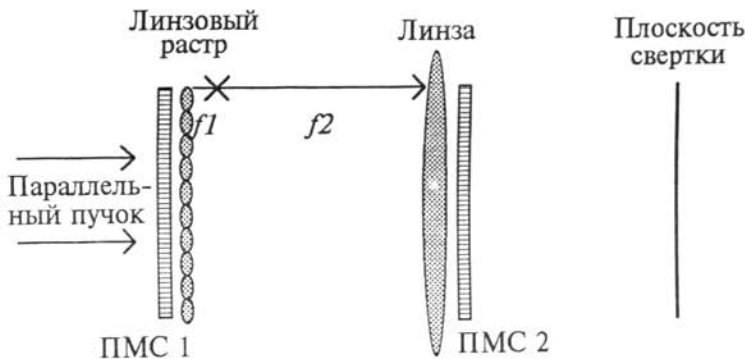


Рис. 4. Схема оптического сверточного процессора с линзовым растром

линзовый растр. Каждая из линз растра собирает в точку свет, прошедший через соответствующую ей ячейку ПМС. Таким образом, линза с фокусным расстоянием f_2 и ПМС2 освещаются растром точечных источников, расположенных в передней фокальной плоскости. Свет, регистрируемый в плоскости свертки, является суперпозицией пучков, порождаемых этими точечными источниками, для которых затворы ПМС1 находятся в открытом состоянии. Все пучки модулируются ПМС2; их угол падения зависит от расположения источников в плоскости растра. Мы уверены в том, что будущее нелинейной обработки изображений связано с ТКС, которые реализуют угловую проекцию с помощью дифракционных оптических элементов.

Конструкция самого популярного некогерентного сверточного процессора, применяемого в оптико-цифровых процессорах, основана на использовании свойств плоскости дефокусированного изображения [13, 21-24]. Имеются различные варианты этой конструкции. Самый простой из вариантов приведен на рис.5. Он реализован с учетом того обстоятельства, что распределение света в выходной плоскости системы, формирующей изображение, определяется сверткой исходного изображения с импульсным откликом системы. В сверточном процессоре, показанном на рис.5, объектив ПЗС-камеры формирует расфокусированное изображение слоя, введенного ПМС. В этом случае точечный отклик играет роль движущегося окна или структурного элемента. Импульсным откликом можно управлять, изменяя степень дефокусировки или применяя диафрагму с плавно меняющимся отверстием. Видно, что возможности управления формой окна весьма ограничены. Это является серьезнейшим недостатком системы.

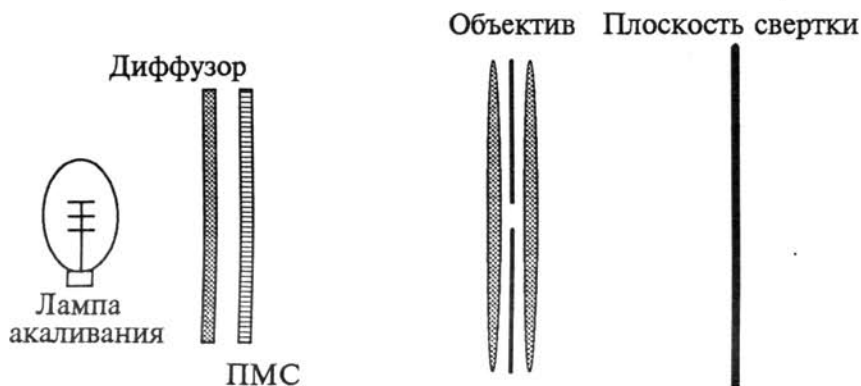


Рис.5. Схема оптического сверточного процессора, в котором используются свойства плоскости расфокусированного изображения [20]

Другой вариант ТКС с дефокусировкой показан на рис.6. У этого однолинзового сверточного процессора два ПМС, работающих в качестве устройств ввода функций, подлежащих свертке [17]. Линза L формирует действительное изображение ПМС1. Свертка пропусканий t_1 и t_2 модуляторов ПМС1 и ПМС2

$$I_{\text{out}}(x_0, y_0) \propto \frac{1}{m_1 m_2} \iint t_1 \left(\frac{x}{m_1}, \frac{y}{m_1} \right) t_2 \left(\frac{x_0 - x}{m_2}, \frac{y_0 - y}{m_2} \right) dx dy \quad (16)$$

является функцией коэффициентов увеличения m_1 и m_2 транспарантов t_1 и t_2 , соответственно. Коэффициенты m_1 и m_2 определяются выражениями

$$m_1 = \left| \frac{i_2}{i_2 - o_1} \right| \left(\frac{c - o_2}{o_2} \right), \quad m_2 = \left| \frac{i_1 - c}{i_1 - o_2} \right|. \quad (17)$$

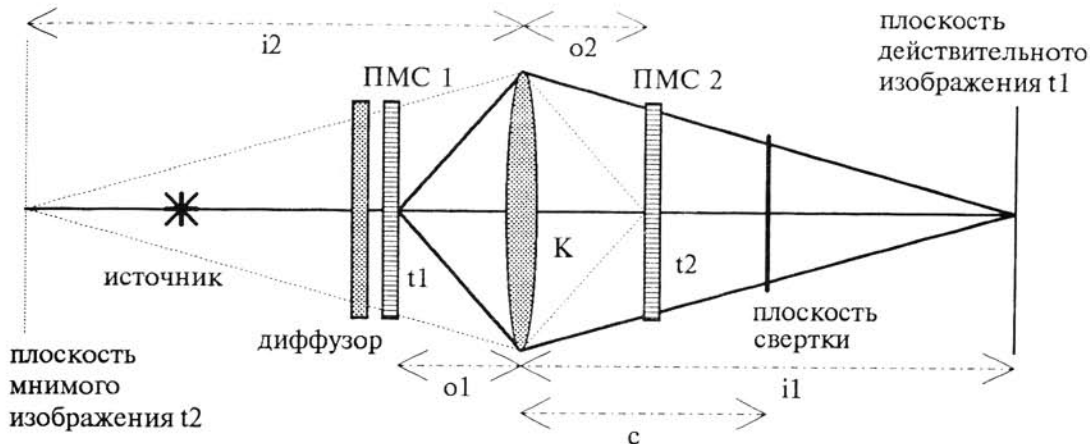


Рис.6. Схема однолинзового сверточного процессора, в котором используются свойства плоскости расфокусированного изображения [17]

Расстояния i_1 , o_1 , i_2 , o_2 и c показаны на рис.6. Расстояние c в принципе произвольно. Его изменение приводит к изменению относительного масштаба t_1 и t_2 .

Приведенная на рис.6 схема однолинзового сверточного процессора с дефокусировкой была недавно применена в электронно-оптическом программированном процессоре, в котором исходные слои и окно фильтра вводились с частотой видеосигнала двумя ПМС на жидких кристаллах [24]. В этом процессоре слои исходного изображения состояли из 320×264 отсчетов, а размерность фильтра достигала 15×15 отсчетов. Дальнейшее увеличение масок требует применения высококачественных объективов с большой числовой апертурой.

Разработка оптико-цифровых процессоров вызвала интерес к действию ТКС [25]. Угловая расходимость пучка света за первым ПМС или за каким-то другим растром источников оказалась решающей для выполнения свертки функций, характеризующихся высоким значением произведения площади на ширину полосы. Это касается как исходного изображения, так и фильтра. Более того, в стандартных ТКС энергетическая отдача обратно пропорциональна площади функции рассеяния точки. Для увеличения энергетического выхода предлагается отдельно управлять пучками света, идущими от составляющих растр источников. Это можно осуществить путем размещения источников на сферической поверхности. Альтернативный метод состоит в добавлении непосредственно за растром оптических дифракционных элементов, являющихся фазовыми решетками.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Описанные в литературе [12-16, 20-24] оптико-цифровые процессоры выполняют различные операции нелинейной фильтрации. Медианная фильтрация, подавление импульсных помех, выделение границ деталей, эквализация локальной гистограммы, сглаживание изображений - вот некоторые примеры реализованных ранговых операций. Примерами реализованных операций морфологической фильтрации могут быть открытие, закрытие, хит-мисс-преобразование и градиент. В современных программированных процессорах размеры обрабатываемых изображений могут изменяться от 15×15 до 256×256 отсчетов [24].

Оптическая часть оптико-цифровых процессоров является источником помех, которые влияют на конечный результат. В системах, использующих ПМС на жидких кристаллах, неоднородности яркости освещающего пучка и толщины слоя жидкого кристалла вызывают случайное распределение интенсивности света, которое искажает оптический сигнал, сгенерированный с помощью ПМС. В результате математическое ожидание интенсивности света за закрытым затвором оказывается ненулевым (положительным). Для ПМС на жидких кристаллах контраст есть по определению среднее значение отношения интенсивности света, прошедшего через ячейку, которая находится в

состоянии "открыто", к аналогичной интенсивности на выходе ячейки, находящейся в состоянии "закрыто". Если контраст равен k , то для слоя, у которого нулей в k раз больше, чем единиц, энергия сигнала равна энергии шума. Отсюда следует, что для ПМС типа Эпсон ВП-100ПС, у которого 320x264 отсчетов, без принятия специальных мер контраст, равный 60, достигается для структурного элемента, содержащего не менее 1400 отсчетов. В ПМС на жидких кристаллах шум возникает также из-за перекрестного влияния "открытых" и "закрытых" ячеек. В оптоэлектронном процессоре, который состоит из двух ПМС, ПЗС-камеры и памяти видеосигнала, исходный непрерывный сигнал трижды подвергается дискретизации, причем каждый раз с другим шагом. За счет многократной дискретизации может возникать ошибочная пространственная локализация преобразованного сигнала. В последнее время были проведены эксперименты [23, 24], в которых сходство выходных изображений, полученных цифровыми и оптическими методами, оценивалось с использованием среднего абсолютного отклонения (MAE - *mean absolute error*)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_k \left| F_{\text{dig}} \{S[V(k)]\} - F_{\text{opt}} \{S[V(k)]\} \right|, \quad (18)$$

где F - оператор фильтра. Результаты оптической и цифровой фильтрации совпадают с точностью 2% (медианная фильтрация - 1%, расширение и эрозия - 2%). Проблема подавления помех в оптоэлектронных процессорах остается предметом активных научных исследований [26, 27].

7. ВЫВОДЫ

Будущее оптико-цифровых систем обработки изображений (или иных двумерных массивов данных) обусловлено развитием ТКС, работающих в реальном времени и с большой энергетической эффективностью [28]. Эти условия могут быть реализованы в безлинзовых сверточных процессорах, при замене первого ПМС матрицей реальных источников. В качестве таких источников могут применяться полупроводниковые диоды и лазеры. Обнадеживающими характеристиками обладают полупроводниковые лазеры с вертикальной накачкой и поверхностной эмиссией. Современные лазеры этого типа можно переключать с частотой 100 МГц; однако управлять отдельными лазерами матрицы пока невозможно. Вторым существенным компонентом систем обработки является электрически управляемый высококонтрастный ПМС. Современные ПМС на жидких кристаллах не удовлетворяют некоторым требованиям.

Автор выражает благодарность В.Коберу, Г.Гарсии, М.Гендзиоровскому, В.Родсу, Л.Ярославскому, К.Фerreira и Е.Халасинской-Мацуковой за участие в обсуждении вопросов обработки информации оптико-цифровыми процессорами, реализующими ранговую и морфологическую фильтрацию.

Проведение описанных исследований стало возможным благодаря финансовой поддержке польского Комитета научных исследований (КВН) в рамках гранта 8T11F 011 08.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Goldberg, "Statistical machine," US Pat. 1 838 389, December 1931.
2. *Optical Processing and Computing*, Н. Н. Arsenault, Т. Szoplik, and В. Macukow, eds., Academic, Boston, 1989.
3. W. T. Rhodes and A.A.Sawchuk, "Incoherent optical processing," in *Optical Information Processing. Fundamentals*. S.H.Lee (Ed.), Springer, Berlin, 1981, pp. 69-100.
4. I. Glaser, "Information processing with spatially incoherent light," *Prog. Opt.* **24**, 389-509 (1987).
5. V. Kim and L. P. Yaroslavsky, "Rank algorithms for picture processing," *Comput. Vision Graphics Image Processing*, **35**, 234-258 (1986).
6. P. D. Wendt, E. J. Coyle, and N. C. Gallagher, Jr., "Stack filters," *IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing*, **ASSP-34**, 898-911 (1986).

7. P. Maragos and R. W. Schafer, "Morphological filters - Part I: Their set-theoretic analysis and relations to linear shift-invariant filters," *IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing*, **ASSP-35**, 1153-1169 (1987).
8. P. Maragos and R. W. Schafer, "Morphological filters - Part II: Their relations to median, order-statistic, and stack filters," *IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing*, **ASSP-35**, 1170-1184 (1987).
9. I. Pitas and A. N. Venetsanopoulos, *Nonlinear Digital Filters. Principles and Applications*, Kluwer, Dordrecht, 1990.
10. J. P. Fitch, E. J. Coyle, and N. C. Gallagher, Jr., "Median filtering by threshold decomposition," *IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Processing*, **ASSP-32**, 1183-1188 (1984).
11. V. Kober and T. Szoplik, "Hybrid method of local histogram calculation by threshold decomposition," in *Proc. of Third International Seminar on Digital Image Processing in Medicine, Remote Sensing, and Visualization of Information*, Riga, Latvia, 1992.
12. V. Kober, T. Cichocki, M. Gedziorowski, and T. Szoplik, "Optical-digital method of local histogram calculation by threshold decomposition," *Appl. Opt.* **32**, 692-698 (1993).
13. V. Kober, J. Garcia, T. Szoplik, and L. P. Yaroslavsky, "Nonlinear image processing based on optical-digital method of local histogram calculation," *Internat. J. Opt. Computing* **2**, 367-383 (1993).
14. E. Ochoa, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney, "Optical median filtering using threshold decomposition," *Appl. Opt.* **26**, 252-260 (1987).
15. D. Casasent, R. Schaefer, and R. Sturgill, "Optical hit-miss morphological transform," *Appl. Opt.* **31**, 6255-6263 (1992).
16. A. Fedor and M. O. Freeman, "Optical multiscale morphological processor using a complex-valued kernel," *Appl. Opt.* **31**, 4042-4050 (1992).
17. J. Knopp and M. F. Becker, "Generalized model for noncoherent optical convolvers and correlators," *Appl. Opt.* **17**, 984-985 (1978).
18. J. Tanida and Y. Ichioka, "Optical-logic-array processor using shadowgrams. III. Parallel neighborhood operations and an architecture of an optical digital-computing system," *J. Opt. Soc. Am. A* **2A**, 1245-1253 (1985).
19. M. Gedziorowski, T. Szoplik, and C. Ferreira, "Resolution of a lensless shadow casting correlator with partially coherent illumination," *Opt. Commun*, in print.
20. Y. Li, A. Kostrzewski, D. H. Kim, and G. Eichmann, "Compact parallel real-time programmable optical morphological image processor," *Opt. Lett.* **14**, 981-983 (1989).
21. J. M. Hereford and W. T. Rhodes, "Nonlinear optical image filtering by time-sequential threshold decomposition," *Opt. Eng.* **27**, 274-279 (1988).
22. J. Garcia, T. Szoplik, and C. Ferreira, "Optoelectronic morphological image processor," *Opt. Lett.* **18**, 1952-1954 (1993).
23. T. Szoplik, J. Garcia, and C. Ferreira, "Rank-order and morphological enhancement of image details with an optoelectronic processor," *Appl. Opt.* **34**, 267-275 (1995).
24. M. Gedziorowski and J. Garcia, "Programmable optical-digital processor for rank-order and morphological filtering," *Opt. Commun.* submitted.
25. K. Raj, W. Prather, R. A. Athale, and J. N. Mait, "Performance analysis of optical shadow-casting correlators," *Appl. Opt.* **32**, 3108-3112 (1993).
26. T. Cichocki, "Spatial and temporal characteristics of optical-digital image processors," Technical Reprt KBN-2-P302 069 05, Committee of Scientific Research, Warsaw, Poland, 1994.
27. J. L. Tasto and W. T. Rhodes, "Noise immunity of threshold decomposition optoelectronic order-statistics filtering," *Opt. Lett.* **18**, 1349-1351 (1993).
28. T. Szoplik and K. Chalasinska-Macukow, "Towards nonlinear optical processing," in *International Trends in Optics*, J. W. Goodman, ed., Academic, Boston, 1991.

Nonlinear filtering in digital-optical processors

T. Szoplík

Institute of Geophysics, University of Warsaw, Pasteur 7, 02-093 Warsaw, Poland

Abstract

Digital-optical processors performing rank and morphological filtering are described. In the processors under review, convolution operations are performed by naturally parallel optical correlators. The following arithmetic and logical operations are performed by the optical method. Due to the application of threshold decomposition, grayscale images are processed layer by layer. An optical-digital method for calculating local histograms for weighted and binary neighborhoods of any size and shape is presented. Possible configurations of optical correlators are discussed. In conclusion, examples of the effective use of hybrid processors are provided.

Citation: Szoplík T. Nonlinear filtering in digital-optical processors. *Computer Optics* 1995; 14-15(1): 113-123.

References

- [1] Goldberg E. Statistical machine; US Pat. 1 838 389; 1931.
- [2] Arsenault HH, Szoplík T and Macukow B eds. Academic; Optical Processing and Computing; Boston: 1989.
- [3] Rhodes WT, Sawchuk AA. Incoherent optical processing; Optical Information Processing. Fundamentals. Lee SH (Ed.); Springer; Berlin: 1981; 69-100.
- [4] Glaser I. Information processing with spatially incoherent light; 1987; Prog. Opt. 24: 389-509.
- [5] Kim V, Yaroslavsky LP. Rank algorithms for picture processing; Comput. Vision Graphics Image Processing; 1986; 35: 234-258.
- [6] Wendt PD, Coyle EJ, Gallagher Jr. NC. Stack filters; IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing; 1986; ASSP-34: 898-911.
- [7] Maragos P, Schafer RW. Morphological filters - Part I: Their set-theoretic analysis and relations to linear shift-invariant filters; IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing; 1987; ASSP-35: 1153-1169.
- [8] Maragos P, Schafer RW. Morphological filters - Part II: Their relations to median, order-statistic, and stack filters; IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing; 1987; ASSP-35: 1170-1184.
- [9] Pitas I, Venetsanopoulos AN. Nonlinear Digital Filters. Principles and Applications, Kluwer, Dordrecht, 1990.
- [10] Fitch JP, Coyle EJ, Gallagher Jr. NC. Median filtering by threshold decomposition; IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Processing; 1984; ASSP-32: 1183-1188.
- [11] Kober V, Szoplík T. Hybrid method of local histogram calculation by threshold decomposition; Proc. of Third International Seminar on Digital Image Processing in Medicine, Remote Sensing, and Visualization of Information; Latvia, Riga: 1992.
- [12] Kober V, Cichocki T, Gedziorowski M, Szoplík T. Optical-digital method of local histogram calculation by threshold decomposition; 1993; Appl. Opt.; 32: 692-698.
- [13] Kober V, Garcia J, Szoplík T, Yaroslavsky LP. Nonlinear image processing based on optical-digital method of local histogram calculation; 1993; Internat. J. Opt. Computing; 2: 367-383.
- [14] Ochoa E, Allebach JP, Sweeney DW. Optical median filtering using threshold decomposition; 1987; Appl. Opt.; 26: 252-260.
- [15] Casasent D, Schaefer R, Sturgill R. Optical hit-miss morphological transform; 1992; Appl. Opt.; 31: 6255-6263.
- [16] Fedor A, Freeman MO. Optical multiscale morphological processor using a complex-valued kernel; 1992; Appl. Opt.; 31: 4042-4050.
- [17] Knopp J, Becker MF. Generalized model for noncoherent optical convolvers and correlators; 1978; Appl. Opt.; 17: 984-985.
- [18] Tanida J, Ichioka Y. Optical-logic-array processor using shadowgrams. III. Parallel neighborhood operations and an architecture of an optical digital-computing system; 1985; J. Opt. Soc. Am. A 2A: 1245-1253.
- [19] Gedziorowski M, Szoplík T, Ferreira C. Resolution of a lensless shadow casting correlator with partially coherent illumination; Opt. Commun, in print.
- [20] Li Y, Kostrzewski A, Kim DH, Eichmann G; Compact parallel real-time programmable optical morphological image processor; 1989; Opt. Lett.; 14: 981-983.
- [21] Hereford JM, Rhodes WT. Nonlinear optical image filtering by time-sequential threshold decomposition; 1988; Opt. Eng.; 27: 274-279.
- [22] Garcia J, Szoplík T, Ferreira C. Optoelectronic morphological image processor; 1993; Opt. Lett.; 18: 1952-1954.
- [23] Szoplík T, Garcia J, Ferreira C. Rank-order and morphological enhancement of image details with an optoelectronic processor; 1995; Appl. Opt.; 34: 267-275.
- [24] Gedziorowski M, Garcia J. Programmable optical-digital processor for rank-order and morphological filtering; Opt. Commun. submitted.
- [25] Raj K, Prather W, Athale RA, Mait JN. Performance analysis of optical shadow-casting correlators; 1993; Appl. Opt.; 32: 3108-3112.
- [26] Cichocki T. Spatial and temporal characteristics of optical-digital image processors; Technical Reprt KBN-2-P302 069 05, Committee of Scientific Research; Poland; Warsaw: 1994.
- [27] Tasto JL, Rhodes WT. Noise immunity of threshold decomposition optoelectronic order-statistics filtering; 1993; Opt. Lett.; 18: 1349-1351.
- [28] Szoplík T, Chalasincka-Macukow K. Towards nonlinear optical processing," in International Trends in Optics; Goodman LW, ed., Academic, Boston: 1991.