

6. Трифонов А. П., Бутейко В. К. Прием сигнала с неизвестной амплитудой и длительностью на фоне белого шума // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника.— 1984.— Т. 27, № 8.
7. Галун С. А., Зюльков А. В. Характеристики обнаружения оптического изображения с неизвестным масштабом // Прием пространственно-временных сигналов на фоне помех.— Воронеж: ВГУ, 1981.

Поступила в редакцию 14 мая 1985 г.

УДК 621.384.3.(088.8)

В. И. БРИТИК, С. Л. ГОРЕЛИК, С. В. КОРОТКОВ,
А. И. КРИВОПУСТОВ, Л. С. ПОГОСТКИН, С. В. ФЕОФАНОВ
(Ленинград)

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕИНВАРИАНТНЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Электронно-оптические преобразования давно используются при обработке изображений с целью повышения их качества, представления в форме, удобной для восприятия оператора, выделения признаков для распознавания образов и т. п. [1, 2]. Преимущества электронно-оптического метода перед оптическими состоят в более гибком управлении параметрами преобразований и в удобной стыковке с электронными, в том числе цифровыми, методами обработки изображений. В то же время сохраняются достоинства, присущие оптическим и другим параллельным методам преобразований, в быстродействии и возможности осуществления операций над изображением на более ранней стадии, что уменьшает влияние различных шумов. Особенно эффективен электронно-оптический метод в реализации пространственно-неинвариантных пространственных фильтров, в том числе локально-адаптивных, анализу которых и посвящена настоящая работа.

Алгоритм формирования электронно-оптического фильтра. Будем исходить из утверждения, что в общем виде выходной сигнал пространственного фильтра в точке входного изображения $g_{\text{вх}}$ с координатами $x_k = k_x h_x$, $y_k = k_y h_y$, где h_x , h_y — шаг дискретизации развертки изображения по осям X и Y ; k_x , k_y — номер элемента разложения по соответствующим осям, можно описать выражением

$$g_{\text{вых}}(k_x, k_y) = \mathcal{P} \{f_j(u_j)\}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где \mathcal{P} — оператор, являющийся функцией n переменных (задает тип фильтра); f_j — функция одной переменной; j — порядковый номер элементарных апертур, из которых синтезируется пространственный фильтр; $u_j = u_j(x_k, y_k)$ — отклик j -й элементарной апертуры (элементарного фильтра). В случае электронно-оптической фильтрации отклик u_j представляет свертку входного сигнала $g_{\text{вх}}(x, y)$ с распределением энергии $\rho_j(x, y)$ в j -й апертуре. Последнее определяется совместным действием функций рассеяния электронно-лучевой трубки $\varepsilon_j(x, y)$ и оптической системы $O(x, y)$ (рис. 1), с помощью которых формируется элементарная апертура, осуществляется управление ее параметрами и сканирование плоскости обрабатываемого изображения. Функция распределения энергии в j -й апертуре параметрически обуславливается яркостью ρ_0 пятна

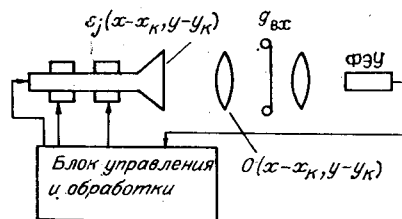


Рис. 1

трубки, размерами сечения α_x , α_y апертуры в направлении осей, ориентацией φ относительно осей сканирования, сдвигами Δ_x , Δ_y относительно точки x_k , y_k . Таким образом, каждая элементарная апертура задается своим набором параметров

$$\{\rho_{0j}; \alpha_{xj}; \alpha_{yj}; \varphi_j; \Delta_{xj}; \Delta_{yj}\} \equiv \{\tau_{kj}\}, k = 1, 2, \dots, 6,$$

управляемых с помощью электронно-оптических преобразований [2]. Выражением (1) описывается большинство используемых на практике пространственных фильтров, как линейных, так и нелинейных.

Удобство такого описания в его адекватности структуре алгоритмов электронно-оптической пространственной фильтрации, включающих в качестве элементарной операции формирование отклика u_j с помощью оптико-электронного преобразования и операции формирования функций f_j и \mathcal{P} электронными (цифровыми или аналоговыми) способами.

Если какой-либо из параметров τ_{kj} или вид функций \mathcal{P} , или f_j изменяются в зависимости от координат x , y обрабатываемого изображения, то такой фильтр становится пространственно-неинвариантным.

Реализация пространственно-неинвариантных фильтров цифровыми методами весьма трудоемка ввиду того, что в этом случае неэффективны алгоритмы быстрых преобразований. Также технически сложно реализовать и управляемые синхронно со сканированием оптические фильтры. В то же время электронно-оптический метод позволяет осуществить управление параметрами τ_{kj} в процессе сканирования без заметного усложнения технической реализации.

Пространственно-неинвариантные электронно-оптические фильтры. Рассмотрим два вида пространственно-неинвариантных фильтров. В первом используется априорная информация о характеристиках системы формирования изображений. Эта информация может быть получена на основании, например, известных (или измеряемых) характеристик оптических, телевизионных или аналогичных им систем формирования и передачи изображений, условий его получения и т. п. В этом случае закон изменения $\tau_{kj}(x, y)$ определяется заранее, записывается в запоминающее устройство и реализуется в процессе сканирования. В другом случае вводится обратная связь от сигнала на выходе пространственного фильтра к системе управления его параметрами. Такой фильтр становится локально-адаптивным, так как его параметры настраиваются на текущий фрагмент обрабатываемого изображения, локализованный в окрестности точки x , y . Выбор критерия, по которому производится адаптация, зависит от цели обработки.

Локальная адаптация по направлению. Рассмотрим, например, часто решаемую при обработке изображений задачу выделения контуров. В общем случае ориентация контурных элементов случайна. Обычно при обработке используют для выделения контуров линейные изотропные фильтры [3], описываемые дифференциальными операторами 1-го или 2-го порядка [4]. Однако такой фильтр оптимален лишь в «среднем» по всему изображению, так как характеристика его усреднена относительно случайного параметра, ориентации контура и не всегда дает достаточно хорошие результаты [5]. Оптимальный адаптивный фильтр, максимизирующий отношение сигнал — шум в окрестности данной точки, может быть реализован только при известной ориентации контура. Поэтому необходимо предварительно измерить ориентацию контура в данной точке и весовую функцию фильтра «вытянуть» вдоль измеренного направления. Эти операции можно провести и в другом порядке: варьировать ориентацией фильтра до получения максимального отклика. При этом используются известные методы, ускоряющие поиск экстремума.

Сигнал на выходе фильтра $P(\alpha)$ в каждой точке изображения является функцией текущей ориентации α «вращающегося» фильтра и состоит из двух составляющих — сигнальной $P_c(\alpha)$ и шумовой $P_n(\alpha)$.

Если считать фон в окрестности данной точки, ограниченной областью задания весовой функции фильтра, изотропным, то шумовая со-

ставляющая сигнала, т. е. реакция фильтра на фон, инвариантна относительно изменения ориентации анизотропного фильтра. Реакция фильтра на объект (т. е. полезная составляющая), которым является отрезок контура, зависит от ориентации фильтра и достигает максимума при совпадении этой ориентации с направлением отрезка контура.

Таким образом, максимум сигнала на выходе фильтра будет соответствовать и максимуму отношения сигнал — шум (принцип согласованной фильтрации). Можно показать, что в первом приближении отношение сигнал — шум в окрестности данной точки увеличивается по сравнению с изотропным фильтром во столько раз, во сколько длина прямолинейного отрезка контура больше элемента разложения (при условии, что «длина фильтра» совпадает с длиной этого отрезка).

Величина локального отношения сигнал — шум станет, очевидно, зависеть от того, насколько точно ориентирован фильтр относительно ориентации отрезка контура. Задача получения наиболее точной оценки ориентации контура может быть рассмотрена следующим образом. Угловая координата α_0 максимума функции $P(\alpha)$, соответствующая наилучшему совпадению ориентации фильтра и отрезка контура, может быть определена с погрешностью [6]

$$\sigma_{\alpha}^2 = \frac{[P'_{\text{ш}}(\alpha)]^2}{[P''_{\text{с}}(\alpha)]^2_{\alpha=\alpha_0}} \quad (2)$$

где черта сверху означает усреднение случайной функции по α . Кроме погрешности (2), обычно имеет место дополнительная погрешность, связанная с дискретным изменением параметра α . Выбор шага дискретизации при переборе по α важен и потому, что от этого зависит в сильной степени скорость обработки. Если сделать шаг достаточно малым, то вероятно существенное снижение производительности системы; если же ограничиться большими значениями, резко ухудшается эффективность фильтрации (она может дать даже худшие результаты, чем при использовании изотропного фильтра, из-за значительного уменьшения амплитуды сигнала $P(\alpha)$ при α , отличных от α_0 (рис. 2, а)). В то же время из (2) следует, что для уменьшения σ_{α}^2 необходимо, чтобы $P(\alpha)$ вблизи α_0 имело наиболее острый максимум (т. е. большую крутизну производной $P'(\alpha)$, которая в точке $\alpha \approx \alpha_0$ близка к нулю). Поэтому требования к минимизации ошибок, обусловленных шумами в изображении и шумами в дискретизации, противоположны. Можно получить более точную оценку положения максимума функции $P(\alpha)$, не уменьшая существенно шага дискретизации, если от оценки α_0 по максимуму сигнала перейти

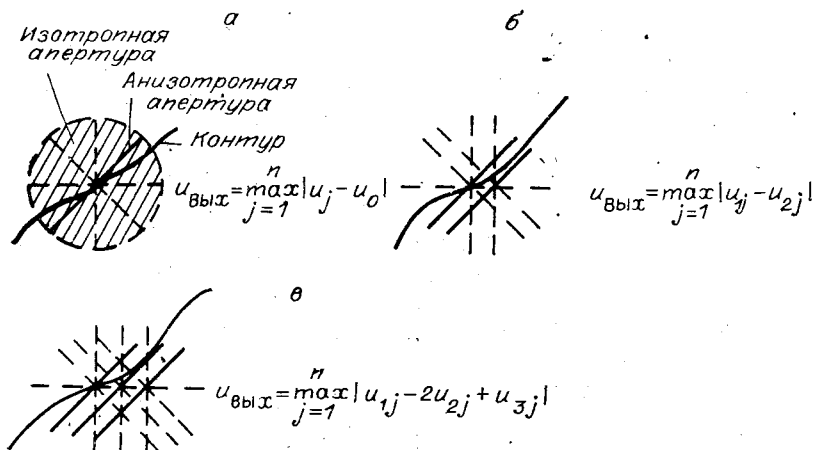


Рис. 2

к оценке по среднему, т. е.

$$\hat{\alpha}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P(\alpha_i) \alpha_i}{\sum_{i=1}^{i=n} P(\alpha_i)}, \quad (3)$$

непрерывных сигналов. Однако для дискретизованных сигналов (как это обычно имеет место) оценивание по апостериорному среднему позволяет более простыми средствами сгладить шумы дискретизации.

При оценке по формуле (3) достаточно ограничиться небольшим числом n отсчетов вблизи максимума. Аналогичные рассуждения могут быть проведены и относительно адаптации фильтра по другим параметрам. Отметим, что функция на выходе фильтра не всегда сепарабельна по различным параметрам, т. е. $P(\alpha, \beta) \neq P_1(\alpha)P_2(\beta)$, что необходимо учитывать при оценке оптимальных значений.

Таким образом, можно утверждать, что оптимальным локально-адаптивным фильтром контуров является анизотропный фильтр, описываемый дифференциальным оператором первого или второго порядка, «длина» весовой функции которого равна среднему значению длины прямолинейных отрезков контуров по всему изображению (если не проводить адаптацию по длине), а ориентация настраивается по критерию максимума отклика фильтра в данной точке.

Техническая реализация. Имеется несколько вариантов технической реализации рассмотренного фильтра. Один из них заключается в следующем. В точке изображения x_k, y_k формируются вращающаяся анизотропная (штриховая) и изотропная расфокусированная апертуры. В качестве выходного сигнала фильтра в анализируемом фрагменте принимается максимальная по модулю величина второй ориентированной под углом α производной, которая находится по величине разностного сигнала от вращающейся анизотропной и изотропной апертур (см. рис. 2, а). Таким образом здесь реализуется знакопеременная весовая функция. В более общем случае сложные весовые функции осуществляются суперпозицией сигналов от нескольких различных апертур, устанавливаемых в каждой точке изображения (2).

Если использовать сигнал от первой ориентированной производной, то следует применять две сдвинутые друг относительно друга штриховые апертуры, сигналы от которых при каждом значении α вычитаются (см. рис. 2, б) [7]. Более точное приближение к оптимальному фильтру для выделения контуров можно получить, используя три сдвинутые вращающиеся апертуры (см. рис. 2, в). Одно из хороших приближений к оптимальному фильтру достигается применением только одной вращающейся штриховой апертуры при формировании отклика фильтра как первых или вторых разностей между сигналами от апертур с «соседними» ориентациями. Если в изображении вместо контуров содержатся линии, ширина которых близка к ширине штриховой апертуры, то оптимальный фильтр для такой линии приближается к согласованному и анализ ведется непосредственно по максимуму сигнала от вращаемой штриховой апертуры.

На рис. 3, а приведен пример обработки фотоизображений локально-адаптивным пространственно-неинвариантным электронно-оптическим фильтром.

Сканирование с использованием обратной связи. Обратная связь может быть введена и на другие параметры фильтра. В частности, одна из интересных возможностей сокращения времени на обработку заклю-

пользуется для выработки сигнала δ_x , δ_y , подаваемого на систему развертки и суммируемого с текущим значением сигнала развертки. На рис. 3, б приведен пример работы следящего электронно-оптического фильтра. Следящий фильтр может использоваться при прослеживании контуров площадных объектов, расположенных на сложном фоне [8]. Такая задача встречается при автоматическом дешифрировании площадных объектов на космических снимках. В картографии при автоматизированной оцифровке расчлененных оригиналов карт, в частности горизонталей местности, может быть также полезен следящий фильтр. Здесь задача упрощается, так как расчлененный оригинал рельефа представляет собой высококонтрастный графический препарат и оптимальный фильтр сводится к согласованному.

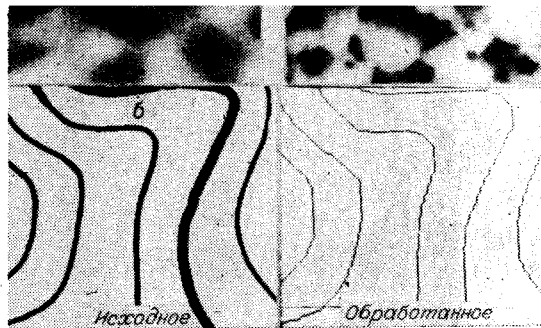


Рис. 3

Адаптация по размерам. В последней задаче полезным оказывается ввести адаптацию по параметрам α_x и α_y считывающей апертуры, определяющим ее размеры. Это связано с возможными колебаниями ширины отслеживаемых линий и дефектами типа разрывов. Алгоритм отслеживания горизонталей, основанный на использовании анизотропной пространственной фильтрации, рассматривался в [9]. Аналогичный алгоритм применялся также и в системах автоматизированной обработки снимков со следами ядерных частиц.

Заключение. Электронно-оптический метод пространственной фильтрации изображений обеспечивает значительные преимущества в простоте технической реализации и в функциональных возможностях при реализации фильтров, параметры которых изменяются в зависимости от координат точки сканирования и от структуры изображения в ее окрестности по сравнению с цифровыми и оптическими методами. Такие фильтры (пространственно-неинвариантные локально-адаптивные) обеспечивают более высокое качество фильтрации изображений. Недостатком рассмотренной реализации пространственных фильтров является возможность использования только в задачах обработки фотоизображений, так как в случае обработки изображений реальных сцен с помощью передающих трубок невозможно требуемое многократное считывание в каждой точке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цуккерман И. И. Преобразование электронных изображений.— М.; Л.: Энергия, 1972.
2. Горелик С. Л., Кац Б. М. Электронно-лучевые трубки в системах обработки информации.— М.: Энергия, 1977.
3. Надоховский Г. В. Фильтрация сигналов при автоматической обработке изображений // Вопросы автоматизации обработки информации.— Томск, 1978.
4. Эндрус Г. Применение вычислительных машин для обработки изображений.— М.: Энергия, 1968.
5. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений.— М.: Сов. радио, 1979.
6. Ван-Трис Г. Теория обнаружения оценок модуляции.— М.: Сов. радио, 1972, т. 1.

7. Погосткин Л. С. Исследование анизотропного пространственного фильтра, реализованного электронно-оптическим методом // Автоматизация процессов управления и обработки информации.— Л.: ВНИИЭлектромаш, 1981.
8. А. с. 943778 СССР. Устройство для прослеживания контуров объектов, расположенных на сложном фоне/ М. Ю. Загорский, А. И. Кривоустов, В. Т. Пивоваров и др.— Оpubл. в БИ, 1982, № 26.
9. Кривоустов А. И., Пивоваров В. Т., Погосткин Л. С., Феофанов С. В. Согласованная пространственная фильтрация протяженных элементов на изображениях // Автоматизация процессов управления и обработки информации.— Л.: ВНИИЭлектромаш, 1981.

Поступила в редакцию 28 мая 1984 г.

УДК 681.327.12

И. Н. КУКЕЛЬ, В. Г. ХАЦИРЕВИЧ, А. К. ЯКУШЕВ
(Минск)

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КООРДИНАТЫ В ПЛАНШЕТНЫХ УСТРОЙСТВАХ ГРАФИЧЕСКОГО ВВОДА

В последнее время (начало 80-х годов) разработчики планшетных устройств ввода в ЭВМ графической информации стали проявлять определенный интерес к устройствам с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) тока опроса координатных шин [1—3]. Например, в устройстве [1] при формировании кода точного отсчета, а в устройстве [3] при формировании кода промежуточного отсчета применена АИМ с линейным законом модуляции тока опроса шин. Согласно способу [4, 5] в этом случае i -я величина тока J опроса и соответствующая i -я координата $R_{уд*i*}$ удаления точки с некоторым пороговым значением индукции от оси шины связаны соотношением

$$B_i = (\mu_0 J_i) / 2\pi R_{уд*i*} = \Delta B = \text{const}, \quad (1)$$

где B_i — суммарный модуль магнитной индукции, создаваемой i -м током опроса шины; μ_0 — магнитная проницаемость воздуха, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Из выражения (1) можно найти:

$$R_{уд*i*} = K J_i, \quad (2)$$

здесь

$$K = \mu_0 / (2\pi \Delta B) \quad (3)$$

— коэффициент пропорциональности, который при $\Delta B = \text{const}$ представляет собой постоянную величину.

Таким образом, координата $R_{уд}$ удаления точки с индукцией ΔB имеет линейную зависимость от тока опроса. Условие $\Delta B = \text{const}$ можно выполнить путем настройки порогового элемента, подключенного к измерительной катушке, на величину

$$\Delta e = L \frac{d\Delta B}{dt},$$

где L — индуктивность катушки.

В пределах элементарного приращения координаты Δx связь между элементарным приращением ΔJ тока опроса и создаваемым им приращением магнитной индукции ΔB будет иметь вид

$$\Delta B = (\mu_0 \Delta J) / 2\pi \Delta x. \quad (4)$$

Подставляя это выражение в соотношение (3), получим

$$K = (\Delta x) / \Delta J. \quad (5)$$