

При задании исходных параметров системы прерывания и степени важности обслуживания запросов каждого из источников можно, используя полученные в работе соотношения, обоснованно назначать глубину прерывания для систем, в которых характер поведения запросов отвечает рассмотренным схемам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Каган, М. М. Каневский. Цифровые вычислительные машины и системы. М., «Энергия», 1973.
2. В. В. Липаев, К. К. Колин, Л. А. Серебровский. Математическое обеспечение управляющих ЦВМ. М., «Сов. радио», 1972.
3. D. van Danzig. Chaines de Markof dans les ensembles abstraits et applications aux processus avec régions absorbantes et au problème des boucles.—“Ann. de J. Inst. H. Poincaré”, 1955, fasc. 3, p. 145—199.
4. Г. П. Климов. Стохастические системы обслуживания. М., «Наука», 1966.
5. Приоритетные системы обслуживания. М., Изд-во МГУ, 1973.
6. М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. Методы теории функций комплексного переменного. М., «Наука», 1965.
7. Ю. Н. Золотухин, Ю. М. Крендель. Об одной системе обслуживания с ограниченной глубиной прерывания.— В кн.: Применение вероятностных методов в системах измерения и контроля. Новосибирск, Изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1972.

Поступила в редакцию 28 июня 1976 г.

УДК 621.391.172

С. Л. ГОРЕЛИК, Б. М. КАЦ

(Ленинград)

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВО ВВОДНЫХ УСТРОЙСТВАХ ЭВМ

Сведения об использовании анизотропных электронных апертур для обработки информации и повышения качества телевизионных изображений известны сравнительно давно. Так, например, штриховая апертура использовалась для уничтожения строчной структуры телевизионного раstra [1] и для анизотропной фильтрации контуров [2], прямоугольную и квадратную апертуры предлагалось применять в передающих трубках с накоплением для увеличения их разрешающей способности [3] и т. п. Однако реальная возможность эффективного использования анизотропных апертур для синтеза сложных электронно-оптических фильтров появилась после того, как были разработаны достаточно простые способы высококачественного формирования и управления формой, размером, ориентацией и положением анизотропной апертуры [4—7].

В настоящей работе рассмотрены методы расчета характеристик электронно-оптических фильтров и принципы применения их в системах обработки изображений. Перспективность электронно-оптических фильтров по сравнению с другими техническими реализациями обусловлена большей гибкостью при перестройках за счет плавного изменения размеров, ориентации, распределения плотности в электронной апертуре. При этом в значительных пределах перестраивается пространственно-частотная характеристика фильтра. Кроме того, поскольку операция свертки при реализации предложенного алгоритма

проводится непосредственно в процессе сканирования изображения, а не после преобразования свет — сигнал, как в случае алгоритмов [8—11], то эффективность пространственной фильтрации существенно возрастает, так как шумы видеосигнала еще не успевают повлиять на изображение.

Пусть задана весовая функция некоторого фильтра в виде функции $\rho(x, y)$, которая может быть как дискретной, так и непрерывной. Сигнал, получаемый от такого фильтра в некоторой точке ξ, η изображения,

$$U(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x - \xi, y - \eta) B(x, y) dx dy, \quad (1)$$

где $B(x, y)$ — распределение энергии в изображении.

Представим $\rho(x, y)$ в виде

$$\rho(x, y) = \sum_{j=1}^n C_j \rho_j(x, y), \quad (2)$$

где C_j — коэффициенты; $\rho_j(x, y)$ — весовые функции некоторых элементарных фильтров. Подставим (2) в (1) и поменяем местами интегрирование и суммирование. Тогда

$$U(\xi, \eta) = \sum_{j=1}^n C_j \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_j(x - \xi, y - \eta) B(x, y) dx dy.$$

Введем обозначение

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_j(x - \xi, y - \eta) B(x, y) dx dy = U_j(\xi, \eta).$$

Тогда

$$U(\xi, \eta) = \sum_{j=1}^n C_j U_j(\xi, \eta), \quad (3)$$

где $U_j(\xi, \eta)$ определяет сигнал в точке (ξ, η) изображения на выходе j -го элементарного фильтра.

Таким образом, произвольный пространственный фильтр может быть представлен в виде суммы некоторых элементарных фильтров. Это позволяет произвести расчет пространственно-частотной характеристики электронно-оптического «аддитивного» фильтра, алгоритм построения которого предложен в [7].

Для вычисления спектра $\rho(\omega_x, \omega_y)$ аддитивных фильтров запишем преобразование Фурье от $\rho(x, y)$:

$$\tilde{\rho}(\omega_x, \omega_y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x, y) e^{-i(\omega_x x + \omega_y y)} dx dy. \quad (4)$$

Подставляя выражение (2) в (4) и изменяя порядок интегрирования и суммирования, получим

$$\tilde{\rho}(\omega_x, \omega_y) = \sum_{j=1}^n C_j \tilde{\rho}_j(\omega_x, \omega_y), \quad (5)$$

где

$$\tilde{\rho}_j(\omega_x, \omega_y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_j(x, y) e^{-i(\omega_x x + \omega_y y)} dx dy$$

— пространственно-частотный спектр j -го элементарного фильтра.

Простейшим электронно-оптическим фильтром является штриховая апертура. Распределение энергии в штриховой апертуре в первом приближении хорошо аппроксимируется двумерным нормальным законом

$$\rho(x, y) = \frac{\beta_1 \beta_2}{\pi} e^{-[\beta_1^2 x^2 + \beta_2^2 y^2]}, \quad (6)$$

спектр которого

$$\tilde{\rho}(\omega_x, \omega_y) = \frac{1}{2\pi} e^{-\left[\frac{\omega_x^2}{4\beta_1^2} + \frac{\omega_y^2}{4\beta_2^2}\right]}.$$

При сканировании изображения штриховой апертурой, так как $\beta_1 \neq \beta_2$, верхние пространственные частоты одного направления будут передаваться лучше, чем другого. Поэтому вращающийся штрих может быть использован для выделения элементов линий и определения их угловой ориентации [2].

Использование штриховой апертуры при измерении одной из координат линий позволяет за счет фильтрующего действия штриха в направлении другой координаты повысить точность единичного отсчета.

Рассмотрим теперь пространственно-частотную характеристику фильтра, образованного наложением элементарных апертур с распределениями

$$\begin{aligned} \rho_1(x, y) &= k_1 e^{-\alpha_1^2(x^2+y^2)}; \\ \rho_2(x, y) &= k_2 e^{-\alpha_2^2(x^2+y^2)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где α_1 и α_2 определяют степень фокусировки апертуры, а параметр $k_m = \alpha_m/\pi$ находится из условия равенства суммарной энергии в первой и второй апертурах. Производя преобразование Фурье выражений (6), (7) и используя формулу (5), получим

$$\tilde{\rho}(\omega_x, \omega_y) = \frac{C_1}{2\pi} e^{-\frac{\omega_x^2 + \omega_y^2}{4\alpha_1^2}} + \frac{C_2}{2\pi} e^{-\frac{\omega_x^2 + \omega_y^2}{4\alpha_2^2}}.$$

Выберем коэффициенты C_1 и C_2 из условия равенства нулю отклика фильтра на равномерном фоне и примем для удобства $C_1 = -C_2 = 1$. Тогда

$$\rho(\omega_x, \omega_y) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{\omega_x^2 + \omega_y^2}{4\alpha_1^2}} \left[1 - e^{-\frac{\omega_x^2 + \omega_y^2}{4} \left(\frac{1}{\alpha_2^2} - \frac{1}{\alpha_1^2} \right)} \right].$$

Если выполняются условия

$$\sqrt{\frac{1}{\alpha_2^2} - \frac{1}{\alpha_1^2}} \ll 2\pi W_x,$$

$$\sqrt{\frac{1}{\alpha_2^2} - \frac{1}{\alpha_1^2}} \ll 2\pi W_y$$

(W_x и W_y — граничные пространственные частоты в сканируемом изображении), то, как доказано в работе [12], рассматриваемый фильтр осуществляет вычисление лапласиана от обрабатываемого изображения.

Следует отметить, что распределение энергии в расфокусированной апертуре отличается от нормального (особенно при больших расфокусировках) и становится более равномерным. Однако можно показать, что это не оказывает существенного влияния на свойства фильтра.

Рассмотрим теперь фильтр, для которого

$$\begin{aligned}\rho_1(x, y) &= \frac{\beta_1 \beta_2}{\pi} e^{-[\beta_1^2(x-\delta x)^2 + \beta_2^2 y^2]}; \\ \rho_2(x, y) &= \frac{\beta_1 \beta_2}{\pi} e^{-(\beta_1^2 x^2 + \beta_2^2 y^2)}; \\ \rho_3(x, y) &= \frac{\beta_1 \beta_2}{\pi} e^{-[\beta_1^2(x-\delta x) + \beta_2^2 y^2]},\end{aligned}\quad (8)$$

где β_1, β_2 определяют анизотропные свойства считывающей апертуры, а δx — смещение апертуры при считывании одного элемента.

Осуществляя преобразование Фурье выражения (8) и используя теорему запаздывания, получим пространственно-частотную характеристику эквивалентного фильтра

$$\tilde{\rho}(\omega_x, \omega_y) = \frac{1}{2\pi} e^{-\left(\frac{\omega_x^2}{4\beta_1^2} + \frac{\omega_y^2}{4\beta_2^2}\right)} (C_1 e^{j\omega_x \delta x} + C_2 + C_3 e^{-j\omega_x \delta x}).$$

Задавая $C_1 = C_3 = 0,5$; $C_2 = 1$, получим

$$\tilde{\rho}(\omega_x, \omega_y) = \frac{1}{2\pi} e^{-\left(\frac{\omega_x^2}{4\beta_1^2} + \frac{\omega_y^2}{4\beta_2^2}\right)} \sin^2 \frac{\omega_x \delta x}{2}.$$

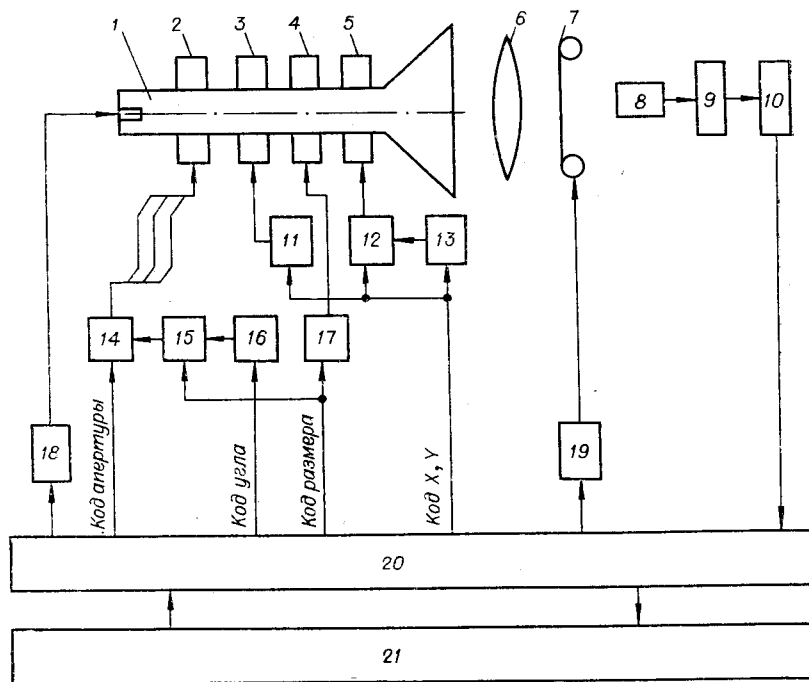
Такой фильтр производит сглаживание верхних пространственных частот в направлении Y и подчеркивание — в направлении X . При синтезе фильтра с помощью электронно-оптических преобразований апертур появляется возможность легко перестраивать его избирательные свойства изменением возбуждений электронных линз, причем сигналы с элементарных апертур $\rho_2(x, y)$ и $\rho_3(x, y)$ могут быть использованы при формировании отклика со следующего элемента разложения в качестве сигналов $\rho_1(x, y)$ и $\rho_2(x, y)$ и т. д. В частности, вращая электронно-оптический штрих-фокус [5], можно изменить ориентацию выделяемых фильтром контуров. Аналогичными свойствами обладает и фильтр, образованный наложением штриховой и круглой апертур с распределениями энергии в пятне в соответствии с выражениями (6) и (7). Его пространственно-частотная характеристика определяется выражением

$$\tilde{\rho}(\omega_x, \omega_y) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{\omega_x^2 + \omega_y^2}{4\alpha_1^2}} \left[1 - e^{-\frac{\omega_y^2}{4} \left(\frac{1}{\alpha_2^2} - \frac{1}{\alpha_1^2} \right)} \right],$$

где α_1 и α_2 — параметры, характеризующие размер элементарных апертур (α_1 — круглой апертуры, α_1 и α_2 — штриховой).

Геометрические преобразования считывающей апертуры представляются полезными и при нелинейной пространственной фильтрации, как, например, в работе [13]. При этом сигнал с каждой точки изображения

$$U(\xi, \eta) = U_1(\xi, \eta) \bar{U}_2(\xi, \eta),$$



где $U_1(\xi, \eta)$ и $U_2(\xi, \eta)$ определяется (1) или (5), а

$$\bar{U}_2(\xi, \eta) = \begin{cases} 1, & \text{если } U_2(\xi, \eta) \geq U_{\text{пор}}; \\ 0, & \text{если } U_2(\xi, \eta) < U_{\text{пор}}. \end{cases}$$

Если $\rho_1(x, y)$ и $\rho_2(x, y)$ выбрать как в [13], то такой фильтр решает задачу выделения крупных объектов на фоне мелких с сохранением мелких деталей в выделяемом объекте.

На рисунке приведена блок-схема системы обработки информации, в которой использованы электронно-оптические преобразования считывающей апертуры. В систему обработки входит датчик видеосигнала типа «бегущий луч», имеющий в своем составе проекционную трубку 1, оптическую систему 6, лентопротяжное устройство 7 со своим блоком управления 19, фотоэлектронный умножитель 8 и видеоусилитель 9. Электронная оптика блока трубки содержит, помимо фокусирующей 4 и отклоняющей 5 систем, корректирующие квадрупольную и аксиально-симметричную линзы 3 для исправления аберраций считывающей апертуры и электронно-оптическую систему из n -полюсных линз, предназначенную для осуществления необходимых геометрических преобразований электронного пучка.

Перестройка электронной апертуры может проводиться либо с помощью автономного программного устройства, либо по командам ЭВМ. Первый случай удобен при построении телевизионных устройств, предназначенных для решения какой-либо одной или весьма узкого класса однотипных задач. Во втором случае (ему соответствует рисунок) управление параметрами электронной апертуры производится по командам ЭВМ 21 через систему обмена информацией 20, связанную с электронно-оптическими линзами через линейные цифроаналоговые преобразователи генератора цифровой развертки 12 и блока управления размером апертуры 17, а также через функциональные полиномиальные цифроаналоговые преобразователи блоков коррекции астигматизма 11 и координатных искажений 13. Управление размерами

и ориентацией элементарных апертур осуществляется с помощью линейного 17, множительного 15 и функционального 16 (синус-косинусного) преобразователей, которые обеспечивают синхронное изменение возбуждений компонентов электронно-оптической схемы в соответствии с кодами размера и угла.

Такое управление позволяет сохранить параметры элементарной апертуры при вращении, если при этом код размера остается постоянным, или, наоборот, угловую ориентацию при изменении только кода размера. Коммутатор 14 в зависимости от кода, указывающего тип элементарной апертуры, переключает возбуждение в соответствующие обмотки системы n -полюсных линз 2.

Сигнал, получаемый с каждой элементарной апертуры, преобразуется в цифровой код с помощью аналого-цифрового преобразователя 10 и через систему обмена информацией 20 передается в ЭВМ 21, где производится вычисление отклика фильтра в соответствии с выражением (3). Такое вычисление иногда удобнее производить до ввода в ЭВМ. В этом случае в систему обмена информацией вводится сумматор, а управление весовыми коэффициентами (кроме знака) осуществляется изменением яркости считывающего пятна через цифро-аналоговый преобразователь 18.

Использование системы обмена информацией со всеми указанными выше функциями и функциональных преобразователей, вообще говоря, необязательно, однако часто позволяет резко разгрузить ЭВМ от большого объема однотипных вычислений при формировании команд управления положением, размером и ориентацией считывающей апертуры и вычислении отклика фильтра.

При обращении рассмотренной телевизионной системы для решения задачи вывода изображений из ЭВМ появляется возможность использования электронно-оптической фильтрации для повышения качества выводимого изображения и упрощения внешних электронных устройств 13. В частности, использование штриховой апертуры вместо устройств, осуществляющих линейную интерполяцию при построении знаков и графиков, не только упрощает техническую реализацию, но и обеспечивает более высокое качество за счет отсутствия строчной структуры. С помощью последовательно перестраиваемых анизотропных апертур можно синтезировать различные знаки, символы и т. п. При выводе многоградационных изображений более высокое качество может быть обеспечено использованием штриховой, квадратной или прямоугольной апертур. Для этого следует сохранять формат выводимых изображений постоянным независимо от количества выводимых элементов изображения, изменяя только соответствующим образом соотношение длины и ширины апертуры пучка электронно-лучевой трубки. Такое построение устройства вывода позволяет обменивать разрешающую способность на количество выводимых градаций, так как фильтрующие свойства анизотропной или изотропной расфокусированной апертуры позволяют сгладить шумы трубки, фотопленки и дискретизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. И. Цуккерман. Электронная оптика в телевидении. М., Госэнергоиздат, 1958.
2. М. Г. Маркович, Л. А. Ольховицкий, И. И. Цуккерман. Электронно-оптическая фильтрация контуров.— «Техника кино и телевидения», 1965, № 7, с. 53.
3. Я. А. Рыфтин. Телевизионная система. М., «Сов. радио», 1967.
4. С. Л. Горелик. Нелинейные геометрические преобразования электронных пучков и изображений.— «Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения», 1972, вып. 3, с. 56.
5. С. Л. Горелик, И. И. Цуккерман. Электронно-оптические устройства системы вращения и отклонения штрих-фокуса.— «ЖТФ», 1972, т. XXXV, № 9, с. 1958.

6. С. Л. Горелик, Б. М. Кац, Л. Н. Палатник. О некоторых возможностях использования ЭЛТ для обработки графической информации.— В кн.: Оптическая и электронно-оптическая обработка информации. М., «Наука», 1974. 103 с.
7. С. Л. Горелик, Б. М. Кац, Л. Н. Палатник. Электронно-оптический синтез пространственно-временных фильтров.— «Техника кино и телевидения», 1972, № 11, с. 53.
8. Г. Г. Вайнштейн. Пространственная фильтрация изображений средствами аналоговой вычислительной техники.— В кн.: Иконика. М., «Наука», 1970.
9. Ф. Д. Межов, В. С. Нощенко, А. В. Серединский. Двумерный фильтр для подавления помех в телевизионном изображении.— «Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения», 1968, вып. 1, с. 19.
10. J. K. Hawkins, G. T. Elerding, K. W. Bixby, P. A. Haworth. Automatic extraction of topographic map intelligence from aerial photos.— "IEEE Intern. Comm. Conf.", 1966, vol. 2, p. 52.
11. В. В. Чернышов. Полифункциональная модель системы рецептивных полей.— «Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения», 1968, вып. 1, с. 35.
12. И. И. Цуккерман. Преобразование электронных изображений. М.—Л., «Энергия», 1972.
13. И. А. Байкин. Пространственная фильтрация изображений путем одновременной развертки апертурами различной формы и размера.— «Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника кино и телевидения», 1969, вып. 4, с. 52.

*Поступила в редакцию 5 января 1976 г.;
окончательный вариант — 29 июня 1976 г.*

УДК 621.378.33

С. П. БОРИСОВСКИЙ, В. В. ТЕСЕЛКИН, С. П. ШЛЫКОВА
(Рязань)

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВОГО ЛАЗЕРА С МЕТАНОВОЙ ЯЧЕЙКОЙ на $\lambda=3,39$ мкм

Введение. Исследование спектра генерации He-Ne газовых лазеров с излучением на $\lambda=3,39$ мкм представляет значительный интерес, поскольку взаимодействие излучения на этой длине волны с метановой поглощающей средой позволяет получить узкие пики мощности, которые можно использовать для стабилизации частоты когерентного излучения [1]. В [2—5] было показано, что если лазер генерирует две частоты, то возможно появление второго пика. Однако экспериментальные зависимости от параметров лазеров не приводились.

В данной работе исследовались энергетические характеристики He-Ne ОКГ с внутренней ячейкой поглощения (CH_4), генерирующего на $\lambda=3,39$ мкм, в зависимости от спектра частот генерации.

Эксперимент. В эксперименте использовался лазер, резонатор которого был образован плоским и сферическим ($R=2$ м) зеркалами. Коэффициенты отражения зеркал составляли 70 и 98% соответственно. Сферическое зеркало крепилось на пьезокорректоре КП-1 с чувствительностью в области линейности характеристики $3 \cdot 10^{-2}$ мкм/В.

Сигнал с фотосопротивления СФ-4 подавался на широкополосный усилитель, затем — на вход осциллографа. При этом на экране осциллографа наблюдалась зависимость мощности излучения лазера от частоты. Развертка осциллографа была синхронизирована с напряжением, подаваемым на пьезокорректор. Активный элемент и ячейка поглощения непосредственно были связаны с откачной системой. Давление метана в ячейке измерялось манометром ВИТ-1А. Измерение давления He-Ne при составлении смеси и наполнении осуществлялось мем-