

поля системы, а два нижних (случай б, в) — спектрам Уолша и Лежандра изображения «креста».

Погрешность матричных преобразований, выполняемых в системе аналоговым способом, зависит главным образом от качества применяемой цилиндрической оптики, точности задания и размерности исходных матриц на транспарантах, неравномерности светимости источника и точности фотоэлектрического считывания. Эти факторы должны приниматься во внимание при разработке оптической системы конкретного назначения.

В заключение отметим, что предложенная система позволяет существенно расширить класс интегральных преобразований, реализуемый некогерентными оптическими методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. A. Heinz, I. O. Artman, S. M. Lee. Matrix Multiplication by Optical Methods.—“Appl. Opt.”, 1970, v. 9, № 9.
2. D. P. Jablonowski, R. A. Heinz, I. O. Artman. Matrix Multiplication by Optical Methods. Experimental Verification.—“Appl. Opt.”, 1972, v. 11, № 1.
3. Е. С. Нежевенко, П. Е. Твердохлеб. Умножение матриц оптическим методом.— «Автометрия», 1972, № 6.
4. О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб, Ю. В. Чугуй. Обобщенный спектральный анализ изображений с использованием силуэтных фильтров.— «Автометрия», 1973, № 5.
5. Б. Е. Кривенков, П. Е. Твердохлеб, Ю. В. Чугуй. Оптический метод кодирования изображений при помощи преобразования Адамара.— «Автометрия», 1974, № 6, № 1.
6. Прайт, Кейн, Эндрюс. Кодирование изображений посредством преобразования Адамара.— «ТИИЭР», 1969, т. 57.
7. Теория связи. Перевод с англ. под ред. Б. Р. Левина. М., «Связь», 1972.
8. Н. Нильсон. Обучающиеся машины. М., «Мир», 1967.

Поступила в редакцию 15 января 1975 г.

УДК 621.391.156

Е. С. НЕЖЕВЕНКО, Б. И. СПЕКТОР

(Новосибирск)

ОПТИЧЕСКОЕ НЕЛИНЕЙНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Линейность оптических систем обработки изображений существенно ограничивает их функциональные возможности. В случаях, когда алгоритм обработки требует осуществления нелинейных преобразований, зачастую прибегают к поэлементному сканированию изображения и вводу в АВМ или ЦВМ [1]. Известны способы параллельного нелинейного преобразования, основанные на применении нелинейных характеристик сред [2, 3]. Недостатками последних являются низкое быстродействие; трудности, связанные с необходимостью смены вида преобразования; невозможность оперативного управления параметрами преобразования и т. п.

В настоящем сообщении описан метод параллельного нелинейного преобразования изображений в линейной оптической системе, основан-

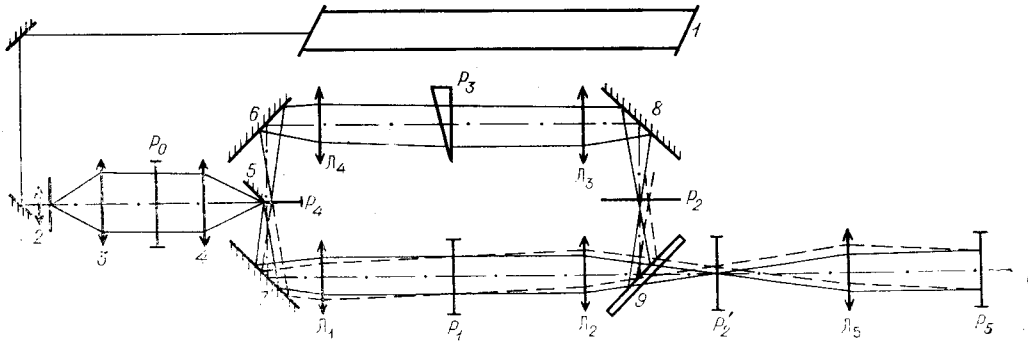


Рис. 1.

ный на разложении нелинейного оператора преобразования $F(\cdot)$ в степенной ряд вида

$$I(x, y) = F[T(x, y)] = \sum_{i=1}^n k_i [T(x, y)]^i, \quad (1)$$

где $T(x, y)$ — функция пропускания по интенсивности транспаранта с преобразуемым изображением; $I(x, y)$ — распределение интенсивности световой волны, соответствующее преобразованному изображению.

Степени функции $T(x, y)$ в линейной оптической системе можно получить, промодулировав транспарантом с функцией пропускания $T(x, y)$ сначала плоскую световую волну, а затем последовательно и многократно проектируя модулированный на предыдущем этапе (цикле) волновой фронт на тот же самый транспарант. Для задания коэффициентов k_i необходимо иметь возможность независимого взвешивания световых пучков, соответствующих различным степеням функции $T(x, y)$, после чего они должны быть просуммированы по интенсивности.

Перечисленные операции удобно проводить в оптической системе, изображенной на рис. 1. Луч лазера 1 расширяется коллиматором 2, 3 и с помощью объектива 4 и зеркала 5 вводится в замкнутую часть оптической системы. Транспорт с пропусканием $T(x, y)$ помещается в плоскости P_1 замкнутой части оптической системы, состоящей из объективов L_1, L_2, L_3, L_4 зеркал 6, 7, 8 и светоделителя 9, в результате чего модулированная световая волна многократно проектируется в плоскость P_1 на исходный транспарант. Таким образом, получаются световые пучки с распределением интенсивности, пропорциональным $T(x, y)$, $[T(x, y)]^2$ и т. д. Для пространственного разделения этих пучков, а также для ввода плоской световой волны в замкнутую часть оптической системы используется свойство когерентного света иметь одно и то же распределение интенсивности при различных фазовых фронтах. Действительно, если в плоскости P_3 установить оптический клин, создающий линейный фазовый набег по координате x , то комплексная амплитуда световой волны после транспаранта с пропусканием $T(x, y)$, освещенного плоской равномерной световой волной с амплитудой A , будет $A\sqrt{T(x, y)}$; после первого цикла прохождения световой волны через замкнутую часть системы — $\mu_3 A [\sqrt{T(x, y)}]^2 \exp(j\alpha x)$ (μ_3 — коэффициент ослабления интенсивности света в замкнутой части системы, α — параметр, зависящий от характеристик оптического клина); после второго цикла — $(\mu_3)^2 A [\sqrt{T(x, y)}]^3 \exp(j2\alpha x)$ и т. д. Соответствующие этим циклам распределения интенсивности света имеют вид

$$I_1 = T(x, y); I_2 = [T(x, y)]^2; \dots; I_i = [T(x, y)]^i.$$

В частотных плоскостях P_2, P_4 , согласно теореме о смещении спектров, все эти пучки будут пространственно разнесены. Однако операцию их независимого взвешивания необходимо производить за пределами замкнутой части системы, что можно осуществить путем установки модуляторов (в простейшем случае — нейтральных светофильтров) после светоделителя 9 в частотной плоскости P'_2 . Взвешенные потоки суммируются с помощью объектива L_5 в плоскости P_5 , образуя распределение интенсивности (1). Для суммирования потоков по интенсивности оптическая длина пути в замкнутой части системы выбирается так, чтобы она превышала длину когерентности лазерного излучения.

Определим коэффициенты пропускания нейтральных светофильтров C_i , необходимые для реализации нелинейного оператора (1) с коэффициентами k_i . Обозначая суммарный коэффициент ослабления интенсивности световой волны объективами L_2, L_5 и светоделителем 9 через μ_c , получим, что после n -го цикла распределение интенсивности в плоскости P_5 будет $I_i(x, y) = A^2 \mu_3^{i-1} \mu_c C_i [T(x, y)]^i$, откуда

$$C_i = \frac{k_i}{\mu_3^{i-1} \mu_c}. \quad (2)$$

Ограничением рассмотренного способа является то, что коэффициенты C_i , а следовательно, и k_i не могут быть отрицательными.

Расширение возможностей системы можно осуществить для изображений, функция пропускания которых описывается выражением

$$T(x, y) = R(x, y) + h; \quad R(x, y) \geq 0, \quad h > 0. \quad (3)$$

Покажем, что результат преобразования такой функции нелинейным оператором вида (1) со знакопеременными коэффициентами $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ эквивалентен результату нелинейного преобразования функции $R(x, y)$ с неотрицательными коэффициентами. Если выполняется условие (3), выражение (1) принимает вид

$$F[R(x, y)] = \sum_{i=0}^n [R(x, y)]^i l_i = \sum_{i=0}^n [T(x, y) - h]^i l_i. \quad (4)$$

Полагая $k_n = 1$ и используя формулы бинома Ньютона, получим

$$F[R(x, y)] = l_m T^m(x, y) + \sum_{i=1}^m T^{m-i}(x, y) \times \left[l_{m-i} + \sum_{j=0}^{i-1} C_{m-j}^{i-j} l_{m-j} h^{i-j} (-1)^{i-j} \right], \quad (5)$$

где C_{m-j}^{i-j} — число сочетаний из $m-j$ по $i-j$. Если теперь коэффициенты при одинаковых степенях $T(x, y)$ в выражениях (1) и (5) приравнять, то получим систему уравнений:

$$k_m = l_m; \quad k_{m-1} = l_{m-1} - C_m^1 h l_m; \quad k_{m-2} = l_{m-2} - C_{m-1}^1 h l_{m-1} + C_m^2 h^2 l_m. \quad (6)$$

Система (6) недоопределена, поскольку содержит $m+1$ уравнений и $m+2$ неизвестных ($m+1$ неизвестных l_i и один параметр h), поэтому почти всегда ее можно решить так, чтобы $l_0, l_1, l_2, \dots, l_m$ были неотрицательными.

Таким образом, нелинейное преобразование функции $T(x, y) - h$ оператором, содержащим только положительные коэффициенты l_i , эквивалентно преобразованию функции $T(x, y)$ нелинейным оператором вида (1), имеющим знакопеременные коэффициенты k_i .

Отметим последовательность операций, необходимых для преобразования изображения $T(x, y)$ нелинейным оператором (1). Разлагаем функцию $F[T(x, y)]$ в ряд Тейлора. Если коэффициенты $k_i \geq 0$ или $k_i \leq 0$ ($i=1, 2, \dots, n$), т. е. знак производной функции $F(\cdot)$ не изменяется, то пропускание нейтральных светофильтров S_i выбирается в соответствии с выражением (2) и дополнительных ограничений на характер функции $F[T(x, y)]$ в этом случае не накладывается. Если же коэффициенты k_i оказываются знакопеременными, то параметры l_i и h находятся из (6) так, чтобы $l_i \geq 0$. В случае когда функция $T(x, y)$ удовлетворяет условию (3), из изображения, описываемого этой функцией, вычитается постоянная величина h и преобразованию подвергается изображение, полученное в результате вычитания. Коэффициенты пропускания светофильтров находятся из выражения (2) заменой k_i на l_i . Отметим некоторые возможности практического применения предложенного метода нелинейного преобразования изображений. Очевидна эффективность его для коррекции фотоснимков, полученных на нелинейном участке характеристической кривой фотоматериала. Если в фотоснимок впечатан сенситометрический клин, то коэффициенты k_i можно подобрать оперативно, без аналитического расчета.

В случае когда функция $T(x, y)$ — реализация некоторого случайного процесса, функционалы вида

$$\iint_{\Omega} [T(x, y)]^i dx dy, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (7)$$

легко вычисляемые в рассмотренной оптической системе (плоскость P'_2), представляют собой оценки статистических моментов этого процесса, по которым можно определить его математическое ожидание, дисперсию, асимметрию, эксцесс и т. д.

Класс преобразований, осуществляемых оптической системой, можно расширить, если транспарант с пропусканием $T(x, y)$ освещать волной, модулированной некоторым изображением $S(x, y)$. В этом случае возможно вычисление функционалов

$$m_i = \iint_{\Omega} S(x, y) [T(x, y)]^i dx dy, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (8)$$

являющихся обобщенными моментами функции $S(x, y)$. Результат преобразования (8) получается в плоскости P_5 , при этом транспарант с изображением $S(x, y)$ устанавливается в плоскости P_0 , а $T(x, y)$ — по-прежнему в плоскости P_1 .

Если обработку световых распределений, соответствующих степеням функции $T(x, y)$, проводить не в плоскости изображений, а в плоскости пространственных частот (P_2, P'_2) путем установки комплексных фильтров на каждое из этих распределений, появляется возможность осуществления операции нелинейной фильтрации изображений [4]

$$\sum_{i=1}^m \iint_{\Omega} [T(x, y)]^i \varphi_i(\eta - x, \xi - y) dx dy, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (9)$$

где φ_i — импульсная передаточная функция i -го фильтра.

Эксперименты по нелинейному преобразованию изображений проводились на установке, внешний вид которой показан на рис. 2. Для удобства считывания световых распределений, производимого щелевым диссектором, в качестве преобразуемых функций были взяты одномерные линейная (рис. 3, а) и квадратичная (рис. 4, а) функции. На рис. 3, 4 (б, в, г) представлены результаты нелинейного преобра-

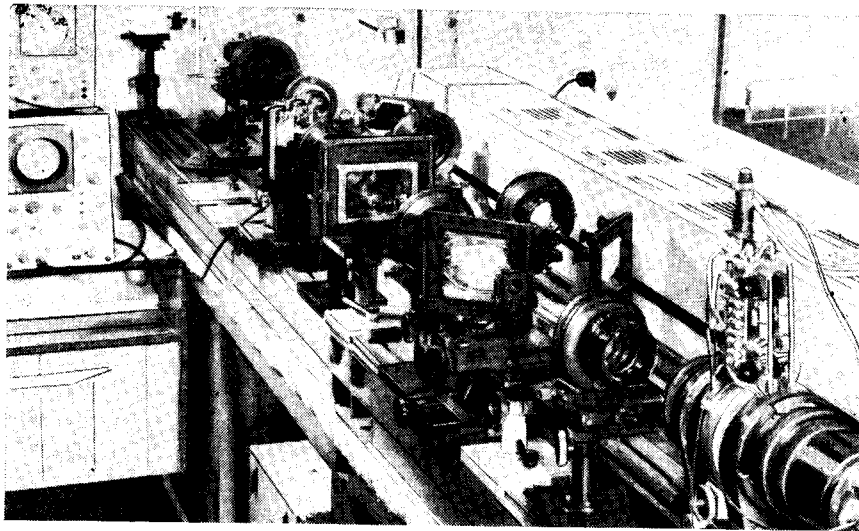


Рис. 2.

зования, соответствующие второй (б), третьей (в) и четвертой (г) степеням преобразуемых функций. Среднеквадратичная погрешность преобразования (с учетом неоднородности чувствительности фотокатода диссектора по полю) составила 3—5%.

Таким образом, нами показано, что использование замкнутой линейной оптической системы дает возможность проведения нелинейных операций над изображениями чисто оптическим методом без применения нелинейных элементов. Точность преобразования, полученная при экспериментальных исследованиях, соответствует обычной точности аналоговых оптических вычислительных устройств.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить канд. техн. наук В. И. Прокопенко и канд. техн. наук В. А. Алексева за помощь, оказанную при проведении экспериментов.

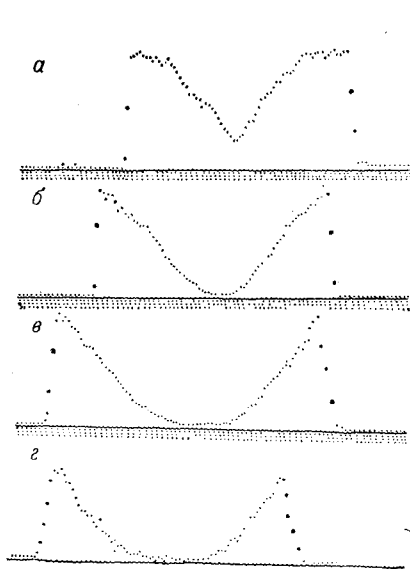


Рис. 3.

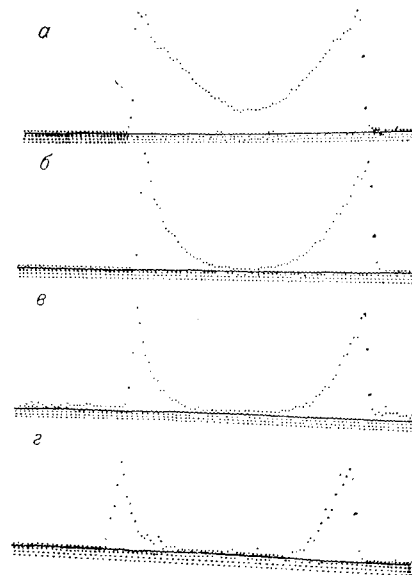


Рис. 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т. Хуанг, В. Шрейбер, О. Третьяк. Обработка изображений.— «ТИИЭР», 1971, т. 59, № 11.
2. A. Vander Lugt, F. B. Rotz. The Use of Nonlinearities in Optical Spatial Filtering.— "Appl. Opt.", 1970, v. 9, № 1.
3. Sing H. Lee. Mathematical Operations by Optical Processing.— "Optical Engineering", 1974, v. 13, № 3.
4. Г. Ван-Трисс. Синтез оптимальных нелинейных систем управления. М., «Мир», 1964.

Поступила в редакцию 29 января 1975 г

УДК 681.332

Э. Г. АВЕТИСОВ, Б. Е. ХАЙКИН, В. С. ХИТРОВА
(Ереван)

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ, ИНВАРИАНТНОЙ К ПОВОРОТУ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Существенным ограничением согласованной фильтрации является неинвариантность фильтров к повороту оптического изображения. Преобразование Фурье [1] обеспечивает только выполнение инвариантности к сдвигу параллельно осям X и Y . Вопрос инвариантности к повороту в когерентных оптических системах имеет самостоятельный интерес в операциях, в которых нужно произвести поворот оптического изображения в реальном масштабе времени.

Инвариантность к повороту при согласованной фильтрации обычно достигается посредством механического поворота изображения или фильтра, применением вращающей призмы [2] или путем формирования согласованного фильтра в виде набора элементарных фильтров, соответствующих различным поворотам изображения, количество которых может быть определено из соотношения

$$n = 2\pi/\alpha_n, \quad (1)$$

где α_n — предельный угол поворота, определяемый на основе анализа сигнала отклика системы оптической согласованной фильтрации. Как было показано [3], с достаточной для практики точностью можно принять, что угол допустимого поворота изображения, некритичный к результату согласованной фильтрации, составляет ориентировочно 3° . В этом случае, если не заданы ограничения к возможным поворотам изображения, требуется 120 фильтров, записываемых при механическом повороте изображения (либо вращении призмы).

Недостатками подобных методов являются либо небольшая скорость при механических поворотах, либо большая информационная емкость при записи набора фильтров с поворотом. Основной недостаток таких систем — невозможность выполнения операции фильтрации, инвариантной к повороту, в реальном масштабе времени.

В настоящей работе предложен метод выполнения согласованной фильтрации, инвариантной к повороту оптического изображения в реальном масштабе времени. Для создания такого метода были использованы две известные предпосылки — возможность мультиплицирования изображений в когерентной оптической системе и возможность поворота одного изображения с помощью оборачивающей призмы. Затем выяснялась возможность осуществления в реальном масштабе времени