

$$S_{23} = |S_{11} - S_{12}| = \|S_{01} + S_{03}\| - \|S_{02} + S_{04}\|;$$

$$S_{24} = |S_{13} - S_{14}| = \|S_{01} - S_{03}\| - \|S_{02} - S_{04}\|.$$

Пусть входное изображение сдвинулось на один шаг вправо, т. е. S_{04} , S_{01} , S_{02} , S_{03} . Аналогично для $i=1$ имеем

$$S_{11} = |S_{04} + S_{02}|, S_{12} = |S_{01} + S_{03}|, S_{13} = |S_{04} - S_{02}|, S_{14} = |S_{01} - S_{03}|,$$

для $i=2$ —

$$S_{21} = |S_{11} + S_{12}| = \|S_{04} + S_{02}\| + \|S_{01} + S_{03}\|;$$

$$S_{22} = |S_{13} + S_{14}| = \|S_{04} - S_{02}\| + \|S_{01} - S_{03}\|;$$

$$S_{23} = |S_{11} - S_{12}| = \|S_{04} + S_{02}\| - \|S_{01} + S_{03}\|;$$

$$S_{24} = |S_{13} - S_{14}| = \|S_{04} - S_{02}\| - \|S_{01} - S_{03}\|.$$

Из этого примера видно, что вычисляемый таким образом спектр не зависит от сдвига входного изображения. Отличием инвариантного спектра от спектров Уолша, Крестенсона и других является невозможность обратного его преобразования в исходное изображение, так как в процессе вычисления теряются знаковые компоненты; однако для распознавания изображения инвариантный спектр, как наиболее просто вычисляемый, может быть широко использован на практике. Результаты экспериментального исследования показывают, что вычисление инвариантного спектра рассматриваемым способом наиболее производительно выполняется в оптическом процессоре [1, 2]. В этом случае входное изображение с числом градаций по пространству 1000×1000 и по интенсивности 100 можно преобразовать в инвариантный спектр за время менее чем 10^{-3} с. Это обеспечивает обработку и распознавание изображения в реальном масштабе времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басов Н. Г., Компанец И. Н., Ли С. К., Мнацаканян Э. А., Морозов В. Н., Попов С. А., Попов Ю. М., Смолов В. Б. Принципы построения оптических процессоров с переменными операторами. — «Квант. электроника», 1978, № 3, с. 526—532.
2. Басов Н. Г., Волчков В. Г., Компанец И. Н., Кулибанов Ю. М., Ли С. К., Мнацаканян Э. А., Морозов В. Н., Парфенов А. В., Попов С. А., Попов Ю. М., Смолов В. Б. Способы реализации оптического процессора с переменными операторами. — «Квант. электроника», 1978, № 3, с. 533—541.

Поступило в редакцию 21 июля 1978 г.

УДК 621.391.156

И. П. МОХУНЬ, К. С. МУСТАФИН, В. И. ПРОТАСЕВИЧ
(Казань)

ОПТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАСШТАБНО-ИНВАРИАНТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Основной операцией, выполняемой когерентной оптической системой обработки информации, является преобразование Фурье. Известно, что фурье-преобразование инвариантно относительно сдвига входной функции, но не инвариантно относительно масштаба. Масштабной инвариантностью обладает другое интегральное преобразование — меллин-преобразование. Меллин-образ функции по мнимой оси записывается как

$$M(ju, jv) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(x, y) x^{-ju-1} y^{-jv-1} dx dy, \quad (1)$$

что эквивалентно фурье-преобразованию функции $f(\exp x, \exp y)$ [1]. Таким образом, реализация меллин-преобразования сводится к преобразованию функции $f(x, y)$ в $\tilde{f}(\exp x, \exp y)$.

Из известных методов осуществления этого преобразования наиболее перспективно, с нашей точки зрения, применение голограмм, синтезированных на ЭВМ [2]. В этой

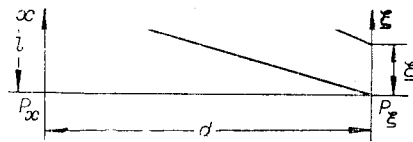


Рис. 1.

работе описана преобразующая голограмма синтезированная по методу Ли, Из-
ванная как интерференционная
грамма.

Для реализации масштабно-инвари-
антного преобразования в одномерном
случае использовалась схема, изображен-
ная на рис. 1. В плоскости P_x устанавли-
вался транспарант T со входными функ-
циями $f(x)$ и $f(\gamma x)$, где γ — масштабный
коэффициент. Вплотную к нему стави-

лась синтезированная голограмма H , производящая требуемое преобразование. На рас-
стоянии d от голограммы в плоскости P_{ξ} располагалась фотопластинка, на которую
регистировались преобразованные изображения. Проявленная фотопластинка по-
мешалась в обычную систему когерентной обработки информации для наблюдения за
спектром Фурье и корреляцией преобразованных изображений.

Для преобразования функции $f(x)$ и $f(\exp x)$ необходимо представить $f(x)$ в ло-
гарифмических координатах, т. е. $\xi = \alpha \ln x$, где x — линейная координата в плоско-
сти P_x , ξ — линейная координата в плоскости P_{ξ} , α — постоянный коэффициент.

Для выполнения этого условия синтезированная голограмма должна отклонять
каждый пучок света, прошедший через транспарант в точке x , на соответствующий
угол r_x . Значение угла отклонения можно определить из выражения (см. рис. 1)

$$\operatorname{tg} r_x = (l - x_0 + x - \xi) / d. \quad (2)$$

Здесь l — смещение начала отсчета линейной координаты x в плоскости P_x от начала
отсчета ξ в плоскости P_{ξ} , x_0 — координата начала синтезированной голограммы.

Из выражения (2) при известном значении r_x находим пространственную частоту
голограммы, т. е.

$$v(x) = \frac{a + x - \alpha \ln x}{\lambda \sqrt{d^2 + [a + x - \alpha \ln x]^2}}, \quad (3)$$

где $a = l - x_0$; λ — длина волны, которая необходима для получения ее уравнения.

В нашем случае бинарная голограмма H со скважностью 2 представляла собой
чередование темных и светлых полос, начало и конец которых находились из уравне-
ния, найденного с учетом (3):

$$\int_{x_0}^x \frac{a + x - \alpha \ln x}{\sqrt{d^2 + [a + x - \alpha \ln x]^2}} dx = \lambda \left(m \pm \frac{1}{4} \right), \quad (4)$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ — номер полосы.

Голограмма нарезалась алмазным резцом на алюминированной плоскопараллель-
ной стеклянной подложке методом, описанным в [3]. Для работы использовались про-
зрачные копии голограммы. Максимальная частота голограммы 100 лин/мм, минималь-
ная — 40 лин/мм. Расчет проводился для $d = 100$ мм, $\alpha = 5$, $a = 5,567$ мм и $\lambda =$
 $= 6,328 \cdot 10^{-4}$ мм.

Ввиду трудоемкости процесса изготовления голограммы нарезался лишь малень-
кий участок длиной 9 мм, что ограничивало размеры и различие масштабов входных
функций. Для экспериментальной проверки был изготовлен транспарант, содержащий
два прямоугольника, отличающихся по одной стороне в 1,5 раза (рис. 2, а).

На рис. 2, б, в приведены спектры преобразованных изображений. Как видно из
рисунков, они практически одинаковы.

Очевидно, что для реализации преобразования по двум координатам можно ис-
пользовать две описанные выше голограммы, расположенные в непосредственной бли-
зости друг от друга с взаимно перпендикулярными направлениями полос. В нашем
случае в качестве двумерных входных функций использовались два треугольника, изоб-
раженных на рис. 3, а. На рис. 3, б, в приведены результаты корреляций их преобразо-
ванных изображений. При этом согласованный фильтр изготавливался с помощью
одного из преобразованных изображений, а затем последовательно предъявлялись оба.
После нормировки полученных результатов (нормировка производилась по нулевому
порядку спектра Фурье) сигналы от первого и второго изображений практически
одинаковы.

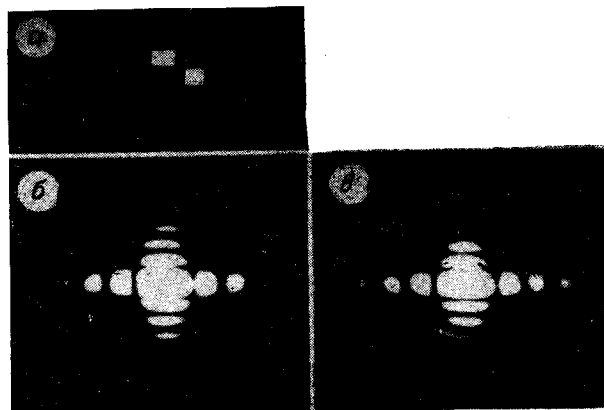


Рис. 2.

Корреляционное поле исследовалось с помощью системы ПТУ (прикладная телеустановка) — осциллограф С1-57, работающей в режиме выделения строки телевизионного изображения.

В предложенной схеме (см. рис. 1) преобразованные изображения, которые снимаются на фотопластинку, находящуюся на расстоянии d от голограммы, искажаются дифракционными эффектами. Степень искажений, очевидно, зависит от расстояния d и наименьшего размера элемента входного изображения.

Для бинарных объектов влияние дифракции можно оценить следующим образом. Для простоты рассмотрим одномерный случай.

Пусть транспарант с пропусканием в виде прямоугольника с шириной $2a$ освещается параллельным пучком. На некотором расстоянии d от него поле, как известно, описывается выражением [4]

$$J(x_0) = 1/2 \{ [C(\xi_2) - C(\xi_1)]^2 + [S(\xi_2) - S(\xi_1)]^2 \}, \quad (5)$$

где x_0 — координата в плоскости, находящейся на расстоянии d от входной функции; $C(\xi)$, $S(\xi)$ — интегралы Френеля;

$$\xi_1 = -(2/\lambda d)^{1/2}(a+x_0), \quad \xi_2 = (2/\lambda d)^{1/2}(a-x_0).$$

Соответствующее распределение интенсивности показано на рис. 4, а.

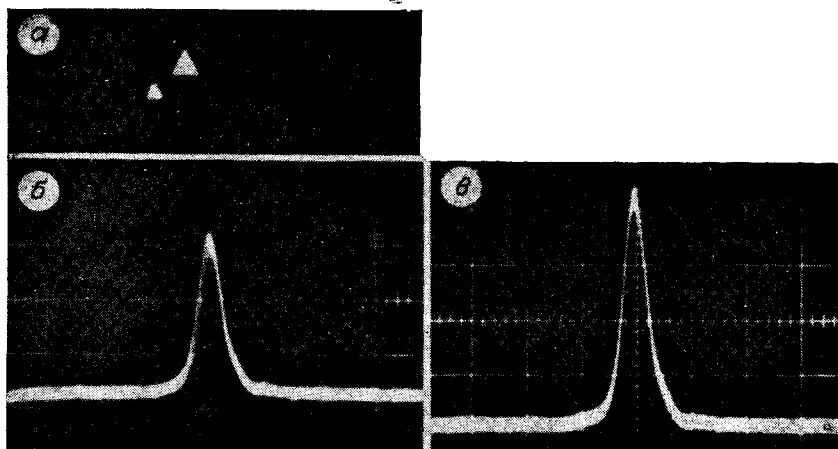


Рис. 3.

Считая функцию передачи фотоматериала линейной, можно записать функцию пропускания полученного транспаранта как $T(x_0) \propto J(x_0)$; $T(x_0)$ можно представить как сумму двух функций $\varphi(x_0) + f(x_0)$ (см. рис. 4, б, в). Вклад $\varphi(x_0)$ в максимум сигнала корреляции невелик, поскольку ее спектр в частотной плоскости занимает узкий участок, так как форма $\varphi(x_0)$ близка к синусоидальной.

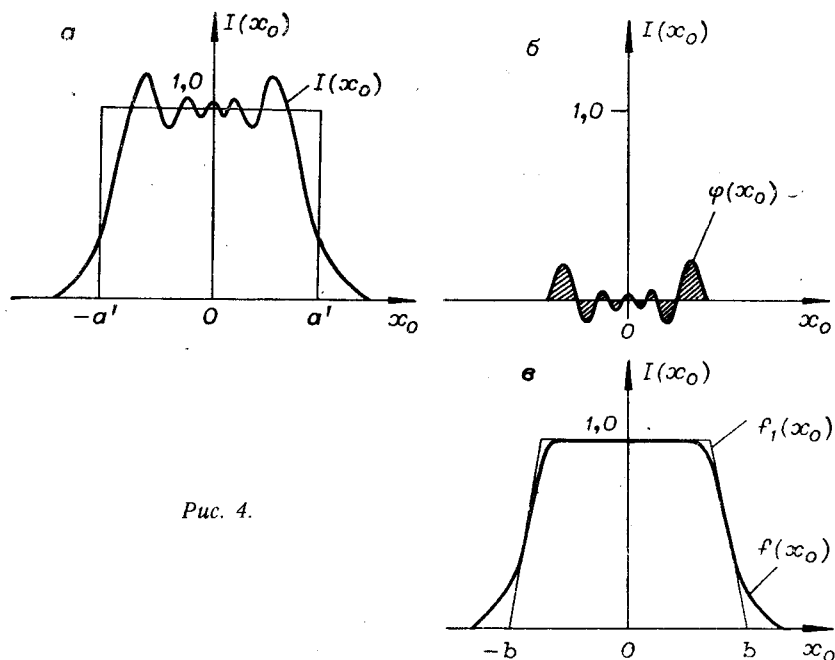


Рис. 4.

Аппроксимируем $f(x_0)$ трапецией $f_1(x_0)$ с нижним основанием $2b$. Фурье-образ $f_1(x_0)$ можно получить из разности Фурье-образов двух равнобедренных треугольников

$$\mathcal{F}\{f_1(x_0)\} = \frac{2 \sin a' \omega}{\omega} - \frac{2\alpha \sin \omega/2\alpha}{\omega}, \quad (6)$$

где ω — пространственная частота Фурье-спектра, α — тангенс угла наклона к боковой стороне трапеции, $a' = b - (1/2\alpha)$.

Таким образом, спектр трапеции представляет собой $\sin c$, промодулированный медленно меняющейся функцией ($a' \gg 1/2\alpha$). В этом смысле можно говорить об адекватности транспаранта $T(x_0)$ транспаранту с пропусканием в виде прямоугольника с шириной $2a' = 2b - (1/\alpha)$.

Для $d = 100$ мм, $a_1 = 1$ и $a_2 = 1,65$ из расчетов по формуле (5) получаем $\alpha_1 = 5,8$; $\alpha_2 = 5,9$; $a'_1 \cong 0,9$; $a'_2 \cong 1,543$, что соответствует изменению масштаба на 11 и 7%. Так как дифракции подвержены оба преобразованных изображения, конечное различие масштабов еще меньше и составляет менее 4%, что приводит к падению сигнала корреляции в пределах 10%. При увеличении размеров входных функций и уменьшении d дифракционные эффекты сказываются еще меньше.

Таким образом, из изложенного ясно, что, используя синтезированные голограммы, можно построить систему обработки, инвариантную к изменению масштаба входных изображений.

В заключение авторы благодарят А. В. Лукина, Р. А. Рафикова за ценные указания и оказанную помощь при синтезировании голограмм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Casesent D., Psaltis D. Scale invariant optical transform.— "Opt. Eng.", 1976, vol. 15, N 3, p. 258—261.
2. Кейсесент Д., Псалтис Д. Новые методы оптических преобразований для распознавания образов.— ТИИЭР, 1977, т. 65, № 1, с. 92—100.
3. Буйнов Г. Н., Ларионов Н. П., Лукин А. В., Мустафин К. С., Рафиков Р. А. Голографический интерференционный контроль асферических поверхностей.— ОМП, 1971, № 4, с. 6—11.
4. Гудмен Д. Ж. Введение в Фурье-оптику. М., «Мир», 1970, с. 101—106.

Поступило в редакцию 20 февраля 1978 г.;
окончательный вариант — 1 августа 1978 г.