

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.378 : 681.332.5

Е. С. НЕЖЕВЕНКО, О. И. ПОТАТУРКИН, П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ
 (Новосибирск)

**ЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
 ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ
 ОБЩЕГО ВИДА**

В последнее время при решении задач обобщенного спектрального анализа, фильтрации, распознавания образов и т. п. находят применение оптические системы, осуществляющие интегральные преобразования следующих двух видов:

$$\iint_{\Omega} f(x, y) \varphi(x, y) dx dy = c; \quad \iint_{\Omega} f(x, y) \varphi(u-x, v-y) dx dy = g(u, v).$$

Первое из них соответствует скалярному произведению двух функций, получаемому путем оптического перемножения и последующего интегрирования, второе — интегральному преобразованию типа свертки с ядром, зависящим от разности аргументов.

Более общие интегральные преобразования в оптических системах практически не выполнялись из-за отсутствия адекватных и простых технических реализаций таких систем. Исключение составляет лишь преобразование Фурье, ядро которого, как известно, не является разностным и более сложным образом зависит от координат входной (x, y) и выходной плоскостей (u, v) .

Настоящая работа посвящена описанию метода синтеза оптических систем, выполняющих интегральные преобразования общего вида

$$\iint_{\Omega} f(x, y) \varphi(x, y, u, v) dx dy = g(u, v). \quad (1)$$

К такого рода преобразованиям сводятся задачи моделирования линейных пространственно неинвариантных систем, преобразования плоскости, обобщенного спектрального анализа, ассоциативного поиска информации и т. п.

Разобьем область задания функции $f(x, y)$ на MN элементов разрешения размером $h \times h$ и усредним ее значения внутри каждого из этих элементов. Тогда функция будет представлена в виде

$$\bar{f}(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left[\frac{1}{h^2} \int_{mh}^{(m+1)h} \int_{nh}^{(n+1)h} f(x, y) dx dy \right] \text{rect} \left(\frac{x - mh - h/2}{h/2} \right) \times \\ \times \text{rect} \left(\frac{y - nh - h/2}{h/2} \right) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{mn} \text{rect} \left(\frac{x - mh - h/2}{h/2} \right) \text{rect} \left(\frac{y - nh - h/2}{h/2} \right), \quad (2)$$

где

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & -1 \leq x \leq 1; \\ 0, & x < -1, x > 1. \end{cases}$$

Аналогичным образом представим ядро интегрального преобразования (1):

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, u, v) &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left[\frac{1}{h^2} \int_{mh}^{(m+1)h} \int_{nh}^{(n+1)h} \varphi(x, y, u, v) dx dy \right] \text{rect} \left(\frac{x - mh - h/2}{h/2} \right) \times \\ &\times \text{rect} \left(\frac{y - nh - h/2}{h/2} \right) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \varphi_{mn}(u, v) \text{rect} \left(\frac{x - mh - h/2}{h/2} \right) \times \\ &\times \text{rect} \left(\frac{y - nh - h/2}{h/2} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Зарегистрируем голографическим способом функцию $\bar{\varphi}(x, y, u, v)$ так, чтобы информация о спектре Фурье каждой из функций $\varphi_{mn}(u, v)$ содержалась на соответствующей голограмме с координатами (m, n) , а при восстановлении этой информации с любой из голограмм все области задания $\varphi_{mn}(u, v)$ совпадали. Если теперь на полученную матрицу голограмм спроецировать изображение, описываемое функцией $f(x, y)$, то каждый из её элементов разрешения восстановит в выходной плоскости соответствующее ему изображение функции $\varphi_{mn}(u, v)$, после суммирования которых получим

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{mn} F^{-1} [F[\varphi_{mn}(u, v)]] \text{rect} \left(\frac{x - mh - h/2}{h/2} \right) \text{rect} \left(\frac{y - nh - h/2}{h/2} \right) dx dy = \\ = \iint_{\Omega} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{mn} \varphi_{mn}(u, v) \text{rect} \left(\frac{x - mh - h/2}{h/2} \right) \text{rect} \left(\frac{y - nh - h/2}{h/2} \right) dx dy, \end{aligned} \quad (4)$$

что с точностью до элемента разрешения соответствует интегральному преобразованию (1). Действительно, устремляя $h \rightarrow 0$ и учитывая, что $\lim_{a \rightarrow 0} \text{rect} \frac{1}{a} \left(\frac{x}{a} \right) = \delta(x)$, а $mh, nh = \text{const}$, получим

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{mn} \varphi_{mn}(u, v) \text{rect} \left(\frac{x - mh - h/2}{h/2} \right) \text{rect} \left(\frac{y - nh - h/2}{h/2} \right) = \\ = \iint_{\Omega} f(t_1, t_2) \varphi(t_1, t_2, u, v) \delta(x - t_1) \delta(y - t_2) dt_1 dt_2 = f(x, y) \varphi(x, y, u, v), \end{aligned}$$

где

$$t_1 = mh; \quad t_2 = nh.$$

Экспериментальное исследование описанного метода проведено на примере синтеза оптической системы, предназначенной для обобщенного спектрального анализа. Схема этой системы приведена на рис. 1, где 1 — лазер; 2 — коллиматор; 3 — транспарант с функцией $f(x, y)$; 4, 5, 7 — объективы; 6 — матрица голограмм; 8 — выходная плоскость. В качестве ядра интегрального преобразования выбрана система функций Уолша 0, 1, 2 и 3-го порядков, поскольку $\varphi_{ij}(x, y) = \varphi(x, y, i\Delta u, j\Delta v)$, где $(\Delta u, \Delta v)$ — элемент разрешения выходной плоскости. Изображение с транспаранта 3 с помощью объективов 4 и 5 проецируется в плоскость голограмм 6. На каждой голограмме зарегистрированы изображения, представляющие собой разложение соответствующих участков области определения $f(x, y)$ по системе функций Уолша. Изображения с каждой голограммы восстанавливаются в одном и том же месте выходной плоскости 8 и при суммировании дают спектр Уолша входного изображения в виде квадратной матрицы. Значениям спектральных компонент соответствуют суммарные световые потоки в пределах элементов разрешения этой матрицы. Объектив 7 выполняет обратное преобразование Фурье. На рис. 2 показаны используемые в эксперименте входные двухградационные изображения, а на рис. 3 их спектры Уолша. Отметим, что функции Уолша задавались с постоянной составляющей таким образом, что они принимали значения 0 и 2. Поэтому наибольшему световому потоку в выходной плоскости соответствует

	a_{00}	a_{10}	a_{11}	a_{11}	a_{02}	a_{12}	a_{21}	a_{13}
f_1	$\frac{1}{1}$	$\frac{0}{0,1}$	$\frac{-0,5}{-0,45}$	$\frac{0}{-0,09}$	$\frac{0,5}{0,43}$	$\frac{0}{-0,06}$	$\frac{-1}{-0,9}$	$\frac{0}{-0,15}$
f_2	$\frac{1}{1}$	$\frac{0}{0,12}$	$\frac{-1}{-0,89}$	$\frac{0}{0,05}$	$\frac{0,5}{0,45}$	$\frac{0}{0,08}$	$\frac{-0,5}{-0,47}$	$\frac{0}{0,1}$

	a_{04}	a_{14}	a_{05}	a_{15}	a_{06}	a_{16}	a_{07}	a_{17}
f_1	$\frac{0,5}{0,52}$	$\frac{0}{-0,15}$	$\frac{0}{0,08}$	$\frac{0}{-0,02}$	$\frac{0}{0,05}$	$\frac{0}{-0,03}$	$\frac{0,5}{0,55}$	$\frac{0}{0,07}$
f_2	$\frac{0}{-0,07}$	$\frac{0}{-0,06}$	$\frac{0}{-0,07}$	$\frac{0}{-0,03}$	$\frac{-0,5}{-0,46}$	$\frac{0}{-0,06}$	$\frac{0,5}{0,43}$	$\frac{0}{0,05}$

Примечание. В числителе указаны расчетные значения коэффициентов, в знаменателе — экспериментальные.

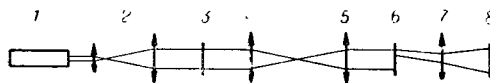


Рис. 1.

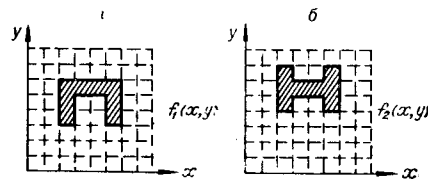


Рис. 2.

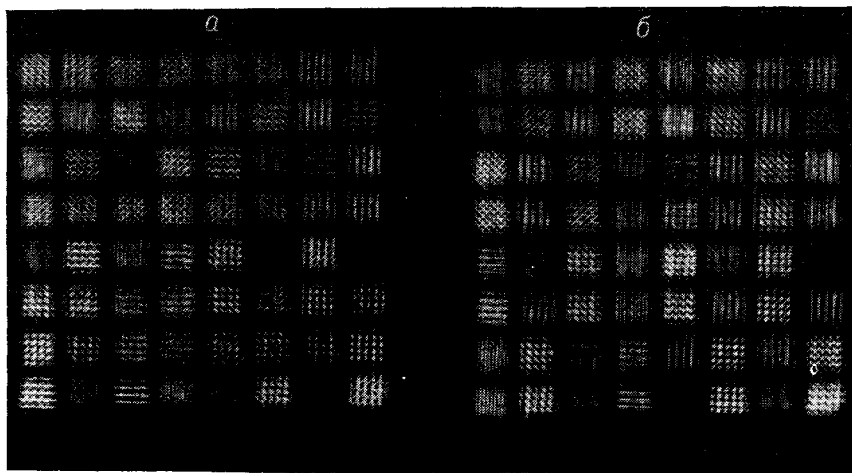


Рис. 3.

нормированное значение коэффициента разложения, равное 1, а нулевому — -1. В таблице приведены экспериментальные и расчетные значения коэффициентов разложения. Точность определения значений спектральных компонент может быть повышена при улучшении условий проведения эксперимента (уменьшение нестабильности экспозиции, неравномерности лазерного пучка и т. п.).

В случае создания устройств автоматической записи матриц голограмм описанный метод может получить широкое распространение.

Поступило в редакцию
22 мая 1972 г.