

**УСТРОЙСТВА ВОСПРИЯТИЯ
И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ,
ОСНОВАННЫЕ НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ
ПРИНЦИПАХ**

Оптические устройства обработки информации

УДК 621.378 : 681.332.5

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

**КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА
ДЛЯ ОБОБЩЕННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА
ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Во многих практических задачах возникает необходимость нахождения коэффициентов разложения (спектральных компонент) функции $f(x, y)$, описывающей изображение, в обобщенный ряд Фурье. Определению подлежат значения:

$$a_{ij} = \iint_{\Omega} f(x, y) \varphi_{ij}(x, y) dx dy; \quad i, j = 0, 1, \dots, n, \dots,$$

где $\varphi_{ij}(x, y)$ — функция разложения выбранной ортогональной системы функций, а Ω — область их задания.

В общем случае число коэффициентов a_{ij} равно числу выборок функции $f(x, y)$. Иногда, правда, исходя из заданной погрешности восстановления исходной функции, оказывается возможным ограничить число таких коэффициентов. Однако более существенное уменьшение их числа может быть достигнуто при применении собственных систем (базисов) функций. Подобные базисы для заданного класса функций могут быть найдены, например, в результате решения корреляционного уравнения и являются базисами Карунена — Лозва [1]. Поскольку описание сигналов и изображений в «сжатом» виде (в смысле числа значимых спектральных компонент по сравнению с числом выборок исходной функции) представляет интерес при их распознавании, передаче, хранении и отображении, то возникает необходимость в разработке методов и средств такого спектрального анализа. Существенную роль может играть и тот факт, что фазочастотная характеристика обобщенного спектра Фурье принимает лишь два значения — 0 и π .

Для решения задач обобщенного спектрального анализа эффективно применяются ЭЦВМ [2]. Однако в силу того, что основными объектами такого анализа являются оптические изображения, в ряде случаев целесообразно использовать оптические анализаторы.

В настоящей работе для обобщенного спектрального анализа применены голографические способы хранения и обработки информации,

которые реализуются средствами когерентно-оптической техники. Рассмотрены возможности и особенности таких способов на примере двух типов когерентно-оптических анализаторов (КОА). В основе первого из них лежит скалярный механизм действия, подобный механизму действия известных устройств [3]; в основе второго — корреляционный механизм Габора [4], который в сравнении с аналогичным механизмом Вандер-Люгта [5] менее зависит от сдвига фильтра относительно оптической оси системы и позволяет экономично использовать динамический диапазон фотоматериала.

КОА скалярного механизма действия. Без ограничения общности рассмотрим одномерный случай. Пусть $f(x)$, $\varphi_i(x)$ — функции пропускания по интенсивности транспарантов, используемых для задания анализируемых изображений и функций разложения. Тогда амплитуды когерентных волн, прошедших через такие транспаранты, пропорциональны соответственно $f^{1/2}(x)$ и $\varphi_i^{1/2}(x)$.

Зарегистрируем голографическим способом на разных участках фотосреды спектры Фурье всех функций разложения. С точностью до слагаемых, не имеющих отношения к дальнейшему рассмотрению, и коэффициента пропорциональности пропускание линейки голограмм будет описываться выражением

$$\sum_i [\Phi_i^{(1/2)}(p + \Delta p_i)] = \sum_i F[\varphi_i^{1/2}(x) \exp(jx\Delta p_i)], \quad (1)$$

где $F[]$ — операция преобразования Фурье; $p = 2\pi u/\lambda f$; x и u — координаты соответственно во входной и частотной плоскостях; Δp_i — сдвиг голограмм относительно оптической оси рассматриваемой системы; f — фокусное расстояние объектива; λ — длина волны света.

Если теперь в оптической системе с фокусным расстоянием f выполнить обратное преобразование Фурье над спектрами, записанными на голограммах, то будем иметь

$$F^{-1}\left\{\sum_i [\Phi_i^{(1/2)}(p + \Delta p_i)]\right\} = \sum_i \varphi_i^{1/2}(y) \exp(jy\Delta p_i). \quad (2)$$

Из (2) следует, что, пробегая световым пучком (с параллельным сдвигом) разные голограммы, в одном и том же месте выходной плоскости, где размещен транспарант с анализируемым изображением, с точностью до фазового множителя последовательно восстановим функции разложения. Если на выходе этого транспаранта интегрировать интенсивность светового распределения, то в результате получим значение необходимых спектральных компонент, т. е.

$$\int_{\Omega} |f^{1/2}(y) \varphi_i^{1/2}(y) \exp(jy\Delta p_i)|^2 dy = \int_{\Omega} f(y) \varphi_i(y) dy. \quad (3)$$

Отклонение светового пучка подобным образом может производиться электрооптическими дефлекторами, что позволяет значительно увеличить скорость анализа. Поскольку информация о функциях разложения записывается на голограммах в спектральном виде, а считывание производится световым пучком, то обеспечивается ее помехоустойчивое и длительное хранение. При этом объем памяти КОА может быть достаточно большим из-за высокой плотности записи информации на существующих голографических фотоматериалах.

Знак спектральных компонент может быть определен, если анализ проводить отдельно по положительным и отрицательным частям функций разложения и затем алгебраически суммировать полученные зна-

чения. Такой способ определения знаков и абсолютных значений спектральных компонент вытекает из тождества

$$\int_{\Omega} f(x) \varphi_i^+(x) dx - \int_{\Omega} f(x) \varphi_i^-(x) dx = \int_{\Omega} f(x) [\varphi_i^+(x) - \varphi_i^-(x)] dx = \int_{\Omega} f(x) \varphi_i(x) dx. \quad (4)$$

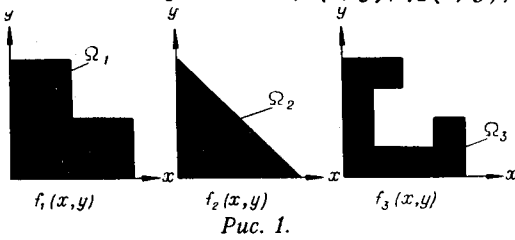
Дальнейшее снижение времени спектрального анализа может быть достигнуто за счет параллельного и одновременного вычисления спектральных компонент. С этой целью световой волной воспользуемся в плоскости транспаранта с анализируемым изображением все функции разложения. После выполнения преобразования Фурье над выходным световым распределением с учетом (2) получим

$$F \left[\sum_i \Phi_i^{1/2}(y) \exp(jy\Delta p_i) f^{1/2}(y) \right] = \sum_i \Phi_i^{(1/2)}(p + \Delta p_i) \otimes F^{(1/2)}(p), \quad (5)$$

где \otimes — операция свертки, а $F^{(1/2)}(p)$ — спектр Фурье функции $f^{1/2}(x)$. Из выражения (5) видно, что в выходной плоскости анализатора получается набор световых распределений (каждое в своей области Q_i), местоположение которых определяется координатой Δp_i . Интегрируя отдельно интенсивности в этих областях, находим, согласно теореме Парсевала, сразу весь набор значений спектральных компонент, т. е.

$$\sum_i \int_{Q_i} |\Phi_i^{(1/2)}(p + \Delta p_i) \otimes F^{(1/2)}(p)|^2 dp = \sum_i \int_{\Omega} f(y) \varphi_i(y) dy. \quad (6)$$

С целью экспериментального исследования КОА рассматриваемого типа использовались двухградационные изображения $f_1(x, y)$, $f_2(x, y)$, $f_3(x, y)$, значения которых равны единице соответственно в областях Ω_1 , Ω_2 , Ω_3 и нулю вне их (рис. 1). Разложение производилось по системе двумерных функций Уолша, которые, как известно, составляют полный ортонормированный базис:



$$f_{\alpha}(x, y) = \sum_{i,j} a_{ij}^{(\alpha)} \varphi_{ij}(x, y); \quad a_{ij}^{(\alpha)} = \iint_{\Omega_{\alpha}} f_{\alpha}(x, y) \varphi_{ij}(x, y) dx dy. \quad (7)$$

На рис. 2 приведена экспериментальная схема анализатора, совмещенная со схемой получения голограмм: 1 — лазер; 2 — коллиматор; 3 и 4 — зеркала; 5 — светоделительная пластина; 6 — дефлектор, производящий параллельный сдвиг светового пучка; 7 — транспарант с изображениями функций Уолша; 8 и 11 — объективы; 9 — проектор; 10 —

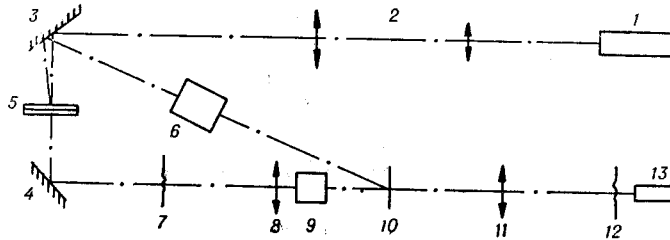


Рис. 2.

Таблица 1

	a_{100}	a_{110}	a_{111}	a_{011}	a_{201}	a_{211}	a_{221}	a_{112}	a_{012}	a_{202}	a_{30}	a_{03}
f_1	$\frac{0,75}{0,77}$	$\frac{0,25}{0,25}$	$\frac{-0,25}{-0,26}$	$\frac{0,25}{0,27}$	$\frac{0}{0,01}$	$\frac{0}{-0,02}$	$\frac{0}{0,01}$	$\frac{0}{-0,02}$	$\frac{0}{0,026}$	$\frac{0}{0,03}$	$\frac{0}{0,03}$	$\frac{0}{0,025}$
f_2	$\frac{0,5}{0,49}$	$\frac{0,25}{0,27}$	$\frac{0}{0,01}$	$\frac{0,25}{0,28}$	$\frac{0,125}{0,14}$	$\frac{0}{-0,03}$	$\frac{0}{-0,016}$	$\frac{0}{0,027}$	$\frac{0,125}{0,096}$	$\frac{0,0625}{0,05}$	$\frac{0,0625}{0,05}$	$\frac{0,0625}{0,1}$
f_3	$\frac{0,5625}{0,55}$	$\frac{0,1875}{0,18}$	$\frac{-0,1825}{-0,21}$	$\frac{0,1875}{0,21}$	$\frac{0,0625}{0,06}$	$\frac{-0,0625}{-0,07}$	$\frac{0,0625}{0,056}$	$\frac{-0,0625}{-0,027}$	$\frac{0,0625}{0,033}$	$\frac{0}{0,02}$	$\frac{0}{0,02}$	$\frac{0}{-0,04}$

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

фотопластина; 12 — транспарант с анализируемым изображением; 13 — фотоэлектронный умножитель. В процессе записи голограмм элементы 6 и 11—13 не использовались. Получаемые в задней фокальной плоскости объектива 8 спектры Фурье от положительной и отрицательной частей функций Уолша регистрировались на отдельных голограммах. Перед регистрацией каждого из изображений транспарант 7 с помощью проектора и юстировочных механизмов устанавливался в одном положении, а фотопластина сдвигалась на размер голограммы.

В процессе анализа сигнальный пучок перекрывался, а восстановление функций разложения в плоскости транспаранта 12 производилось опорным пучком, который с помощью дефлектора пробегал все голограммы. Поскольку на транспаранте 12 зарегистрировано анализируемое изображение, то в результате последовательного восстановления изображений с двух соседних голограмм на выходе ФЭУ получим напряжения, пропорциональные значениям: $\int_{\Omega} f(x) \varphi_i^+(x) dx$; $\int_{\Omega} f(x) \varphi_i^-(x) dx$. Затем, согласно (4), определяем искомые значения спектральных компонент.

Экспериментальные и расчетные нормированные коэффициенты хорошо согласуются между собой (табл. 1).

КОА корреляционного механизма Габора. Предварительно рассмотрим три параллельные плоскости X_0 , X_1 и X_2 . Пусть световая волна в плоскости X_0 описывается функцией $u_0(x_0)$. Тогда, согласно [6],

$$u_2(x_2) = \int_{X_1} u_1(x_1) h(x_1, x_2) dx_1 = \iint_{X_1 X_0} u_0(x_0) h(x_0, x_1) h(x_1, x_2) dx_0 dx_1. \quad (8)$$

С другой стороны,

$$u_2(x_2) = \int_{X_0} u_0(x_0) h(x_0, x_2) dx_0. \quad (9)$$

Здесь $h(x, y)$ — аппаратная функция свободного пространства. Приравняв эти два равенства и учитывая, что они выполняются для любых значений переменных, получаем

$$h(x_0, x_2) = \int_{X_1} h(x_0, x_1) h(x_1, x_2) dx_1. \quad (10)$$

Запишем последовательно голографическим способом на одно и то же место фотосреды функции разложения с разными уг-

лами наклона опорной волны. Тогда амплитудное пропускание результирующей голограммы Френеля пропорционально выражению

$$\sum_i S[\varphi_i(x_1)] \exp(2jk_0 c_i u) = \sum_i [\varphi_i(x_1) \otimes h(x_1)] \exp(2jk_0 c_i u), \quad (11)$$

где $S[\]$ — операция преобразования Френеля; $h(x) = \exp\left(j \frac{k}{2z_0} x^2\right)$; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; z_0 — расстояние между транспарантом с изображением функций разложения и плоскостью голограммы, а $k_0 = k/2z_0$. Заметим, что функции $f(x)$ и $\varphi_i(x)$ в этом случае должны быть действительными и заданы законом изменения амплитудного пропускания транспаранта.

Пусть теперь голограмма освещена наклонной волной, комплексная амплитуда которой пропорциональна преобразованию Френеля от анализируемой функции. За плоскостью голограммы имеем

$$\sum_i S[\varphi_i(x_1)] S[f(x_2)] \exp(2jk_0 c_i u) = \sum_i \iint_{\Omega} f(x_2) \varphi_i(x_1) \exp\{jk_0[(u-x_1)^2 - (u-x_2)^2 - 2c_i u]\} dx_1 dx_2. \quad (12)$$

Выполним над выражением (12) преобразование Фурье:

$$\begin{aligned} \sum_i F[f(x_2) \otimes h(x_2)] (\varphi_i(x_1) \otimes h(x_1)) \exp(2jk_0 c_i u) &= \sum_i \iint_{\Omega} \int_{-\infty}^{\infty} f(x_2) \varphi_i(x_1) \times \\ &\times \exp\{jk_0[(x_1-u)^2 - (x_2-u)^2 - 2c_i u - 2ux]\} dx_1 dx_2 du = \sum_i \iint_{\Omega} \int_{-\infty}^{\infty} f(x_2) \times \\ &\times \varphi_i(x_1) \exp\{jk_0[x_1^2 - x_2^2 - 2(x_1 - x_2 - c_i - x)u]\} dx_1 dx_2 du = \sum_i \iint_{\Omega} f(x_2) \times \\ &\times \varphi_i(x_1) \exp\{jk_0[x_1^2 - x_2^2]\} \delta(x_1 - x_2 - c_i - x) dx_1 dx_2 = \sum_i \int_{\Omega} f(x_2) \varphi_i(x_2 - \\ &- c_i - x) \exp\{jk_0[(x_2 - x - c_i)^2 - x_2^2]\} dx_2, \end{aligned} \quad (13)$$

где $x = \frac{z_0}{f} x_3$; f — фокусное расстояние объектива, выполняющего это преобразование. В точках $x = -c_i$ получаем

$$\sum_i \int_{\Omega} f(x_2) \varphi_i(x_2) dx_2, \quad (14)$$

что с точностью до постоянного фазового множителя соответствует набору коэффициентов разложения в обобщенный ряд Фурье $f(x)$ по системе $\varphi_i(x)$. Знаки спектральных компонент определяются согласно (4).

Экспериментальная схема анализатора приведена на рис. 3, где 1 — лазер; 2 — коллиматор; 3 и 4 — зеркала; 5 — светоделительная пластина; 6 — матрица линз для формирования точечных источников; 7 — объектив; 8 — транспарант с одной из функций разложения; 9 — фотопластина с голограммой Френеля; 10 — объектив; 11 — матрица фотоприемников. В процессе записи точечные источники, сформированные матрицей линз, дают сферические волны, которые с помощью объектива 8 преобразуются в плоские волны с разными углами наклона относительно оптической оси системы. Голограмма снималась для шести функ-

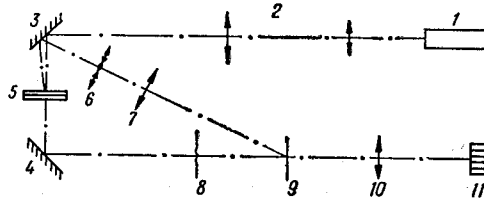


Рис. 3.

ций, являющихся положительными и отрицательными частями функций Уолша $\varphi_{10}(x, y)$, $\varphi_{11}(x, y)$, $\varphi_{01}(x, y)$. В процессе анализа опорный луч перекрывался, а вместо транспаранта 9 помещался транспарант с анализируемым изображением. С помощью объектива 11 осуществлялось преобразование Фурье и в плоскости 12 считывались значения спектральных компонент. Эти значения вместе с расчетными приведены в табл. 2. Видно, что они также хорошо согласуются между собой.

Т а б л и ц а 2

	a_{10}^+	a_{10}^-	a_{11}^+	a_{11}^-	a_{01}^+	a_{01}^-
f_1	$\frac{0,5}{0,5}$	$\frac{0,25}{0,287}$	$\frac{0,25}{0,29}$	$\frac{0,5}{0,475}$	$\frac{0,5}{0,48}$	$\frac{0,25}{0,26}$
f_2	$\frac{0,375}{0,394}$	$\frac{0,125}{0,12}$	$\frac{0,25}{0,29}$	$\frac{0,25}{0,28}$	$\frac{0,375}{0,37}$	$\frac{0,125}{0,122}$

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

Синтез изображений. Достоинством рассмотренных выше методов обобщенного спектрального анализа является возможность синтеза изображений по известной ортогональной системе функций и соответствующему ей набору спектральных компонент. Действительно, освещая линейку (матрицу) голограмм [см. (1)] набором параллельных плоских волн, интенсивность которых равна значениям соответствующих спектральных компонент, из (2) получим

$$\sum_i |a_i^{1/2} \varphi_i^{1/2}(y) \exp(jy\Delta\rho_i)|^2 = \sum_i a_i \varphi_i(y) = f(y). \quad (15)$$

Из (15) видно, что синтез изображений в КОА скалярного механизма действия можно производить для функций, имеющих лишь положительные значения спектральных компонент.

Возможность синтеза изображений с использованием КОА корреляционного механизма Габора вытекает из того, что амплитуды точечных источников, создающих опорные волны, модулируются пропорционально соответствующим значениям спектральных компонент и ими освещается голограмма с пропусканием, пропорциональным выражению (11). При этом, как следует из (13), точечные источники должны быть расположены друг от друга на расстояниях, превышающих максимальную ширину корреляционных функций. Из выражения, комплексно сопряженного с (11), следует

$$\begin{aligned} \sum_i a_i [\varphi_i(x_1) \otimes h(x_1)] \otimes h^*(x_1) &= \sum_i a_i \varphi_i(x_1) \otimes h(x_1) \otimes h^*(x_1) = \sum_i a_i \times \\ &\times \varphi_i(x_1) \otimes \delta(x_1) = \sum_i a_i \varphi_i(x_1) = f(x_1), \end{aligned} \quad (16)$$

где $\delta(x)$ — дельта-функция Дирака. Из (16) видно, что подобный способ синтеза изображений справедлив для функций, имеющих произвольные знаки спектральных компонент.

Заключение. Рассмотренные когерентно-оптические анализаторы обладают большой емкостью памяти и высоким быстродействием анализа, а также повышенной помехоустойчивостью, обусловленной тем, что информация о функциях разложения регистрируется и хранится в спектральном виде. Кроме того, с помощью таких КОА возможен

синтез изображений по набору спектральных компонент и соответствующей им системе функций разложения.

Представляется, что указанные свойства КОА могут быть использованы при решении задач сжатия, восстановления и отображения информации, распознавания образов и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Ватанабе. Разложение Карунена — Лозва и факторный анализ.— В сб. «Автоматический анализ сложных изображений». Под. ред. Э. М. Бравермана. М., «Мир», 1969.
2. Прайт, Кейн, Эндрюс. Кодирование изображений посредством преобразования Адамара.— ТИИЭР, 1969, т. 57, № 1.
3. Катрона, Лейф, Палермо, Парчелло. Оптические системы фильтрации и обработки сигналов.— Зарубежная радиоэлектроника, 1962, № 10.
4. Д. Габор. Ассоциативная голографическая память.— Зарубежная радиоэлектроника, 1970, № 4.
5. A. Yander Lugt, F. B. Rotz, A. Klooster. Character-reading by optical spatial filtering.— Optical and Electro-optical Information Processing, 1965.
6. Дж. Гудмен. Введение в Фурье-оптику. М., «Мир», 1970.

*Поступила в редакцию
9 марта 1972 г.*
