

ный метод имеет два серьезных недостатка — высокая стоимость и проблема синхронного считывания. Огромный шаг в решении обеих проблем был достигнут разработкой новой трубки «бивикон», которая представляет собой, в сущности, двухплушечный видикон со щелевой мишенью. Так как лучи пушек отклоняются общим полем, то легко достигается отличная синхронность при считывании. Кроме того, поскольку необходима одна отклоняющая система и одна фокусирующая катушка, а требования к разрешению менее жестки, чем для одиночной видиконной цветной камеры, цена бивиконной камеры сравнима с ценой соответствующей однокадровой цветной камеры.

Оценка экспериментальных образцов «бивиконов» в системе голотайпа показала, что их частотная характеристика является плоской до 4 МГц (при мощности лазера в 1 мВт) и что взаимодействие между мишенями не превышает 1% при точности регистрации кадра до 1%.

Хотя «бивикон» был разработан специально для системы голотайп, очевидно, что эта новая трубка будет успешно применяться в других работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. C. Urbach and R. W. Meier. Appl. Opt., 1969, v. 8, 2269.
2. W. T. Cathey. J. Opt. Soc. Am., 1966, v. 56, 1167.
3. R. A. Bartolini, W. J. Hannan, D. Karlsons and M. Lurie. Appl. Opt., 1970, v. 9, 2283.
4. E. N. Leith and J. Upatnieks. J. Opt. Soc. Am., 1964, v. 54, 1295.
5. H. J. Gerritsen, W. J. Hannan and E. J. Ramberg. Appl. Opt., 1968, v. 7, 2301.
6. A. H. Firester, E. C. Fox, T. E. Gayeski, W. J. Hannan and M. Lurie. RCA Review, March 1972, v. 33.
7. P. C. Goldmark. Color Electronic Video Recording.—J. SMPTE, Aug. 1970, v. 79, p. 677.

Поступила в редакцию 16 апреля 1973 г.

УДК 681.332 : 535.317.2

О. И. ПОТАТУРКИН, П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ, Ю. В. ЧУГУИ

(Новосибирск)

ОБОБЩЕННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛУЭТНЫХ ФИЛЬТРОВ

Важными элементами спектральных анализаторов, рассмотренных ранее в [1], являются полутоновые фильтры-транспаранты, используемые для задания двумерных функций разложения. Получение таких транспарантов, как известно из [2], связано с существенными технологическими трудностями, что стимулировало интерес к двухградационным силуэтным фильтрам и их применению в оптических устройствах обработки одномерных сигналов [3—5].

В настоящей работе показано, что силуэтные фильтры могут быть с успехом применены и для целей обобщенного спектрального анализа изображений. Такая возможность следует из того, что двумерные функции большинства известных систем разложения могут быть представлены в виде произведения двух одномерных, т. е.

$$\varphi_{ij}(x, y) = \varphi_i(x) \varphi_j(y), \quad (1)$$

и что каждая из составляющих $\varphi_i(x)$ и $\varphi_j(y)$ может быть задана на прозрапанте в двухградационном силуэтом виде.

Процесс получения таких фильтров прост, поскольку предполагает графическое построение функций $\varphi_i(x)$ и $\varphi_j(y)$ в виде соответствующих силуэтов с последующим репродуцированием. За счет возможности более точного их изготовления повышается точность спектрального анализа.

Использование силуэтных фильтров в целях обобщенного спектрального анализа возможно как в когерентных, так и в некогерентных системах. Однако в когерентных системах на точность анализа существенное влияние оказывают фазовые шумы, а на стадии получения амплитудного распределения света, пропорционального той или иной составляющей произведения (1), возникают трудности. Эти недостатки исключаются в случае применения расфокусированных (по одной координате) некогерентных оптических систем [6]. Именно такие системы рассматриваются ниже.

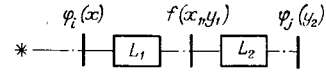


Рис. 1.

Описание способа анализа. В некогерентных оптических системах возможно задавать лишь положительные функции, поэтому нами предполагается, что спектральный анализ проводится отдельно по положительным и отрицательным частям функций разложения. Знак и абсолютное значение спектральных компонент будем определять, согласно тождеству

$$\begin{aligned} a_{ij} &= a_{ij}^{++} - a_{ij}^{+-} - a_{ij}^{-+} + a_{ij}^{--} = \iint_{\Omega} f(x, y) \varphi_i^+(x) \varphi_j^+(y) dx dy - \\ &- \iint_{\Omega} f(x, y) \varphi_i^+(x) \varphi_j^-(y) dx dy - \iint_{\Omega} f(x, y) \varphi_i^-(x) \varphi_j^+(y) dx dy + \\ &+ \iint_{\Omega} f(x, y) \varphi_i^-(x) \varphi_j^-(y) dx dy = \iint_{\Omega} f(x, y) \varphi_i(x) \varphi_j(y) dx dy, \end{aligned} \quad (2)$$

где $f(x, y)$ — анализируемая функция; Ω — область ее определения; $\varphi_i = \varphi_i^+ - \varphi_i^-$.

Рассмотрим оптическую систему L_1 (рис. 1) с импульсным откликом по интенсивности

$$h_1(x - x_1, y - y_1) = \delta(x - x_1) \text{rect}\left(\frac{y - y_1}{l_1}\right), \quad (3)$$

где $\delta(z)$ — дельта-функция Дирака;

$$\text{rect}(z) = \begin{cases} 1; & |z| \leq 1/2; \\ 0; & \text{в остальной области.} \end{cases}$$

Если во входной плоскости такой системы помещать поочередно прозрапанты с положительной и отрицательной частями функций разложения, обозначенными для краткости единым символом $\varphi_i^{\pm}(x)$ и заданными в виде силуэтных изображений,

$$\Phi_i^{\pm}(x, y) = \begin{cases} 1; & a \leq x \leq b, 0 \leq y \leq \varphi_i^+(x), -\varphi_i^-(x) \leq y \leq 0; \\ 0; & \text{в остальной области,} \end{cases} \quad (4)$$

то на выходе получим световое распределение, пропорциональное

$$\Phi_i^{\pm}(x, y) \otimes \delta(x) \text{rect}\left(\frac{y}{l_1}\right) = \int_a^b dx \delta(x - x_1) \int_0^{\varphi_i^+(x)} \text{rect}\left(\frac{y - y_1}{l_1}\right) dy, \quad (5)$$

где \otimes — символ операций свертки. Для

$$-c_i = \left[-\frac{l_1}{2} + \max\{\varphi_i^-(x)\} \right] \leq y_1 \leq \left[\frac{l_1}{2} - \max\{\varphi_i^+(x)\} \right] = d_i$$

выражение (5) имеет вид

$$\int_a^b dx \delta(x - x_1) \int_0^{\varphi_i^\pm(x)} dy = \varphi_i^\pm(x_1), \quad (6)$$

что эквивалентно световой «полосе» шириной $c_i + d_i$ с интенсивностью, изменяющейся вдоль оси X_1 в соответствии с $\varphi_i^+(x_1)$ или $\varphi_i^-(x_1)$ и постоянной вдоль оси Y_1 .

Пусть выходная плоскость системы L_1 будет входной для оптической системы L_2 с импульсным откликом

$$h_2(x_1 - x_2, y_1 - y_2) = \text{rect}\left(\frac{x_1 - x_2}{l_2}\right) \delta(y_1 - y_2). \quad (7)$$

Поместив в эту плоскость транспарант с анализируемым изображением $f(x_1, y_1)$, на выходе системы L_2 имеем

$$f(x_1, y_1) \varphi_i^\pm(x_1) \otimes \text{rect}\left(\frac{x_1}{l_2}\right) \delta(y_1) = \iint_{\Omega(x_1, y_1)} f(x_1, y_1) \varphi_i^\pm(x_1) \text{rect}\left(\frac{x_1 - x_2}{l_2}\right) \times \\ \times \delta(y_1 - y_2) dx_1 dy_1, \quad (8)$$

где $\Omega(x_1, y_1) \in \begin{cases} a \leq x_1 \leq b \\ -\min c_i \leq y_1 \leq \min d_i \end{cases}$ — область определения функции

$f(x_1, y_1)$. Для $-\frac{l_2}{2} + \max_{x_1} \{\Omega^-(x_1, y_1)\} \leq x_2 \leq \frac{l_2}{2} - \max_{x_1} \{\Omega^+(x_1, y_1)\}$, где $\max_{x_1} \{\Omega^+(x_1, y_1)\}$ — максимальный размер области определения функции $f(x_1, y_1)$ в положительной части оси X_1 , а $\max_{x_1} \{\Omega^-(x_1, y_1)\}$ — в отрицательной, выражение (8) можно представить

$$\iint_{\Omega(x_1, y_1)} f(x_1, y_1) \varphi_i^\pm(x_1) \delta(y_1 - y_2) dx_1 dy_1 = \int_{\Omega(x_1, y_2)} f(x_1, y_2) \varphi_i^\pm(x_1) dx_1, \quad (9)$$

что эквивалентно световой «полосе» с интенсивностью, изменяющейся вдоль оси Y_2 по закону (9) и постоянной вдоль оси X_2 .

Если теперь в выходной плоскости системы L_2 помещать поочередно транспаранты с положительной и отрицательной частями функции разложения $\varphi_j^\pm(y_2)$, заданными в силуэтном виде аналогично (4), и проинтегрировать результирующий световой поток, получим одно из значений

$$\iint_{\Omega(x_1, y_2)} \left\{ \int_0^{\varphi_j^\pm(y_2)} f(x_1, y_2) \varphi_i^\pm(x_1) dx_2 \right\} dx_1 dy_2 = \\ = \iint_{\Omega(x_1, y_2)} f(x_1, y_2) \varphi_i^\pm(x_1) \varphi_j^\pm(y_2) dx_1 dy_2 = a_{ij}^{\pm\pm}. \quad (10)$$

Эти значения являются исходными для определения спектральных компонентов по формуле (2).

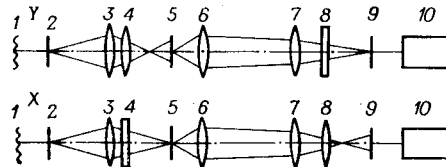


Рис. 2.

Таким образом, оптическая система, включающая системы L_1 и L_2 с импульсными откликами (3) и (7) и фильтры с силуэтными изображениями функций разложения, размещенными соответственно во входной и выходной плоскостях, обеспечивает вычисление значений спектральных компонент a_{ij} функции $f(x, y)$ по базису $\{\varphi_i(x) \varphi_j(y)\}$.

Таблица 1

	a_{00}	a_{10}	a_{01}	a_{20}	a_{22}	a_{02}	a_{11}	a_{11}	a_{11}	a_{20}	a_{11}	a_{05}
f_1	$\frac{0,75}{0,75}$	$\frac{0,3125}{0,32}$	$\frac{0,3125}{0,317}$	$\frac{-0,094}{-0,09}$	$\frac{-0,035}{-0,03}$	$\frac{-0,094}{-0,095}$	$\frac{0,176}{0,173}$	$\frac{0,176}{0,18}$	$\frac{0,176}{0,18}$	$\frac{0,09}{0,08}$	$\frac{0,09}{0,08}$	$\frac{0,09}{0,094}$
f_2	$\frac{0,5}{0,5}$	$\frac{0,166}{0,173}$	$\frac{0,166}{0,16}$	$\frac{-0,125}{-0,11}$	$\frac{-0,0125}{-0,02}$	$\frac{-0,125}{-0,13}$	$\frac{0,02}{0,01}$	$\frac{0,02}{0,015}$	$\frac{0,02}{0,015}$	$\frac{0,062}{0,05}$	$\frac{0,062}{0,05}$	$\frac{0,062}{0,065}$
f_3	$\frac{0,5625}{0,56}$	$\frac{0,225}{0,23}$	$\frac{0,225}{0,23}$	$\frac{-0,184}{-0,175}$	$\frac{-0,032}{-0,026}$	$\frac{-0,184}{-0,2}$	$\frac{0,034}{0,03}$	$\frac{0,034}{0,035}$	$\frac{0,034}{0,035}$	$\frac{0,067}{0,058}$	$\frac{0,067}{0,058}$	$\frac{0,067}{0,055}$

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

Таблица 2

	a_{00}	a_{10}	a_{01}	a_{20}	a_{22}	a_{02}	a_{11}	a_{11}	a_{11}	a_{20}	a_{11}	a_{05}
f_1	$\frac{0,75}{0,75}$	$\frac{0,25}{0,25}$	$\frac{0,25}{0,24}$	$\frac{0}{0,01}$	$\frac{0}{-0,007}$	$\frac{0}{-0,005}$	$\frac{0}{0,012}$	$\frac{0}{0,008}$	$\frac{0}{0,012}$	$\frac{0}{-0,01}$	$\frac{0}{-0,01}$	$\frac{0}{0,01}$
f_2	$\frac{0,5}{0,5}$	$\frac{0,25}{0,255}$	$\frac{0,25}{0,25}$	$\frac{0,125}{0,12}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,125}{0,13}$	$\frac{0}{0,01}$	$\frac{0}{-0,009}$	$\frac{0}{0,01}$	$\frac{0}{-0,0005}$	$\frac{0}{-0,0005}$	$\frac{0}{0,005}$
f_3	$\frac{0,5625}{0,56}$	$\frac{0,1875}{0,19}$	$\frac{0,1875}{0,179}$	$\frac{0,0625}{0,06}$	$\frac{0,0625}{0,065}$	$\frac{0,0625}{0,052}$	$\frac{0}{-0,01}$	$\frac{0}{0,015}$	$\frac{0}{-0,01}$	$\frac{0}{-0,07}$	$\frac{0}{-0,07}$	$\frac{0}{-0,01}$

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

Результаты экспериментов. Исследование описанного метода проводилось с помощью оптической системы, схема которой приведена на рис. 2, где 1 — некогерентный источник света; 2 — транспарант с силуэтом функции $\varphi_i(x)$; 3, 6, 7 — сферические объективы; 4, 8 — цилиндрические объективы; 5 — транспарант с анализируемым изображением; 9 — транспарант с силуэтом функции $\varphi_j(y)$; 10 — фотоприемник. При некогерентном освещении сферический 3 и цилиндрический 4 объективы в совокупности имеют импульсный отклик (3), поскольку по оси X происходит проектирование изображения из плоскости 2 в плоскость 5, а по оси Y — дефокусировка. Параметры системы выбраны так, что возникающие дифракционные эффекты незначительны, а следовательно,

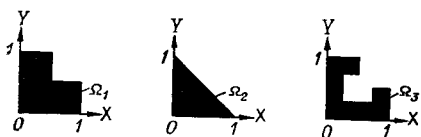


Рис. 3.

справедливо приближение геометрической оптики. Аналогично сферические 6, 7 и цилиндрический 8 объективы в совокупности имеют импульсный отклик (7). Здесь проектирование производится по оси Y из плоскости 5 в 9, а дефокусировка — по оси X . Разложение проводилось по системам функций Уолша и Лежандра для двух градиционных изображений $f_1(x, y)$, $f_2(x, y)$, $f_3(x, y)$, значения которых равны единице соответственно в областях Ω_1 , Ω_2 , Ω_3 и нулю вне их (рис. 3). С помощью фотоприемника 10 последовательно производилось считывание значений a_{ij}^{++} , a_{ij}^{+-} , a_{ij}^{-+} , a_{ij}^{--} . Результирующие значения спектральных компонент определялись по формуле (2) и приведены в табл. 1 и 2 соответственно для случаев разложения по системам функций Лежандра и Уолша. Погрешности их вычисления определяются дифракционными эффектами оптической системы, которые незначительны, aberrациями используемой оптики, точностью изготовления силуэтных фильтров и др. Расчетные и экспериментальные значения спектральных компонент совпадают достаточно хорошо (1—1,5%).

Заключение. Предложенный метод обобщенного спектрального анализа прост в реализации и обеспечивает получение значений спектральных компонент с более высокой точностью, чем в когерентно-оптических анализаторах [1, 7]. Это является следствием применения некогерентных оптических систем и силуэтных фильтров. В то же время подобные анализаторы уступают когерентным в том случае, когда значения спектральных компонент необходимо вычислять одновременно и параллельно. Кроме того, они не позволяют синтезировать изображения по набору спектральных компонент и соответствующей им системе функций разложения. Рассмотренные оптические анализаторы могут применяться для разложения изображений по произвольной системе функций, например, на этапе выделения признаков в задачах распознавания образов.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Гибин, Е. С. Нежевенко, О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб. Когерентно-оптические устройства для обобщенного спектрального анализа изображений.— *Автометрия*, 1972, № 5.
2. F. Scott. The Production of Variable-Transmission Sinusoidal Patterns and Other Images.— *Photographic Science and Engineering*, 1965, v. 9, № 2.
3. И. С. Гибин, А. Г. Козачок, Е. С. Нежевенко, Ю. Н. Солодкин, П. Е. Твердохлеб, Ю. В. Чугуй. Анализ спектров одномерных сигналов оптическими методами.— *Автометрия*, 1971, № 1.
4. Е. С. Нежевенко. Определение близости функций в когерентных оптических вычислительных устройствах.— *Автометрия*, 1971, № 6.
5. Ю. В. Чугуй. Оптическая обработка сигналов с помощью силуэтных фильтров.— *Автометрия*, 1972, № 5.
6. E. W. Selwyn. The Photographic and Visual.— *Photographic Journal*, 1948, v. 88B.
7. Е. С. Нежевенко, О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб. Линейные оптические системы для выполнения интегральных преобразований общего вида.— *Автометрия*, 1972, № 6.

Поступила в редакцию 12 декабря 1973 г.