

## 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  $\alpha_n$  — 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  $3^\circ$ . 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

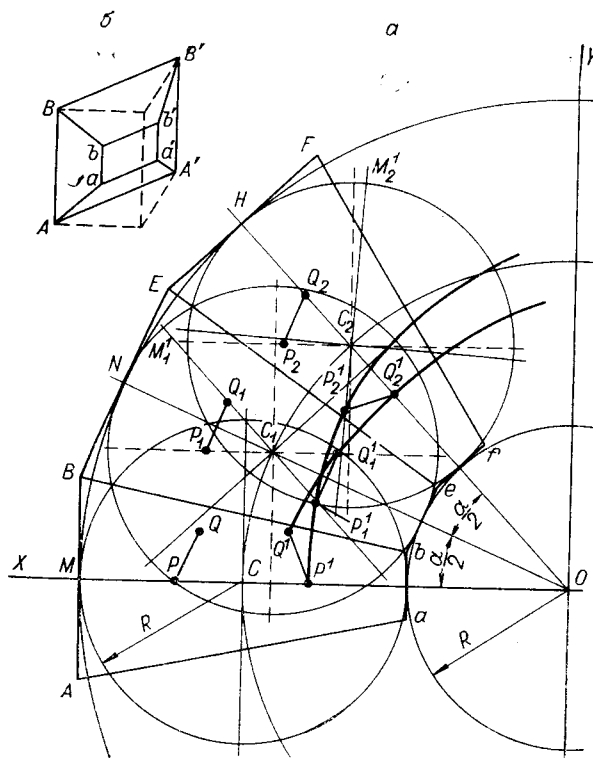


Рис. 1.

жений с шагом  $\alpha_n$  (рис. 1, а). Такая система должна выполнять операцию мультиплицирования изображения по кругу с одновременным поворотом каждого последующего мультиплицированного изображения.

Операция мультиплицирования в когерентной оптической системе может осуществляться с помощью оптической пространственной фильтрации [4] посредством преобразования

$$A(x, y) = \tilde{F}^{-1} \{ S(\omega_x, \omega_y) \sum \exp[-i(a_n \omega_x + b_n \omega_y)] \} = \\ = f(x, y) \cdot \sum_1^n \delta(x - a_n; y - b_n) = \sum_1^n f(x - a_n; y - b_n), \quad (2)$$

где  $f(x, y)$  — исходное изображение, а

$$a_n = 2R \cos \frac{\alpha}{2}; \quad b_n = 2R \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (3)$$

Операция поворота каждого из мультиплицированных изображений может производиться при помощи оборачивающей призмы (см. рис. 1, б), получаемой из призмы типа AP-90, осуществляющей поворот каждого из мультиплицированных изображений на угол  $\alpha_n$ . Теоретически можно представить такую систему в виде набора оборачивающих призм (см. рис. 1, в), объединенных в один конструктивный элемент и повернутых на угол  $\alpha_n/2$  одна относительно другой для каждого из мультиплицированных изображений.

На каждую призму подается одно мультиплицированное изображение. Условие попадания его на соответствующую призму следующее:

$$x^2 + y^2 \leq 4R^2 \sin^2 \frac{\alpha_n}{4}. \quad (4)$$

одновременного поворота  $n$  мультиплицированных изображений  $f(x, y)$  на различный угол  $\alpha_n$  каждое. Первоначально задача решалась на формальном уровне посредством математического моделирования на ЭВМ и аналитического рассмотрения, а затем была предпринята попытка найти возможную физическую реализацию математической модели, описывающей поворот  $n$  изображений на различный угол в реальном масштабе времени. Было показано, что таким элементом является двуполостной оборачивающий конус.

Можно ввести формальное описание оптической системы, осуществляющей поворот изображения  $f(x, y)$  в реальном масштабе времени в  $n$  дискретных поло-

Рассмотрим поворот мультиплицированных изображений  $PQ, P_1Q_1, \dots, P_nQ_n$  в такой системе. Для точки  $P$  с координатами  $(2R+x_p; 0)$  в выходной плоскости получается изображение  $P^1$  с координатами  $(2R-x_p; 0)$ . В общем случае на основании преобразующего свойства оборачивающей призмы ( $x \rightarrow -x$ ), ( $y \rightarrow +y$ ) для точки  $P_n$  с координатами

$$\left(2R + x_p \cos \frac{\alpha_n}{2}; -x_p \sin \frac{\alpha_n}{2}\right) \quad (5)$$

в выходной плоскости координаты точки  $P_n^1$  будут равны

$$\left(2R - x_p \cos \frac{\alpha_n}{2}; -x_p \sin \frac{\alpha_n}{2}\right). \quad (6)$$

Для получения уравнения движения выходного изображения точки  $P$  во время прохождения ее через различные положения по кольцу при мультиплицировании перейдем к общей системе координат для всех призм. Несложно показать, что движение выходного изображения точки  $P$  описывается уравнением эллипсоиды

$$\begin{cases} x = 2R \cos \frac{\alpha_n}{2} - x_p \cos \alpha_n; \\ y = 2R \sin \frac{\alpha_n}{2} - x_p \sin \alpha_n. \end{cases} \quad (7)$$

Аналогично для точки  $Q$  (см. рис. 1, б) уравнение движения выходного изображения при перемещении точки через позиции мультиплицирования имеет вид

$$\begin{cases} x = 2R \cos \alpha_n - \sqrt{x_Q^2 + y_Q^2} \cos 2\alpha_n; \\ y = 2R \sin \alpha_n - \sqrt{x_Q^2 + y_Q^2} \sin 2\alpha_n. \end{cases} \quad (8)$$

Из уравнений (7) и (8) следует, что каждая точка объекта, подаваемого на призмную оборачивающую систему при прохождении через позиции мультиплицирования, на выходе системы описывает эллипсоиду, половина цикла которой соответствует углу поворота, равному  $2\pi$ . Для мультиплицированных изображений исходного объекта  $PQ, P_1Q_1, \dots, P_nQ_n$  на выходе призмной оборачивающей системы получим

$$P^1Q^1, P_1^1Q_1^1, \dots, P_n^1Q_n^1.$$

Реализация описанной призмной системы технологически чрезвычайно сложна, поэтому на основе предельного перехода такая система может быть заменена телом вращения, представляющим собой двуполостной оборачивающий конус (рис. 2). При переходе к двуполостной оборачивающей конической системе возникают искажения, которые обусловлены тем, что совокупность поверхностей  $ABA^1B^1; BCB^1C^1; \dots$  полного внутреннего отражения призмной системы заменяется цилиндрической поверхностью. Искажения могут быть определены на основании преобразования уравнений (7) и (8) для предельного случая, соответствующего двуполостному оборачивающему конусу. На основе геометрического построения несложно показать, что величина искажений зависит от величины и конфигурации входного объекта, поэтому целесообразна экспериментальная оценка искажений для различных типов объектов.

Практически влияние этих искажений сказывается на величине сигнального отклика при фильтрации и может быть учтено выбором соответствующей величины порога. При необходимости можно осуществ-

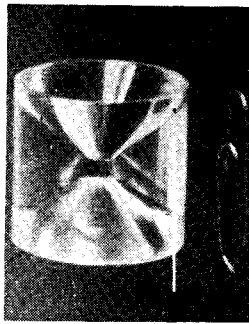


Рис. 2.

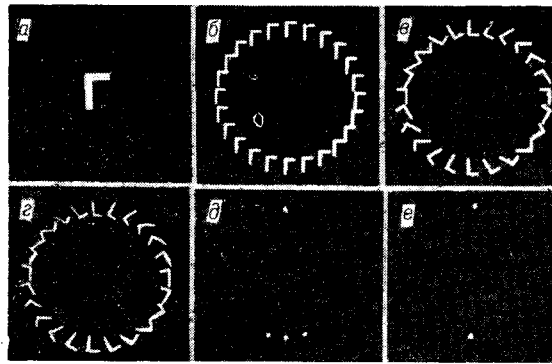


Рис. 3.

вить коррекцию искажений на основе применения голографических корректирующих фильтров аналогично коррекции искажений в обычных оптических системах [5].

На рис. 3 приведены результаты экспериментов. На рис. 3, *a* приведен объект, на рис. 3, *б* — его мультиплицированное изображение, полученное в оптической системе. Так как осуществить поворот изображений при помощи многопризменной системы практически невозможно, то для этого случая было выполнено аналитическое построение на ЭВМ, изображение которого использовалось в схеме фильтрации (см. рис. 3, *в*). Для случая двуполостного оборачивающего конуса приведен результат поворота мультиплицированных изображений в когерентной оптической системе (см. рис. 3, *г*). Для эксперимента использовался лабораторный образец двуполостного оборачивающего конуса (см. рис. 2).

На рис. 3, *д* приведен результат согласованной фильтрации объекта с набором повернутых неискаженных изображений (выход многопризменной системы), а на рис. 3, *е* — результат фильтрации объекта с набором повернутых изображений двуполостного оборачивающего конуса.

Так как изображения на рис. 3, *в*, *г* являются симметричными относительно каждой пары элементов мультипликации, повернутых на угол  $\alpha_n$ , за счет того, что одному циклу эпициклоиды соответствует двойной поворот каждого элемента мультипликации, то в результате фильтрации для каждого объекта, повернутого на угол  $\alpha_n$ , получаются две яркие точки в выходной плоскости фильтрации.

Операция согласованной фильтрации позволила оценить величину искажений, вносимых двуполостным оборачивающим конусом по сравнению с неискаженными изображениями многопризменной системы. Для исследованного класса объектов (буквы, символы, геометрические фигуры и т. д.) отношение сигнал/помеха для случая с искажениями уменьшается на 1,3÷1,6 дБ по отношению к случаю без искажений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A. Vander Lugt. Signal Detection by Complex Spatial Filtering.—“IEEE Trans. Inf. Theory”, 1964, v. 2, p. 139—145.
2. D. L. Sullivan. Alignment of Rotation Prisms.—“Appl. Opt.”, 1972, v. 11, № 9.
3. “Laser Focus”, 1967, v. 3, № 11.
4. Лу Сунь. Создание многократных изображений для интегральных схем с помощью голограмм Фурье.—«ТИИЭР», 1968, т. 56, с. 132.
5. Y. Ichioka et al. Halftone Plotter and its Applications to Digital Optical Information Processing.—“Appl. Opt.”, 1969, v. 8, № 12.

Поступила в редакцию 10 января 1973 г.,  
окончательный вариант — 26 сентября 1973 г.