можным для определения обеих измеряемых координат использовать итерационный алгоритм, сущность которого для рассматриваемого случая заключается в следующем.

На первом этапе в цифровом виде получают значения амплитуд индуцированных сигналов $e_x$ и $e_y$ и аппаратурно определяют номер квадранта (по комбинации знаков индуцированных сигналов). Затем в соответствии со знаком суммарного сигнала, индуцированного в последовательно соединенных приемных катушках, находят участок аппроксимации по каждой из координат. Начальное значение $x_0$ (или первое приближение координаты $x_0$) выбирают соответствующим середине координатной шины и, исходя из участка АПХ, производят определение координаты $y_0$ с использованием значения амплитуды индуцированного сигнала и системы полиномов $M\left(x_0^1\right)$ для середины координатной шины. Определение координаты $y_0$ осуществляется в два этапа: а) генерирование АПХ для выбранного участка и аппроксимация полученной АПХ многочленом соответствующей степени; б) определение координаты по значению амплитуды и коэффициентам многочлена, аппроксимирующего АПХ. В результате получаем первое приближение $y_0^1$ координаты $y_0$, которое, будучи вычисленным с погрешностью, тем не менее задает приближенное сечение координатной шины для нахождения второго приближения $x_0^2$ координаты $x_0$.

Второе приближение $x_0^2$ определяют аналогично, используя ту же систему полиномов для сечения $y_0^1$ и значение амплитуды $e_x$ индуцированного сигнала. Значение $x_0^2$ будет ближе к искомому значению координаты $x_0$, чем $x_0^1$. Оно используется для дальнейшего уточнения координаты $y_0$ и получения второго приближения $y_0^2$. Поочередное уточнение измеряемых координат производят до тех пор, пока разности результатов двух смежных итераций не станут меньше наперед заданного значения.

Данный алгоритм реализован на ЭВМ ЕС 1060. Время определения двух координат составило примерно 0,5 с при заданной погрешности измерения 0,2 мм.

Следует отметить, что в рабочем режиме при учете условия «соседства» считываемых точек это время может быть в несколько раз уменьшено, так как знание координат предыдущей считанной точки позволит сократить количество итераций за счет исключения начальных шагов.

Данный алгоритм с учетом последних достижений в микропроцессорной области может быть реализован в специализированном вычислителе, являющемся частью устройства графического ввода. Здесь мы ограничимся лишь указанием на такую возможность, имея в виду, что подобная реализация может составить самостоятельный предмет исследования.

*Поступило в редакцию 16 июля 1984 г.*

---

УДК 681.332(088.8)

Е. Г. СТОЛОВ

(*Ленинград*)

# ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОДИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

В настоящей работе проводится развитие идеи использования многослойного интерференционного фильтра в качестве процессора для обработки информации при решении нелинейных уравнений, изложенной в [1], а именно: на основе анализа функционирования такого процессора доказывается теорема об эквивалентности размеров и структуры системы обработки информации.

В [1] предложено использовать интерференционный фильтр в качестве основного элемента оптического процессора, осуществляющего вычисление значений произвольной заданной функции $f(x)$.

Принцип кодирования информации, предложенный в [1], заключается в том, что аргумент $x$ вычисляемой функции $f(x)$ представляется в виде монохроматического светового потока единичной интенсивности, длина волны которого зависит от величины кодируемого числа $x$, т. е.

$$x = x^{(1)} + [(x^{(2)} - x^{(1)})/\lambda^{(2)} - \lambda^{(1)}](\lambda - \lambda^{(1)}),$$

где $x^{(1)}$, $x^{(2)}$ — границы области определения функции $f(x)$; $\lambda$ — длина волны излучения; $\lambda^{(1)}$ и $\lambda^{(2)}$ — границы спектрального рабочего диапазона прибора. После прохождения излучения длины волны $\lambda$ через фильтр, спектральная характеристика которого $T(\lambda)$ имеет вид

$$T(\lambda) = Cf\left(x^{(1)} + \frac{x^{(2)} - x^{(1)}}{\lambda^{(2)} - \lambda^{(1)}}\left(\lambda - \lambda^{(1)}\right)\right),$$

$C$ — постоянное число, интенсивность светового потока пропорциональна $f(x)$.

Оптический процессор на основе интерференционного фильтра является удобной моделью для теоретических исследований, позволяющей выявить ряд физических закономерностей процесса обработки информации. В частности, анализируя его, несложно показать, что увеличение линейных размеров систем обработки информации эквивалентно усложнению ее структуры. А именно докажем, что даже при минимальном числе слоев в фильтре $m = 1$ можно путем увеличения толщины слоя реализовать любые сколь угодно сложные функции $f(x)$, т. е. при заданных длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_N$ $(\lambda_1 < \lambda_2 < \ldots < \lambda_N)$, где $\{\lambda_i\}$ — взаимно простые целые положительные числа, существует такая оптическая толщина слоя $D$, что для энергетического коэффициента пропускания слоя $T$ справедливо

$$k_i - \delta \leqslant T(\lambda_i, D) \leqslant k_i + \delta, \quad i = 1, 2, \ldots, N; \tag{1}$$

$$T_{\min} = \frac{\left(1-\rho_1^{(2)}\right)\left(1-\rho_2^2\right)}{\left(1+\rho_1\rho_2\right)^2} \leqslant k_i \leqslant \frac{\left(1-\rho_1^2\right)\left(1-\rho_2^2\right)}{\left(1-\rho_1\rho_2\right)^2} = T_{\max}; \tag{2}$$

$$\delta = \delta(\lambda_i) \equiv \left| \frac{8\pi\rho_1\rho_2 T^2 \sin\left(4\pi D/\lambda_i + \Delta_1 + \Delta_2\right)}{\lambda_i\left(1-\rho_1^2\right)\left(1-\rho_2^2\right)} \right|, \tag{3}$$

где $k_i$ — заданные числа; $\rho_1$, $\rho_2$ — модули френелевских коэффициентов отражения на границе слоя с обрамляющими средами; $\Delta_1$ и $\Delta_2$ — скачки фазы электрического вектора при отражении от обрамляющих сред со стороны слоя; $T_{\min}$ и $T_{\max}$ — минимальный и максимальный энергетические коэффициенты пропускания однослойного покрытия. Заметим, что величина $\delta$ может быть сделана сколь угодно малой за счет надлежащего выбора $\{\lambda_i\}$, например при $\rho_1 = \rho_2 = 0{,}5$; $\lambda_i = 5000$; $\delta \approx 2 \cdot 10^{-3}$ ($\lambda_i$ даются в относительных единицах).

Предварительно докажем, что для любых целых взаимно простых чисел $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_N$ и целых положительных чисел $d_1, d_2, \ldots, d_N$, причем $0 \leqslant d_i < \lambda_i$, $i = 1, 2, \ldots, N$, существует $D$ такое, что $\{D/\lambda_i\} = d_i/\lambda_i$, где $\{\ \}$ — оператор дробной части.

Доказательство. Введем в рассмотрение вектор $\mathbf{X}(M)$, где $M$ — целое положительное число, компоненты которого

$$x_i(M) = \{M/\lambda_i\}\lambda_i, \ i = 1, 2, \ldots, N. \tag{4}$$

Покажем, что $\mathbf{X}(M_1) \neq \mathbf{X}(M_2)$ при $0 \leqslant M_1 < M_2 < \lambda_1\lambda_2\ldots\lambda_N$. Пусть, напротив, $\mathbf{X}(M_1) = \mathbf{X}(M_2)$, отсюда будет следовать, что число $(M_2 - M_1)$ кратно числам $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_N$, т. е.

$$(M_2 - M_1) = K\lambda_1\lambda_2 \ldots \lambda_N, \tag{5}$$

здесь $K$ — целое положительное число. Из (5) следует $(M_2 - M_1) \geqslant \lambda_1\lambda_2\ldots\lambda_N$, но это противоречит условию $0 \leqslant M_1 < M_2 < \lambda_1\lambda_2\ldots\lambda_N$. Таким образом, каждому $M$ соответствует свой вектор $\mathbf{X}(M)$, отличный от векторов, соответствующих другим целым числам в интервале $0 \leqslant M < \lambda_1\lambda_2\ldots\lambda_N$, а полное число различных векторов $\mathbf{X}(M)$ при изменении $M$ в интервале $[0, (\lambda_1\lambda_2\ldots\lambda_N - 1)]$ равно числу целых чисел в нем, т. е. $\lambda_1\lambda_2\ldots\lambda_N$. С другой стороны, число всевозможных векторов $\mathbf{X}(M)$, согласно определению (4), $\lambda_1\lambda_2\ldots\lambda_N$, т. е. при изменении $M$ в интервале $0 \leqslant M < \lambda_1\lambda_2\ldots\lambda_N$ перебираются всевозможные векторы $\mathbf{X}(M)$ и среди них неизбежно окажется вектор с координатами $d_1 d_2 \ldots d_N$. Число $M'$, которому соответствуют $x_i = d_i$, $i = 1, 2, \ldots, N$, как раз и будет тем, существование которого требовалось доказать, так как

$$\{M'/\lambda_i\} = d_i/\lambda_i, \ i = 1, 2, \ldots, N. \tag{6}$$

Коэффициент пропускания однослойного покрытия определяется соотношением [2]:

$$T = \frac{\left(1-\rho_1^2\right)\left(1-\rho_2^2\right)}{1 + \rho_1^2\rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2\cos\left(\Delta_1 + \Delta_2 + 4\pi D/\lambda\right)}. \tag{7}$$

Очевидно, что для любого $k_i$, удовлетворяющего (2), существует значение $\tilde{d}_i (0 \leqslant d_i < \lambda_i)$, при котором $T(\lambda_i, \tilde{d}_i) = k_i$. Поставим в соответствие $\tilde{d}_i$ целое число $d_i (0 \leqslant d_i < \lambda_i)$ согласно соотношению

$$d_i \leqslant \tilde{d}_i < d_i + 1, \tag{8}$$

т. е. $|\tilde{d}_i - d_i| < 1$. Тогда согласно доказанной выше теореме существует число $D$ такое, что $\{D/\lambda_i\} = d_i/\lambda_i$. Однослойный фильтр с толщиной слоя $D$ будет иметь на длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_N$ энергетические коэффициенты пропускания $k_1, k_2, \ldots, k_N$ с точностью

$$\delta \leqslant \left|\frac{\partial T}{\partial D}\right|_{\max} \left|\tilde{d}_i - d_i\right| < \left|\frac{\partial T}{\partial D}\right|_{\max} = \delta(\lambda_i). \tag{9}$$

Формула (9) получена путем разложения (7) в ряд Тейлора в окрестности точки $D = d_i$ с удержанием только линейного члена и подстановкой выражения $\left|\frac{\partial T}{\partial D}\right|_{\max}$.

Таким образом, доказано, что для двух заданных наборов: взаимно простых чисел $\{\lambda_i\}$ и чисел $\{k_i\}$, удовлетворяющих соотношению (2), существует число $D$ такое, что однослойное покрытие с оптической толщиной $D$ имеет на длинах волн $\{\lambda_i\}$ значения энергетических коэффициентов пропускания, близкие к $\{k_i\}$, т. е. даже однослойное покрытие позволяет осуществлять вычисление любой, сколь угодно сложной функции на дискретных значениях аргумента. Следует отметить, что точность задания $\{\lambda_i\}$ с увеличением сложности $f(x)$ резко возрастает.

Из доказанной выше теоремы вытекает возможность изменением всего одного параметра, например оптической толщины слоя однослойного покрытия, заменять вычисляемую с помощью данного процессора функцию $f(x)$. Такая перестройка может осуществляться очень быстро, если слой покрытия изготовить из электрооптического материала, изменяющего свой показатель преломления под действием внешнего электрического поля.

## ЛИТЕРАТУРА


1. **Столов Е. Г.** Оптический метод кодирования и обработки информации // Автометрия.— 1982.— № 5.
2. **Фурман Ш. А.** Тонкослойные оптические покрытия.— Л.: Машиностроение, 1977.


*Поступило в редакцию 7 июня 1985 г.*

---

УДК 621.391.268 : 778.26

**В. П. ПРОТАСЕВИЧ, Ш. И. САДЫКОВ, А. Ф. СКОЧИЛОВ**

(*Казань*)

# ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ В СИСТЕМАХ С СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ

При распознавании объектов в когерентных системах с голографическими согласованными фильтрами (ГСФ) на достоверность распознавания влияют такие факторы, как нестабильность интенсивности лазерного пучка в процессе получения кросскорреляционного сигнала от ГСФ, изменение пропускания изображений исследуемых объектов относительно эталона и т. п. Наличие этих факторов приводит к большим трудностям при распознавании мало отличающихся по форме объектов. В настоящей работе предложен один из возможных методов повышения достоверности распознавания, обобщающий метод работы [1] в системах с ГСФ.

Известно [2], что в голографических амплитудных корреляторах выходной сигнал пропорционален

$$U(\xi, \eta) = \int\limits_{-\infty}^{\infty}\int g(x_0, y_0)\, h^*(x_0 - \xi, y_0 - \eta + \alpha\lambda f)\, dx_0 dy_0, \tag{1}$$

где $h(x_0, y_0)$ — амплитудное пропускание эталонного объекта; $g(x_0, y_0)$ — амплитудное пропускание исследуемого объекта, а коэффициенты пропорциональности опущены, поскольку не влияют на ход дальнейшего изложения. Вводя новую систему координат $\xi' = \xi$, $\eta' = \eta - \alpha\lambda f$ и используя обратную теорему свертки, выражение (1) с точностью до коэффициента можно представить в виде

$$U(\xi', \eta') = \iint\limits_{D} H^*(f_x, f_y)\, G(f_x, f_y) \exp[-i2\pi(\xi' f_x + \eta' f_y)]\, df_x df_y,$$

здесь $f_x = x/\lambda f$; $f_y = y/\lambda f$ — пространственные частоты; $D$ — область интегрирования в плоскости ГСФ:

$$H(f_x, f_y) = \mathcal{F}[h(x_0, y_0)], \quad G(f_x, f_y) = \mathcal{F}[g(x_0, y_0)];$$

$\mathcal{F}$ — оператор фурье-преобразования.

О сходстве объектов обычно судят по интенсивности максимума кросскорреляционного сигнала $I = |U(0, 0)|^2$. Разбив область $D$ ГСФ на $N$ произвольных частей, получим на выходе коррелятора совокупность значений $\{I_n\}$, где каждое

$$I_n = \left| \iint\limits_{D_n} H^*(f_x, f_y)\, G(f_x, f_y)\, df_x df_y \right|^2$$

измеряется в различные моменты времени. При этом для определения сходства исследуемого и эталонного объектов необходимо сравнивать каждое значение $I_n$ с соответствующим значением $I_{n0}$, где совокупность $\{I_{n0}\}$ получена аналогичным образом для случая, когда исследуемый объект совпадает с эталоном. Для этого целесообразно ввести нормированные величины $\beta_n = I_n/I_{n0}$, которые более чувствительны к степени различия сравниваемых объектов, чем обычно определяемая величина $\beta$,