УДК 535.317.2 : 681.332

Е. С. НЕЖЕВЕНКО, О. И. ПОТАТУРКИН

(*Новосибирск*)

# МЕТОД РЕАЛИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ОПЕРАТОРОВ СРЕДСТВАМИ КОГЕРЕНТНОЙ ОПТИКИ

Эффективность применения оптических аналоговых процессоров существенно зависит от сложности выполняемых ими функциональных преобразований. В настоящем сообщении рассматривается реализация нелинейных операторов над двумерными функциями, часто встречающихся при обработке изображений, например при решении задач распознавания образов. Наиболее распространенной линейной операцией при обработке изображений является свертка, достаточно просто реализуемая в когерентно-оптических процессорах [1]. В работах [2, 3] рассмотрены более общие операторы:

$$R(u)=\int_{-\infty}^{\infty} G[f(x-u)-\varphi(x)]\,dx,$$

однако метод, предложенный в этих работах, пригоден лишь для обработки функций одной переменной.

Реализация в оптических системах функционального преобразования над двумерными массивами вида

$$R_1(u_m, v_m)=\sum_{x_n}\sum_{y_n} f(x_n, y_n)\, g(x_n, y_n; u_m, v_m),$$

где $g(x_n, y_n; u_m, v_m)$ — ядро интегрального преобразования, описана в [4—6]. Такое преобразование обладает большими функциональными возможностями, однако имеет существенное ограничение: как и двумерная корреляционная функция, оно является линейным. В то же время алгоритмы обработки изображений часто включают нелинейные операторы. Например, при распознавании образов во многие решающие правила входят апостериорные вероятности. В этом случае статистика, подлежащая вычислению с точностью до априорной вероятности, имеет вид

$$Q[\varphi(x_l, y_l)\,|\,f(x_n, y_n)] = \sum_{x_n}\sum_{y_n}\tilde{Q}[f(x_n, y_n)\,|\,\varphi(x_l, y_l)], \qquad (1)$$

где $\tilde{Q}(t|s)=\ln P(t|s)/P(t)$, $Q(s|t)=\ln P(s|t)$, $P(s|t)$ — условная вероятность события $s$ при наличии события $t$.

Очевидно, что ни одно из приведенных выше функциональных преобразований не дает возможности вычислить эту статистику, поскольку $P(f|\varphi)$ — произвольная функция $f$ и $\varphi$, которая, как правило, находится из статистических испытаний.

В настоящей работе рассмотрен способ реализации в оптической системе оператора вида

$$R_2(u_m, v_m)=\sum_{x_n}\sum_{y_n} G_{uv}[f(x_n, y_n), \varphi(x_n+u_m, y_n+v_m)], \qquad (2)$$

где $f(x_n, y_n)$, $\varphi(x_l, y_l)$ — квадратные, без ограничения общности, массивы действительных чисел размерности $N\times N$ и $L\times L$ соответственно; $G_{uv}[f, \varphi]$ — произвольная функция от значений $f$, $\varphi$, которая, вообще говоря, может меняться в зависимости от сдвига массива $f$ относительно массива $\varphi$.

При решении математических задач методами оптической аналоговой вычислительной техники значения функций и аргументов, входящие в задачу, должны быть представлены в оптическом виде. В подавляющем большинстве случаев в качестве оптического представления этих параметров используют амплитудное распределение света (или распределение интенсивности) в зависимости от пространственных координат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света. В данной работе для оптического представления $f(x, y)$ и $\varphi(x, y)$ используется метод позиционного кодирования:

$$s_1(x, y)=\sum_{x_n}\sum_{y_n}\delta[x_n-f_k(x_n, y_n), y_n+\Delta/2];$$

$$s_2(x, y)=\sum_{x_l}\sum_{y_l}\delta[x_l-\Delta/2, y_l+\varphi_k(x_l, y_l)],$$

где $x_n$, $y_n$, $x_l$, $y_l$ — координаты элементов разрешения в области определения функций $f(x_l, y)$, $\varphi(x, y)$; $f_k$, $\varphi_k$ — градации значений этих функций, $1 \leqslant k \leqslant K$; $x_{n+1}$, $y_{n+1}=x_n$, $y_n+\Delta$; $x_{l+1}$, $y_{l+1}=x_l$, $y_l+\Delta$; $f_{k+1}$, $\varphi_{k+1}=f_k$, $\varphi_k+\Delta/K$.

Таким образом, изображение, соответствующее оптическому представлению значений функций и аргументов, в этом случае будет иметь вид $N \times N$ (или $L \times L$) прозрачных «точек», каждая из которых смещена относительно опорной сетки внутри соответствующих квадратов $\Delta \times \Delta$ на величину $f_k$ по координате $X$ (или на величину $\varphi_k$ по координате $Y$).

Вычисление результата действия оператора (2) будем производить в обычном когерентно-оптическом корреляторе. Транспарант с изображением $s_1(x, y)$ поместим во входной плоскости, а с изображения $s_2(x, y)$ снимем голографический фильтр и установим его в плоскости Фурье. Тогда световое распределение в выходной плоскости с точностью до постоянного сдвига пропорционально

$$s_1(x, y) * s_2(x, y) = \sum_{x_n} \sum_{y_n} \delta\,[\xi - f_k(x_n, y_n),\ \eta - \varphi_k(x_n + u_m, y_n + v_m)], \tag{3}$$

где $u_m = x_l - x_n$, $v_m = y_l - y_n$; $u_{m+1}$, $v_{m+1} = u_m$, $v_m + \Delta$; $u_0 = v_0 = 0$; $0 \leqslant m \leqslant L - N + 1$, т. е. представляет собой набор из $(L-N+1) \times (L-N+1)$ квадратов, в каждом из которых будет $N \times N$ световых «точек» в координатах $f$, $\varphi$ при соответствующем смещении одного исходного массива относительно другого. Здесь без ограничения общности сделано предположение $L > N$.

Модулируя световое распределение маской, состоящей из $(L-N+1) \times (L-N+1)$ квадратных областей и имеющей пропускание по интенсивности $T_{uv}(\xi, \eta)$ каждая, получаем при детектировании светового потока внутри каждой области массив

$$\iint\limits_{m\Delta}^{(m+1)\Delta} T_{uv}(\xi, \eta) \left\{ \sum_{x_n} \sum_{y_n} \delta\,[\xi - f_k(x_n, y_n),\ \eta - \varphi_k(x_l, y_l)] \right\} d\xi d\eta =$$

$$= \sum_{x_n} \sum_{y_n} T_{uv}\ [f_k(x_n, y_n),\ \varphi_k(x_n + u_m, y_n + v_m)], \tag{4}$$

где $u = \Delta[\xi/\Delta]$, $v = \Delta[\eta/\Delta]$, $[z]$ — целая часть числа $z$. С точностью до обозначений это выражение полностью совпадает с выражением (2).

Рассмотрим некоторые частные виды операторов, реализуемых предложенным способом.

1. Обычная функция корреляции (свертка) вычисляется в системе, если маска в выходной плоскости имеет вид

$$T_{uv}(\xi, \eta) = (\xi - u)(\eta - v).$$

2. Вычисление среднего квадрата разности двух массивов

$$\sum_{x_n} \sum_{y_n} [f(x_n, y_n) - \varphi(x_l, y_l)]^2$$

обеспечивается маской с пропусканием, пропорциональным

$$T_{uv}(\xi, \eta) = (\xi - u - \eta + v)^2.$$

3. При нахождении местоположения одного массива действительных чисел относительно другого по критерию максимума апостериорной вероятности требуется реализация оператора (1). В этом случае пропускание маски должно быть пропорционально

$$T_{uv}(\xi, \eta) = \ln P(\xi - u \mid \eta - v) / P(\xi - u).$$

Приведенные выше операторы применяются в основном при решении задач распознавания образов, в которых, как правило, присутствуют два массива: один — распознаваемый, другой — эталонный. Однако область применения описанного метода не ограничивается этим классом задач. Рассмотрим еще некоторые нелинейные операторы, чаще всего входящие в нелинейные интегральные уравнения [7] (естественно, мы их будем рассматривать в варианте с дискретными аргументами).

4. Оператор Немыцкого

$$R(u_m, v_m) = F[f(x_n, y_n);\ x_n, y_n]$$

реализуется в системе, если $\varphi(x, y) = \delta(x, y)$ и $T_{uv}(\xi, \eta) = F[\xi - u;\ u, v]$.

5. Интегральный оператор Урысона над функцией двух переменных имеет вид

$$R(u_m, v_m) = \sum_{x_n} \sum_{y_n} F[x_n, y_n;\ u_m, v_m;\ f(x_n, y_n)], \qquad 1 \leqslant n \leqslant N_0.$$

Для его реализации $\varphi(x, y)$ должна иметь вид $\varphi(x, y)=\alpha x+\beta y$ или $\varphi_k(x_l, y_l) = = \frac{\Delta}{N_0^2}\left(\left[\frac{x_n}{\Delta}\right]+1\right)+\frac{\Delta}{N_0}\left[\frac{y_n}{\Delta}\right]$ и $T_{uv}(\xi, \eta)=F[\eta-v; u, v; \xi-u]$.

Оценим ориентировочно возможные размерности обрабатываемых массивов и вычислительную производительность системы, работающей по предложенному выше методу, исходя из параметров реальных оптических систем. Если число градаций обрабатываемых функций $K$, а размерность большего массива $L\times L$, то число разрешимых объективом линий должно быть $K\times L$. Так, при разрешающей способности объектива 50 лин/мм и $K=30$ (точность 3%) размерность большего массива может быть равна $100\times100$ элементов. Оценку вычислительной производительности системы будем вести для оператора (2), как наиболее сложного. При размерности большего массива $100\times\times100$ и меньшего — $32\times32$ система производит за один такт $\sim10^3\cdot5\cdot10^3=5\cdot10^6$ операций, причем под операцией понимается любая функция двух переменных: логическая, арифметическая или заданная в виде таблицы. Для оценки производительности необходимо число операций разделить на сумму времени ввода массивов и времени считывания результата. Так, при $L=100$, $N=30$ и времени 0,2 с, что вполне реально, вычислительная производительность будет $2{,}5\cdot10^7$ опер./с$+2{,}5\cdot10^7$ слож./с.

В заключение отметим, что предложенный метод оптических вычислений не только дает достаточно большие функциональные возможности при реализации нелинейных операторов, но и обладает другими достоинствами. Двухградационный способ задания цифровых массивов позволяет вводить их в оптический вычислитель с большой точностью. Голографический фильтр, полученный с одного из массивов, представляет собой набор синусоидальных решеток, причем энергия сигнального пучка при регистрации фильтра не меняется при изменении массива. Эти особенности позволяют получать качественные фильтры с высокой дифракционной эффективностью, что в конечном счете обеспечивает высокую точность вычисления результата действия оператора.

## ЛИТЕРАТУРА


1. **Lugt Vander A., Rots F. B., Klooster A.** Character-reading by optical spatial filtering.— "Opt. and Electro-opt. Inform. Proc.", 1965, p. 125.
2. **Нежевенко Е. С.** Определение близости функций в когерентно-оптических вычислительных устройствах.— «Автометрия», 1971, № 6, с. 81.
3. **Нежевенко Е. С., Твердохлеб П. Е.** Когерентно-оптические устройства для распознавания одномерных сигналов.— «Автометрия», 1972, № 5, с. 15.
4. **Нежевенко Е. С., Потатуркин О. И., Твердохлеб П. Е.** Линейные оптические системы для выполнения интегральных преобразований общего вида. — «Автометрия», 1972, № 6, с. 88.
5. **Нежевенко Е. С., Твердохлеб П. Е.** Умножение матриц оптическим методом.— «Автометрия», 1972, № 6, с. 24.
6. **Кривенков Б. Е., Михляев С. В., Твердохлеб П. Е., Чугуй Ю. В.** Некогерентная оптическая система для выполнения матричных преобразований.— «Автометрия», 1975, № 3, с 90.
7. **Куликовский Р.** Оптимальные и адаптивные процессы в системах автоматического регулирования. М., «Наука», 1967, с. 142.


*Поступило в редакцию 25 июля 1978 г.*