

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

*ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ*

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ТОМ XXIX

№ 4

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК

ИЗДАНИЕ ЛЕНИНГРАДСКОГО ИНСТИТУТА
ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

1986

АЛГОРИТМ ПОИСКА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВИДЕОСИГНАЛА ПЗС-ПРИЕМНИКОВ

В. Н. КРАСНОВ, С. П. САХНО, Г. С. ТЫМЧИК

Киевский политехнический институт

Представлены результаты разработки алгоритма поиска экстремальных значений видеосигнала ПЗС-приемника с повышенной точностью. Применение алгоритма позволит уменьшить погрешность на порядок по сравнению с размером фотоэлементов ПЗС.

Обработка видеосигнала ПЗС-приемников, применяемых во многих контрольно-измерительных устройствах и системах технического зрения, часто сводится к определению геометрических и энергетических параметров некоторых характерных точек изображения максимумов (минимумов) светового поля, точек перегиба, точек перехода через заданный уровень и др.). Точность измерения указанных величин зависит от погрешностей преобразования распределения интенсивности светового поля в видеосигнал. Поскольку это преобразование является дискретным, точность определения положения характерных точек изображения ограничивается периодом ПЗС-структуры.

Известен алгоритм более точного определения положения максимума светового потока в изображении путем вычисления центра тяжести видеосигнала [1, 2]

$$x_m = \frac{\sum_{j=1}^N x_j A_j}{\sum_{j=1}^N A_j}, \quad (1)$$

где A_j — амплитуда j -го импульса; $x_j = dj$, d — период ПЗС-структуры; N — количество фотоэлементов. В [3] описана аппаратная реализация этого алгоритма при обработке видеосигнала, формируемого фотодиодной матрицей, причем точность определения положения центра тяжести составляет $1 \div 3,5$ мкм при размере фотоэлементов 16 мкм. Однако несмотря на простоту и надежность, алгоритм (1) обладает рядом существенных недостатков: центр тяжести совпадает с максимумом видеосигнала только в случае симметричного распределения интенсивности светового поля, поэтому возможны изменения положения центра тяжести, при искажении формы светового пятна; алгоритм (1) связан с весьма узким классом задач обработки видеосигнала, что и ограничивает его применение.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма определения с повышенной точностью геометрического положения экстремальных точек видеосигнала ПЗС, не связанного с каким-либо конкрет-

ным изображением. Разработанный алгоритм сводится к двум процедурам: определению положения экстремума с точностью до периода ПЗС-структуры; уточнению положения экстремума.

Задача грубого обнаружения решается путем последовательного просмотра значений A_j текущего элемента массива амплитуд видеосигнала и отбора элементов, удовлетворяющих выбранному критерию. Например, при поиске максимумов (минимумов) таким критерием может быть условие

$$A_j > A_{j+i} \text{ или } A_j < A_{j+i}, \quad i \in [-m; m], \quad (2)$$

величина m определяет размер окрестности, в пределах которой проверяется соответствие j -го элемента критерию (2). Очевидно, что путем прямого сравнения можно обнаружить лишь максимумы и минимумы видеосигнала. Для обнаружения же точек перегиба необходимо использовать видоизмененный критерий

$$A_{j+1} - A_{j-1} \geq A_{j+i+1} - A_{j+i-1}, \quad i \in [-m; m], \quad (3)$$

где величина $A_{j+1} - A_{j-1}$ пропорциональна значению производной исходного видеосигнала в точке j .

Сущность процедуры уточнения положения экстремума заключается в интерполяции дискретного видеосигнала непрерывной функцией и последующем вычислении поправки, уточняющей положение экстремума. Выбор интерполирующей функции может быть различным в зависимости от класса решаемой задачи и используемой модели видеосигнала. Однако в общем случае, когда применение тех или иных моделей видеосигнала затруднительно, в качестве интерполирующей функции целесообразно использовать полином второго порядка

$$A(x) = \sum_{p=0}^2 a_p x^p, \quad (4)$$

где коэффициенты a_p определяются по методу наименьших квадратов [4]. Совмещая центр локальной системы координат с ранее определенным положением экстремума, получаем для коэффициентов a_p систему уравнений

$$\begin{aligned} a_0 X_0 + a_2 X_2 &= Y_0, \\ a_1 X_2 &= Y_1, \\ a_0 X_2 + a_2 X_4 &= Y_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где $X_p = \sum_{i=-m}^m x_i^p$, $Y_p = \sum_{i=-m}^m x_i^p A_i$. Дифференцируя $A(x)$ и приравнявая результат нулю, получаем уточняющую поправку

$$\xi_m = -a_1 / 2a_2, \quad (6)$$

где значения коэффициентов a_1 и a_2 получены из (5):

$$a_1 = Y_1 / X_2, \quad a_2 = (Y_2 X_0 - Y_0 X_2) / (X_0 X_4 - X_2^2). \quad (7)$$

Для сокращения вычислений можно представить (6) в виде

$$\xi_m = \sum_{i=-m}^m v_i A_j / \sum_{i=-m}^m w_i A_j, \quad (8)$$

где v_i, w_i — заранее вычисленные весовые коэффициенты, определяемые лишь размером зоны, в которой производится интерполяция видеосигнала. Представление уточняющей поправки в виде (8) является более общим, чем (6), так как не ограничивает выбор весовых коэффициентов. Так, например, (8) может быть сведено к (1), если положить $v_i = x_i, w_i = 1$.

Отметим, что выбор весовых коэффициентов на основе метода наименьших квадратов описанным выше способом не всегда является оптимальным.

При наличии шумов изображения, а также в случае, когда система (5) близка к вырожденной, что соответствует случаю «пологого» экстремума видеосигнала, вычисление поправки указанным способом может дать большую ошибку. Чтобы избежать вырождения системы можно применить следующую модифицированную процедуру: производить линейную интерполяцию производной, а не самого видеосигнала. В этом случае поправка вычисляется в виде

$$\xi_m' = -a_0' / a_1', \quad (9)$$

где $a_0' = Y_0' / X_0, a_1' = Y_1' / X_2, Y_p' = \sum_{i=-m}^m x_i^p (A_{i+1} - A_{i-1})$.

Очевидно, что при таком подходе весовые коэффициенты в формуле (8) также будут другими.

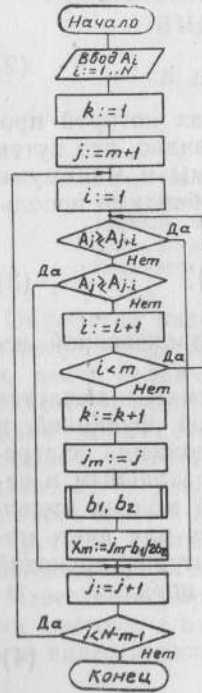
Далее приведем выражения для весовых коэффициентов v_i, w_i и v_i', w_i' , соответствующих квадратичной интерполяции области экстремумов видеосигнала и линейной интерполяции их производной:

$$v_i = -i(4m^2 + 4m - 3), \quad w_i = -10m^2 - 10m + 30i^2; \quad (10)$$

$$v'_{\pm(m+1)}, \pm m = \pm m(m+1), \quad v'_{i \neq \pm m, \pm(m+1)} = 0,$$

$$w'_{\pm(m+1)} = -3m, \quad w'_{\pm m} = -3(m+1), \quad w'_{i \neq \pm m, \pm(m+1)} = 6. \quad (11)$$

Структурная схема описанного алгоритма приведена на рисунке. Экспериментальная проверка точности определения положения максимума видеосигнала производилась при помощи автоматизированной системы фотометрирования световых полей [5] следующим образом. Пучок когерентного излучения гелий-неонового лазера ЛГН-207Б фокусировался короткофокусной линзой в пятно диаметром, приблизительно равным 140 мкм, на входное окно ПЗС-приемника, содержащего 256 фотоэлементов шириной $d = 23$ мкм. При этом по описанному выше алгоритму определялось положение максимума пучка излучения. Затем



ПЗС-приемник, установленный на микрометрическом столе, перемещался в направлении, перпендикулярном оси пучка. Перемещения регистрировались микрометром с ценой деления шкалы в 1 мкм. Сравнение показаний микрометра и результатов обработки видеосигнала по представленному алгоритму показало, что погрешность предлагаемого метода определения положения экстремума не превышает $0,1d$.

В качестве примера рассмотрим описанный алгоритм применительно к задаче измерения ширины прозрачной щели, либо диаметра проволоки [6, 7]. Существуют два метода технического решения этой задачи: дифракционный и теневых проекций.

В первом случае, как известно, задача сводится к определению расстояний между минимумами (максимумами) распределения дифрагированного поля, и алгоритм ее решения может быть применен в таком виде, как он представлен на схеме. На основе этого алгоритма авторами было реализовано программное обеспечение лазерного измерителя ЛИР-1 размерного износа режущего инструмента [6].

Во втором случае распределение интенсивности светового поля в теневой проекции объекта описывается выражением

$$J(x) = |h(x) * t(x/\Gamma)|^2, \quad (12)$$

где $h(x)$ — функция рассеяния оптической системы; $t(x) = \text{rect}(x/b)$ — амплитудный коэффициент пропускания щели шириной b ; Γ — коэффициент линейного увеличения оптической системы. Ширина щели в этом случае характеризуется расстоянием между точками перегиба функции $J(x)$. Действительно, дифференцируя (12) по x и применяя теорему о производной свертки, получаем выражение:

$$\frac{dJ(x)}{dx} = 2 |h(x) * t(x/\Gamma)| \left(h \left(x + \frac{b}{\Gamma} \right) - h \left(x - \frac{b}{\Gamma} \right) \right), \quad (13)$$

из которого следует, что производная интенсивности имеет положительный и отрицательный максимумы в точках $x_{m1} = -b/\Gamma$ и $x_{m2} = b/\Gamma$, соответствующих точкам солинейного изображения краев щели. Координаты же x_{m1} и x_{m2} могут быть достаточно точно определены по описанному алгоритму квадратичной интерполяции.

ЛИТЕРАТУРА

- Solomon P. M., Goss W. C. A microprocessor-controlled CCD star tracer. — AIAA Paper, 1976, N 116, p. 1.
- Архангельский В. А., Гречкин Ю. В., Густайтис В. И. Зрительная система на ПЗС матрице и микро-ЭВМ «Электроника-60» для задач слежения за контуром. — В сб.: Методы и средства обработки оптической информации. М.: МДНТП, 1983, с. 43—47.
- Bertani D., Celica M., Ciliberto S., Francini F. High-resolution light spot localization with protodiode arrays. — Rev. Sci. Instrum., 1984, vol. 55, N 8, p. 1270—1272.
- Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. — М.: Наука, 1981.
- Кривошлыков А. Ю., Сахно С. П., Тымчик Г. С. Автоматизированная система фотометрирования световых полей на базе ПЗС приемника и ЭВМ М-6000. — В сб.: Фотометрия и ее метрологическое обеспечение, М.: ВНИИОФИ, 1984, с. 244.

6. Коломеец С. Д., Кривошлыков А. Ю., Остафьев В. А., Тымчик Г. С. Лазерный измеритель размерного износа режущего инструмента для токарных станков с ЧПУ. — В сб.: Применение лазеров в технологии, системах передачи и обработки информации, Ленинград: ЛДНТП, с. 84—85.
7. Митрофанов А. С., Крылов К. И., Прокопенко В. Г. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. — Л.: Машиностроение, 1978.

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
4 февраля 1985 г.