

Из изложенного можно сделать следующие практические выводы: при решении задачи (13) с приборами (3) и (4) достаточно вести поиск решения на границах областей X' и X'' ; учитывая время счета на БЭСМ-6 и высокую, как правило, стоимость измерительных приборов типа (3) и (4), алгоритм покоординатного подъема (спуска) может быть применен для приближенного решения задач (13), (14) путем вариации начальных размещений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдулаев Ш.-С. О., Беседин Б. А. О синтезе оптимальных фильтрующих и сглаживающих информационно-измерительных систем.— «Автометрия», 1974, № 2, с. 10—18.
2. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. М., «Наука», 1971.
3. Аоки М. Оптимизация стохастических систем. М., «Наука», 1971.

*Поступила в редакцию 16 марта 1977 г.;
окончательный вариант — 1 декабря 1977 г.*

УДК 621.317.799 : 621.397.13 : 621.385.832

С. Л. ГОРЕЛИК, В. П. МАНДРАЖИ, А. Я. РЫФТИН

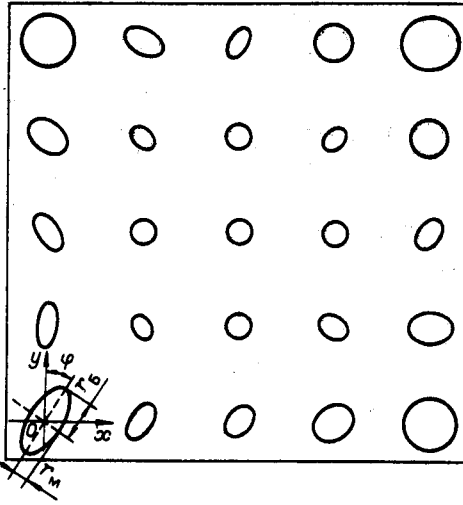
(Ленинград)

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ НА ТРУБКЕ С НАКОПЛЕНИЕМ

При решении ряда задач обработки изображений возникает необходимость точного измерения координат объекта. Перспективно для этой цели использование телевизионных датчиков на передающей трубке с накоплением, которые, наряду с возможностью работы без промежуточной записи изображения на фотоноситель, обеспечивают высокую чувствительность при измерении. Такие датчики применяются в системах автоматизации обработки данных с трековых камер, в системах измерения координат астрообъектов, при обработке данных биологического и медицинского экспериментов, в подсистемах зрительной ориентации робота.

Учитывая дискретный характер телевизионного изображения, удобно представить реакцию телевизионного датчика на заданный входной объект в виде двумерной матрицы, элементами которой являются отсчеты видеосигнала на выходе датчика. Шаг дискретизации по кадру определяется шагом разложения, а по строке выбирается, например, по теореме Котельникова. Такое пространственное распределение отсчетов видеосигнала в плоскости изображения будем в дальнейшем условно называть передаточной матрицей трубки (ПМТ).

При разработке телевизионных систем, предназначенных для измерения координат, важно исследовать влияние распределений отсчетов в ПМТ на структуру измерительной системы и на точность измерений, особенно для датчиков на передающих трубках с накоплением, где ПМТ зависит от параметров входного светового воздействия, т. е. является нелинейной. Кроме того, преобразование изображения объекта в телевизионный сигнал пространственно неоднородно, т. е. ПМТ зависит от положения объекта в телевизионном растре, что обусловлено неоднородностью электронно-оптических aberrаций фокусирующе-



Распределение форм и ориентаций сечений пучка по полю изображения для видикона ЛИ-421, рассчитанное на основе экспериментальных измерений.

отклоняющей системы (см. рисунок). Нелинейность и пространственная неоднородность ПМТ — следствие коммутационных эффектов в передающих трубках.

В данной работе рассматривается влияние коммутационных эффектов на вид ПМТ при работе телевизионной системы по точечным объектам.

Вычисление ПМТ для идеализированной модели трубки. Моделирование процессов формирования сигнала от точечного

объекта осуществлялось на идеализированной модели трубки с накоплением [1, 2]. Моделирование проводилось с учетом электронно-оптических aberrаций, вследствие которых сечение коммутирующего пучка может быть эллипсообразным и иметь произвольную ориентацию в плоскости изображения.

Приведем исходные данные модели:

а) параметры разложения: I — полный ток пучка; φ — ориентация большой оси эллиптического сечения пучка относительно осей системы координат xOy , связанной с направлением развертки (см. рисунок); r_m, r_b — условные радиусы малой и большой полуосей сечения пучка; g_s — шаг разложения; v — скорость развертки; m — номер коммутирующей строки ($m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) (положение нулевой строки совпадает с положением центра изображения объекта, знак «минус» соответствует строкам, предшествующим нулевой);

б) параметры изображения: r_{e1} — условный радиус распределения поверхностной плотности заряда, накопленного на мишени от точечного объекта; σ_0 — максимальная плотность накопленного на мишени заряда, пропорциональная освещенности объекта; G — микросмещение относительно центра изображения объекта середины 0-й строки по направлению оси Y .

Все пространственные величины нормированы к условному радиусу r_0 пучка с круглым сечением.

Определение относительной величины тока выходного сигнала трубки проводится по следующей формуле:

$$\frac{i_e(A, m)}{I} = \frac{TM}{2p\sqrt{\pi}} \int_{x_1}^{x_2} \left[\Phi \left\{ Td [g_2(x) - G - (m-1)g_s] - \frac{(x-A)a_f}{2p} \right\} - \Phi \left\{ Td [g_1(x) - G - (m-1)g_s] - \frac{(x-A)a_f}{2p} \right\} \right] dx, \quad (1)$$

где x_1, x_2, g_1, g_2 — границы активной части пучка, которые для точечного объекта находятся из условия равенства накопленного и сообщаемого пучком зарядов:

$$\sigma_0 \exp \left[-\frac{r_0^2}{r_e^2} (x^2 + y^2) \right] = \frac{\sigma_{\infty}^{\text{III}}}{2} \left[1 - \Phi \left\{ pT(x-A) - \right. \right.$$

$$-\frac{a_j T [y_j - G - (m-1)g_\delta]}{2p} \left\} \exp \left\{ -\frac{M^2 T^2}{p^2} [y - G - (m-1)g_\delta]^2 \right\} \right\}.$$

Здесь

$$T = r_0/r_m; \quad M = r_m/r_0; \quad p = \sqrt{\cos^2 \varphi + M^2 \sin^2 \varphi};$$

$$d = \sqrt{\sin^2 \varphi + M^2 \cos^2 \varphi}; \quad a_j = (1-M^2) \sin 2\varphi;$$

$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi_0}} \int_0^z e^{-x^2} dx$ — интеграл вероятности; $\sigma_\infty^{\text{III}} = \frac{\sqrt{\pi} j_0 r_0 TM}{2v} = \sigma_\infty \frac{TM}{p}$ — плотность заряда, сообщаемого пучком участкам мишени на оси строки (где j_0 — максимальная плотность электронов в пучке); A — текущее расстояние по оси x между центрами изображения объекта и электронного пучка.

Расчеты проводились для следующих значений параметров:

$$\varphi = -90^\circ \div +90^\circ; \quad M = 1,0 \div 0,25; \quad g_\delta = 1 \div 5; \quad \frac{\sigma_\infty^{\text{III}}}{\sigma_0} = 1 \div 20.$$

Результаты расчетов в виде ПМТ приведены в табл. 1—11. В каждой матрице по вертикали отложены номера строк j , а по горизонтали — номера временных отсчетов i видеосигнала вдоль строк, взятые с интервалами, соответствующими размеру условного радиуса пучка r_0 . Амплитуды отсчетов нормированы к максимальной амплитуде видеосигнала при $M=1$ и занесены в соответствующие клетки матрицы. Координатами центра входного изображения являются $i=0, j=0$.

Одна из специфических особенностей формирования видеосигнала коммутирующим пучком с эллиптическим сечением — существенная зависимость параметров видеосигнала и, следовательно, ПМТ от формы и площади сечения пучка, т. е. от параметра $M=r_m/r_0$ (см. табл. 5—7). Уменьшение M приводит к увеличению площади сечения и падению плотности электронов на оси пучка в $T^2 M^2$ раз. С уменьшением M , помимо уменьшения амплитуд видеосигнала, происходит смещение координаты максимума видеосигнала по кадру относительно истинного положения объекта в сторону строк с меньшим номером, обусловленное возрастанием предварительного считывания зарядов. При $M=0,25$ и $\varphi=-45^\circ$ величина кадрового координатного смещения достигает элемента разложения (см. табл. 1, 4). Очевидно, что наибольшее координатное смещение по кадру имеет место при вертикальной ориентации сечения пучка ($\varphi=0^\circ$); при $M=0,25$ оно может достигать двух элементов разложения. При изменении M от 1,0 до 0,25 и $\varphi=-45^\circ$ номер

Таблица 1
ПМТ при $\sigma_\infty/\sigma_0 = 10$, $g_\delta = 2,5$, $\varphi = -45^\circ$, $T = 1,0$, $r_{el} = r_0$ для $M = 1,0$

$j \backslash i$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	0	0,01	0,09	0,18	0,17	0,08	0,01	0	0
0	0	0,12	0,50	0,90	0,06	0	0	0	0

Таблица 2

ПМТ при $\sigma_{\infty}/\sigma_0 = 10$, $g_{\delta} = 2,5$, $\varphi = -45^\circ$, $T = 1,0$, $r_{e1} = r_0$ для $M = 0,75$

$i \backslash j$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	0	0,02	0,09	0,20	0,26	0,17	0,01	0	0
0	0,01	0,1	0,39	0,78	0	0	0	0	0

Таблица 3

ПМТ при $\sigma_{\infty}/\sigma_0 = 10$, $g_{\delta} = 2,5$, $\varphi = -45^\circ$, $T = 1,0$, $r_{e1} = r_0$ для $M = 0,5$

$i \backslash j$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-2	0	0	0	0	0,01	0,02	0,02	0,01	0
-1	0	0,01	0,09	0,2	0,31	0,4	0,29	0,1	0
0	0	0,04	0,23	0,41	0,06	0	0	0	0

наибольшего отсчета видеосигнала вдоль строк изменяется от $i = -1$ до $i = +2$, что соответствует изменению строчного смещения на $3/2,5 = 1,2$ элемента разложения.

Другое специфическое проявление электронно-оптических aberrаций — зависимость вида ПМТ от угла ориентации эллипсообразного сечения (см. табл. 5—7). При вертикальной ориентации сечения пучка и $M = 0,5$ (см. табл. 6) сигнал падает меньше относительно амплитуды видеосигнала при $M = 1$ (см. табл. 1), чем при $\varphi = +45^\circ$ (см. табл. 5, 7, 9). Действительно, при $\varphi = 0$ амплитуда падает на 20%, а при $\varphi = +45^\circ$ почти вдвое. Следует обратить внимание на различный вид ПМТ при $\varphi = -45^\circ$ и $\varphi = +45^\circ$. Амплитуда видеосигнала и координатные смещения по кадру мало зависят от знака угла ориентации сечения*. Строчные же координатные смещения при разных знаках углов ориентаций сечения не только значительно изменяются по величине, но и меняют знак. Например, при $\varphi = -45^\circ$ $i = -1$, а при $\varphi = +45^\circ$ $i = +2$.

Координатные смещения и вид ПМТ существенно зависят от освещенности и размеров изображения точечного объекта. Это видно из табл. 8, 9, где приведены ПМТ соответственно для освещенности, в 10 раз большей, чем в табл. 1 (при том же размере изображения), и для размера изображения, в 2,5 раза большего, чем в табл. 1 (при той же освещенности). Эти выводы подтверждаются и экспериментальными зависимостями, приведенными, например, в работе [3] для видикона ЛИ-421.

В реальных трубках происходит одновременное изменение параметров M , φ , T по полю изображения. Ниже приводятся результаты вычислений ПМТ для экспериментально полученных распределений

* При $\varphi = +45^\circ$ амплитуда и координатное смещение по кадру несколько больше вследствие считывания передней кромки пучка, направленной к объекту.

Таблица 4

ПМТ при $\sigma_\infty/\sigma_0 = 10$, $g_\delta = 2,5$, $\varphi = -45^\circ$, $T = 1,0$, $r_{e1} = r_0$ для $M = 0,25$

$i \backslash j$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-2	0	0	0	0	0,01	0,02	0,12	0,2	0,11
-1	0	0	0	0,03	0,17	0,39	0,46	0,19	0,02
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 5

ПМТ при $\sigma_\infty/\sigma_0 = 10$, $g_\delta = 2,5$, $M = 0,5$, $T = 1$, $r_{e1} = r_0$ для $\varphi = -45^\circ$

$i \backslash j$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
-2	0	0	0	0	0,01	0,02	0,02	0,01
-1	0	0,01	0,07	0,2	0,31	0,4	0,29	0,1
0	0	0,04	0,23	0,41	0,06	0	0	0

сечений пучка по полю изображения для видикона ЛИ-421 (см. рисунок). В табл. 10, 11 центральная матрица ($x=0$, $y=0$) относится к ПМТ в центре поля изображения, угловые матрицы иллюстрируют ПМТ в углах поля изображения. Например, матрица с координатами $x=-1$, $y=-1$ является ПМТ в левом нижнем углу поля изображения. Нумерация строк раstra связана по-прежнему только с истинным положением объекта.

Полученные результаты иллюстрируют значительную пространственную неоднородность ПМТ по полю изображения. Величины координатных ошибок, обусловленные эффектами считывания, при наличии электронно-оптических aberrаций изменяются по полю изображения. Например, в центре поля изображения $i=1$, $j=0$, а в окрестности $x=1$, $y=1$ имеют координатные смещения $i=2$, $j=-1$. Учет этих координатных ошибок затрудняется вследствие зависимости вида ПМТ от взаимного расположения центра изображения и осей коммутирующих строк, т. е. микросмещения G . С изменением G меняется величина не только кадровых координатных смещений, но и строчных смещений (см. табл. 10, 11).

При разработке измерителя координат малоразмерных объектов необходимо учитывать зависимость пространственного распределения отсчетов видеосигнала от всех указанных факторов.

Структура оптимального измерителя координат. Полученные расчетным или экспериментальным путем пространственные распределения отсчетов видеосигнала позволяют оценить структуру и характеристики измерителя координат. Выбор структуры оптимального измерителя и определение точностных оценок можно выполнить, например, с помощью результатов, приведенных в работе [4], где решается задача построения оптимального линейного измерителя координат объекта на плоскости и приводятся оценки точности его работы.

Как следует из вышеизложенного, особенностью рассматриваемой задачи является квазислучайный характер ПМТ даже при известном

Таблица 6

ПМТ при $\sigma_\infty/\sigma_0=10$, $g_\delta=2,5$, $M=0,5$, $T=1$, $r_{e1}=r_0$ для $\varphi=0^\circ$

$i \backslash j$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
-2	0	0,01	0,03	0,07	0,08	0,04	0,01	0
-1	0	0,04	0,23	0,52	0,75	0,23	0,07	0,01
0	0	0	0,06	0,05	0	0	0	0

распределении входного изображения. Поэтому при построении оптимального измерителя координат следует учитывать, что ПМТ известна лишь с некоторой точностью и может изменяться в пределах, зависящих от параметров объекта и коммутирующего пучка. Оптимальным измерителем координат будем называть измеритель, обеспечивающий минимальную случайную ошибку в оценке координат при работе с не точно заданным входным сигналом. На основании выводов [4] можно утверждать, что линейный оптимальный измеритель состоит из двумерного фильтра и решающего устройства, в котором вычисляются координаты объекта.

Двумерный фильтр состоит из двух последовательных линейных звеньев. В первом звене производится «отбеливание» изображения, во втором — свертка отбеленного изображения с отбеленным эталоном [4].

Так как ПМТ зависит от многих параметров, то наивысшую точность обеспечивает адаптивный измеритель, перестраиваемый при изменении входного сигнала. В этом случае должны быть выполнены следующие условия:

а) зависимость вида ПМТ от изменений вышеуказанных параметров должна быть относительно гладкой;

б) необходимо осуществить предварительную калибровку датчика, т. е. определить зависимость ПМТ от указанных параметров, и занести результаты калибровки в устройство оперативной памяти, входящее в состав измерителя;

в) следует ввести этап предварительной грубой оценки изменяющегося параметра, например, положения объекта в поле изображения, освещенности объекта и т. д.;

г) по результатам грубой оценки и с учетом данных предварительной калибровки необходимо перестраивать характеристику фильтра, входящего в состав измерителя.

Практическая реализация адаптивного измерителя координат может оказаться весьма сложной. Поэтому при снижении требований к точности измерений целесообразно использовать оптимальный неадаптивный измеритель, в котором двумерный фильтр настраивается на

Таблица 7

ПМТ при $\sigma_\infty/\sigma_0=10$, $g_\delta=2,5$, $M=0,5$, $T=1$, r_{e1}/r_0 для $\varphi=+45^\circ$

$i \backslash j$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
-2	0,01	0,02	0,02	0,01	0	0	0	0
-1	0,09	0,30	0,52	0,4	0,09	0,01	0	0
0	0,03	0,15	0,38	0,05	0	0	0	0

Таблица 8

ПМТ при $M=1$, $T=1$, $g_{\delta}=2,5$ для $\sigma_{\infty}/\sigma_0=1,0$, $r_{el}=10$ мкм

$i \backslash j$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	0	0,02	0,05	0,10	0,11	0,06	0,02	0	0
0	0,02	0,07	0,24	0,67	0,96	0,03	0	0	0
1	0	0	0	0,03	0,04	0	0	0	0

усредненную по всем квазислучайным параметрам ПМТ. При технической реализации такого «усредненного измерителя» имеются возможности усреднения ПМТ как с учетом сдвигов отсчетов в ПМТ относительно истинного положения объекта, так и без учета этих сдвигов. В первом случае больше случайная ошибка, но меньше систематическая.

Решающее устройство на основании полученного после фильтрации распределения видеосигнала осуществляет вычисление оценок искомым координат. Известно, что координаты максимума сигнала на выходе фильтра и являются оптимальными оценками исходных координат. Так как телевизионное изображение дискретно и даже в адаптивном измерителе фильтр отличается от оптимального, то сигнал на выходе фильтра становится более пологим и положение его максимума более неопределенно.

Если считать, что вероятность нахождения максимума в некоторой точке (x, y) пропорциональна амплитуде сигнала на выходе фильтра в этой точке, то оптимальной оценкой координаты будет момент первого порядка. Таким образом, в решающем устройстве должно вычисляться среднее значение координаты искомого объекта.

На основании изложенного можно предложить следующий алгоритм оптимального измерения координат. Выходной сигнал с телевизионной камеры дискретизируется по времени и квантуется с помощью аналого-цифрового преобразователя, после чего формируется ПМТ $[U_{ij}]$, аналогичная приведенным в табл. 1—11. Затем $[U_{ij}]$ свертывается с матрицей $[R_{ij}]$, характеризующей передаточную характеристику дискретного оптимального фильтра и полученной на основании предварительных расчетов или экспериментов. При белом шуме распределения

Таблица 9

ПМТ при $M=1$, $T=1$, $g_{\delta}=2,5$ для $\sigma_{\infty}/\sigma_0=10,0$, $r_{el}=50$ мкм

$i \backslash j$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-2	0,01	0,03	0,04	0,06	0,05	0,04	0,02	0,01	0
-1	0,09	0,26	0,43	0,54	0,39	0,31	0,11	0,03	0,01
0	0,13	0,43	0,76	1	0,78	0,24	0,04	0	0
1	0,03	0,07	0,02	0,07	0	0	0	0	0

Таблица 10

Распределение ПМТ по полю изображения при $\sigma_\infty/\sigma_0=10$, $g_0=2,5$, $r_{e1}=10$ мкм, $r_0=11,5$ мкм для $G=0$

$\hat{x}_1=-0,61g_0$, $\hat{y}_1=-1,40g_0$ $\hat{x}_2=-0,66g_0$, $\hat{y}_2=-1,35g_0$ $\hat{x}_1=-0,62g_0$, $\hat{y}_1=-1,41g_0$ $\hat{x}_2=-0,67g_0$, $\hat{y}_2=-1,32g_0$

$i \backslash j$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-3	0	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0
-2	0,02	0,09	0,13	0,16	0,15	0,12	0,03	0,01	0
-1	0,17	0,30	0,39	0,28	0,17	0,04	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$x=-1, y=1$

$i \backslash j$	-4	-3	-2	-1*	0	1	2	3	4
-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	0	0	0,001	0,003	0,002	0,001	0	0	0
-1	0,01	0,05	0,16	0,27	0,24	0,12	0,02	0	0
0	0,02	0,15	0,63	0,90	0,03	0	0	0	0

$x=0, y=0$

$x=-1, y=-1$

$i \backslash j$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-3	0	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,05	0,06
-2	0,02	0,08	0,13	0,17	0,17	0,14	0,09	0,33	0,31
-1	0,07	0,24	0,39	0,41	0,20	0	0	0,03	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$\hat{x}_1=-0,52g_0$, $\hat{y}_1=-1,45g_0$

$\hat{x}_2=-0,27g_0$, $\hat{y}_2=-1,35g_0$

$\hat{x}_1=0,55g_0$, $\hat{y}_1=-1,71g_0$

$\hat{x}_2=0,64g_0$, $\hat{y}_2=-1,61g_0$

$x=1, y=1$

$\hat{x}_1=-0,51g_0$, $\hat{y}_1=-0,41g_0$

$\hat{x}_2=-0,40g_0$, $\hat{y}_2=-0,23g_0$

$x=1, y=-1$

Таблица 11

Распределение ПМТ по полю изображения при $\sigma_{\infty}/\sigma_0 = 10$, $g_0 = 11,5$ мкм для $G = 0,5$ $g_0 = 1,25$

$\hat{x}_1 = -0,44g_0$, $\hat{y}_1 = -1,99g_0$ $\hat{x}_2 = -0,63g_0$, $\hat{y}_2 = -1,82g_0$ $\hat{x}_1 = -0,52g_0$, $\hat{y}_1 = -2,00g_0$ $\hat{x}_2 = -0,62g_0$, $\hat{y}_2 = -1,83g_0$

A \ n	x = -1, y = 1				x = 0, y = 0				x = 1, y = -1									
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-3	0,02	0,03	0,04	0,05	0,04	0,03	0,02	0	0	0,02	0,04	0,05	0,06	0,05	0,04	0,02	0,01	0
-2	0,14	0,21	0,28	0,30	0,28	0,20	0,13	0,06	0,01	0,13	0,24	0,33	0,33	0,29	0,19	0,10	0,02	0
-1	0,1	0,14	0,04	0	0	0	0	0	0	0,07	0,15	0,05	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

x = -1, y = 1

x = 1, y = -1

x = 0, y = 0

$\hat{x}_1 = -0,41g_0$, $\hat{y}_1 = -0,96g_0$

$\hat{x}_2 = -0,43g_0$, $\hat{y}_2 = -0,93g_0$

x = -1, y = -1

x = 1, y = -1

A \ n	x = -1, y = -1				x = 0, y = 0				x = 1, y = 1									
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-3	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,05	0,04	0,02	0	0,02	0,04	0,05	0,01	0,05	0,10	0,15	0,16	0,08
-2	0,07	0,18	0,28	0,35	0,30	0,22	0,14	0,07	0	0,07	0,14	0,22	0,10	0,30	0,50	0,41	0,31	0,12
-1	0,09	0,13	0,11	0	0	0	0	0	0	0,09	0,13	0,05	0,05	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$\hat{x}_1 = -0,37g_0$, $\hat{y}_1 = -2,00g_0$

$\hat{x}_2 = -0,54g_0$, $\hat{y}_2 = -1,89g_0$

$\hat{x}_1 = 0,61g_0$, $\hat{y}_1 = -2,21g_0$

$\hat{x}_2 = 0,52g_0$, $\hat{y}_2 = -2,15g_0$

элементов матрицы $[R_{ij}]$ с точностью до сдвига совпадают с пространственным распределением отсчетов в ПМТ. Затем матрицы $[U_{ij}]$ и $[R_{ij}]$ свертываются по параметрам сдвига k и l , образуя новую матрицу $[C_{kl}]$. В решающем устройстве вычисляются оценки координат в виде средних значений:

$$\bar{x} = \frac{\sum_k \sum_l k C_{kl}}{\sum_k \sum_l C_{kl}}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_k \sum_l l C_{kl}}{\sum_k \sum_l C_{kl}}. \quad (2)$$

При настройке $[R_{ij}]$ на усредненное распределение видеосигнала появляется дополнительная систематическая ошибка. Эта ошибка обусловлена несимметричностью $[U_{ij}]$ относительно осей, проходящих через истинное положение объекта ($i=0, j=0$) при различных положениях объекта в поле изображения (см. рисунок). Расчеты показывают, что эти ошибки достаточно велики (до 2—3 r_0), но их изменение по полю изображения имеет достаточно гладкий характер, что обусловлено медленным характером изменений сечений пучка по полю изображения [5]. Поэтому возможно описание систематических ошибок полиномами второго и третьего порядка (с точностью 0,1—0,5%).

Следует отметить, что возможно использование более простого по структуре измерителя координат. Хотя такой измеритель не является строго оптимальным, проигрыш в точности часто оказывается незначительным и полностью оправдывается упрощением технической реализации. Например, в структуре измерителя можно не использовать двумерный оптимальный фильтр. В этом случае на вход решающего устройства, работающего по формуле (2), поступает непосредственно сигнал $[U_{ij}]$. Если объект имеет постоянную освещенность, то целесообразно ограничиться двумя уровнями квантования сигнала $[U_{ij}]$. Это приводит не только к значительному упрощению технической реализации, но и к уменьшению влияния шумов, уровень которых меньше порога квантования, на точность измерения координат.

Можно упростить алгоритм работы и решающего устройства, например, проводить оценки координат по формулам:

$$\hat{x} = \frac{\sum_j \hat{x}_j A_j}{\sum_j A_j}; \quad \hat{y} = \frac{\sum_j y_j A_j}{\sum_j A_j}, \quad (3)$$

где A_j — амплитуда видеосигнала на j -й строке; y_j — координата j -й строки; \hat{x}_j — оценка координаты объекта, полученная по временному положению видеоимпульса на j -й строке.

Расчеты показали, что взвешенное суммирование оценок координат по формуле (3) позволяет существенно уменьшить ошибки, связанные с пространственной дискретизацией изображения (см. табл. 10, 11).

Рассмотренная структура оптимального измерителя координат, основанная на использовании ПМТ, особенно удобно реализуется при применении дискретных телевизионных датчиков, например, передающих камер на ПЗС и в цифровых телевизионных системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыфтин Я. А. Телевизионная система. Теория. М., «Сов. радио», 1967.
2. Рыфтин А. Я. Сигнал от точечного объекта на выходе идеальной трубки с накоплением (случай построчного разложения).— «Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения», 1973, вып. 4, с. 49.

3. Магомедов К. А., Рыфтин А. Я. Анализ параметров видеосигнала от точечного объекта на выходе видикона ЛИ-421.— «Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения», 1974, вып. 4, с. 43.
4. Ярославский Л. П. Точность и достоверность измерения положения двумерного объекта на плоскости.— «Радиотехника и электроника», 1972, т. XVII, вып. 4, с. 714.
5. Горелик С. Л., Кац Б. М. Электронно-лучевые трубки в системах обработки информации. М., «Энергия», 1977.

Поступила в редакцию 29 августа 1977 г.

УДК 522.62 : 681.335

Ю. А. ПОПОВ

(Новосибирск)

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ОПЕРАТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРОВ ФОТОННЫХ ВСПЫШЕК ПРИ СЧИТЫВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ С ЭКРАНА ЭОП

Важной задачей современной техники является исследование слабосветящихся объектов. Для их изучения используются электронно-оптические преобразователи (усилители) изображений (ЭОП).

Излучение слабосветящихся объектов представляет собой поток отдельных фотонов с интенсивностью от нуля до нескольких сотен в секунду. На выходе ЭОП при попадании на вход фотонов возникают вспышки света, изображения которых вследствие физической природы усиления ЭОП имеют конечные геометрические размеры [1]. Полезной информацией — действительным местоположением фотонов на катоде ЭОП — являются центры этих вспышек.

Необходимость определения центров фотонных вспышек возникает, в частности, при построении изображения слабосветящихся астрономических объектов или их спектров в памяти ЭВМ или специализированной электронной памяти. Для этой цели можно вводить в ЭВМ все изображение, считываемое с ЭОП, и поручить ЭВМ определять координаты центров, хотя это сопряжено с большими потерями времени на обработку (время обработки одного кадра изображения может составлять несколько минут при большом числе вспышек) и требует высокой скорости ввода данных. Поэтому стремятся освободить ЭВМ от переработки всей поступающей информации и накапливать в памяти только действительные координаты фотонов.

С этой целью разрабатываются или специальные приборы, подобные ЭОП, но не со световым, а с электрическим выходом, позволяющие мгновенно находить центры вспышек [2], или электронные устройства, определяющие координаты центров при считывании изображения с ЭОП с помощью сканирующих устройств телевизионного типа [3]. Первые могут работать только при последовательном поступлении фотонов и требуют высокого временного разрешения регистрирующих устройств. Устройства считывающего типа, имеющие аналоговую память на люминофоре ЭОП и мишени трубки, могут регистрировать фотоны, одновременно достигшие ЭОП, но не различают фотонов, попадающих в одно и то же место за время считывания кадра. Слившиеся пятна фотонных вспышек приводят к ошибкам при определении центров. В то же время при считывании изображения с ЭОП можно исключить шум, в том числе ионный шум фонового излучения, и согласовать скорость считывания