

З. Д. ГРИЦКИВ, Л. А. СНИДАРУК

(Львов)

## О ВЫБОРЕ ЗОН ПРИ ИНТЕРПОЛЯЦИОННО-УЗЛОВОМ МЕТОДЕ КОРРЕКЦИИ ДИСТОРСИИ ОТКЛОНЕНИЯ ПУЧКА В ЭЛТ

Интерполяционно-узловой метод формирования корректирующих сигналов, основанный на использовании структурно-программных функциональных преобразователей (ФП), нашел применение при осуществлении динамической фокусировки и коррекции астигматизма пятна по полю изображения ЭЛТ прецизионных систем обработки информации [1, 2], чем обеспечивается высокая разрешающая способность таких систем. Одновременно, как правило, требуется и прецизионное позиционирование пятна, т. е. необходима коррекция дисторсии отклонения [3, 4].

Один из возможных способов коррекции дисторсии отклонения пучка — формирование корректирующего сигнала по заданному закону и введение его в канал усилителя отклонения. Поскольку законы изменения корректирующих сигналов представляются непрерывными функциями (в общем случае с переменным знаком второй производной в одном квадранте рабочего поля экрана ЭЛТ), то их несложно реализовать посредством функциональных преобразователей. Очевидное преимущество ФП — простота технической реализации и удобство настройки системы.

Основными структурными узлами блока коррекции, построенного по интерполяционно-узловому принципу, являются [1] схемы адресации, интерполятор, ключи и аналоговая память. Элементы аналоговой памяти хранят подобранные при настройке точные значения корректирующих сигналов в узловых точках, соответствующих пересечению условных границ зон, на которые разбивается поле изображения. Значения корректирующих сигналов в межузловых точках определяются интерполятором, выполняющим в пределах участка квазилинейную (из-за ограниченной разрядности кода, поступающего на ЦАП интерполятора) интерполяцию ближайших четырех узловых значений.

Очевидно, что точность коррекции при таком методе зависит, прежде всего, от разрядности  $q$  управляющих кодов, т. е. от числа  $N = 2^q$  равных зон разбиения поля изображения по каждой из координат. Однако увеличение разрядности управляющих кодов на единицу ведет к увеличению числа зон вдвое, а числа узловых точек, а значит и элементов аналоговой памяти в каждом канале коррекции, — до  $(N + 1)^2$  (при равенстве разрядности кодов позиционирования пятна по обеим координатам отклонения). Так, при увеличении разрядности управляющих кодов с 3 до 4 число ключей, как и элементов памяти, в одном канале возрастает с 81 до 289. Такое увеличение объема схем, усложнение их настройки и снижение надежности не всегда оправданы.

Вместе с тем обусловленная дисторсией погрешность позиционирования сравнительно невелика в центральной области рабочего поля экрана и резко возрастает к краям. Отсюда следует, что при заданном допуске на погрешность позиционирования возможно разбиение поля на неравные зоны (более крупные в центре и уменьшающиеся к краям), что позволяет не увеличивать или даже сокращать число зон и, следовательно, узлов по сравнению с вариантом разбиения на равные зоны. Поскольку в соответствии с методом в узловых точках обеспечивается полная коррекция дисторсии, то выбор количества и размеров зон определяется погрешностью линейной аппроксимации корректирующей функции, осуществляемой интерполятором. Характер погрешностей позиционирования пятна по границам зоны в одном из квадрантов рабочего поля при «подушкообразной» дисторсии показан на рис. 1, где тонкими ли-

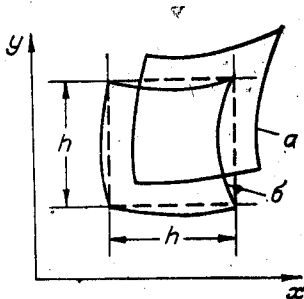


Рис. 1. Характер погрешностей позиционирования пятна по границам зоны.

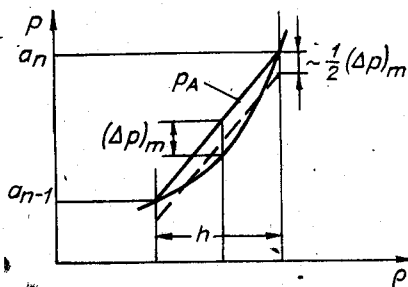


Рис. 2. Определение погрешности линейной аппроксимации.

ниями изображены условные границы зоны, пунктирными — границы зоны при идеальной коррекции, жирными — границы зоны при отсутствии (а) и наличии (б) коррекции.

Для определения величины погрешности линейной аппроксимации корректирующей функции обратимся к простейшему случаю разбиения поля изображения на равные зоны. В качестве корректирующей функции принимаем кубическую параболу  $p = k\rho^3$ , где  $\rho$  — обобщенная линейная координата в плоскости экрана ЭЛТ, что соответствует дисторсии третьего порядка, являющейся, как известно, основной составляющей дисторсии отклонения, если максимальный угол отклонения пучка не превышает  $22^\circ$  [5]. Современные прецизионные ЭЛТ имеют, как правило, максимальный угол отклонения не более  $20^\circ$ .

Для  $n$ -й зоны квадранта раstra по одной из координат отклонения значение узлового потенциала, подбираемого при настройке и соответствующего значению корректирующей функции, обозначим  $a_n$  для конца зоны и  $a_{n-1}$  для начала, где  $n = 1, 2, \dots, N/2$  (рис. 2).

Выражение для отрезка прямой  $p_A$ , аппроксимирующего функцию  $p$  в пределах одной зоны,

$$p_A = (a_n - a_{n-1})[\rho - (n-1)h]/h + a_{n-1},$$

где  $h$  — размер зоны. Значения корректирующей функции на краях зон для принятого закона ее изменения

$$a_n = k(nh)^3, \quad a_{n-1} = k[(n-1)h]^3.$$

Погрешность аппроксимации, характеризующаяся разностью значений функции  $p_A$  и  $p$ ,

$$\Delta p = p_A - p = kh^3\{\rho[n^3 - (n-1)^3]/h - (n-1)[n^3 - (n-1)^3] + (n-1)^3 - \rho^3/h^3\}. \quad (1)$$

Значение координаты, при которой функция  $\Delta p(\rho)$  имеет экстремум, определенное через ее производную,

$$\rho_m = h\sqrt{n^2 - n + 1/3} = h\sqrt{\psi}, \quad (2)$$

где  $n^2 - n + 1/3 = \psi$ .

Подставляя (2) в (1), приходим к выражению для максимальных значений ошибки аппроксимации

$$(\Delta p)_m = kh^3\psi(2\sqrt{\psi} - 3n + n^3/\psi). \quad (3)$$

Масштабный коэффициент  $k$  вычислим из граничного (для заданного рабочего поля экрана) значения корректирующей функции  $p_{гр}$ :

$$k = p_{гр}/\rho_{\max}^3 = 8p_{гр}/(Nh)^3.$$

Подставляя выражение для  $k$  в (3), получим наибольшее значение абсолютной погрешности в зоне

$$(\Delta p)_m = 8p_{гр}\psi(2\sqrt{\psi} - 3n + n^3/\psi)/N^3.$$

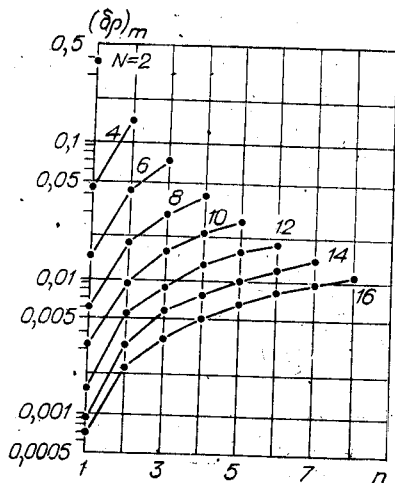


Рис. 3. Зависимость погрешности аппроксимации от числа зон рабочего поля ( $N$ ) и номера зоны в квадранте ( $n$ ).

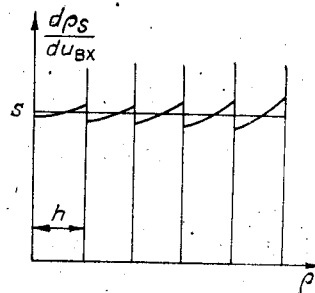


Рис. 4. Характер изменения скорости движения пятна по экрану при интерполяционно-узловом методе коррекции дисторсии.

Максимальная относительная погрешность в зоне

$$(\delta\rho)_m = (\Delta\rho)_m / \rho_{гр} = 8\psi(2\sqrt{\psi} - 3n + n^3/\psi) / N^3. \quad (4)$$

Последняя формула позволяет найти ошибку аппроксимации в каждой зоне при различном количестве зон. Результаты расчета приведены на рис. 3, на котором рассчитанные значения погрешности показаны точками. Отрезки линий служат для удобства определения точек, относящихся к данному числу  $N$ .

Для выбора числа зон по заданной величине допустимой ошибки позиционирования  $(\delta\rho)_{доп} = (\Delta\rho)_{доп} / \rho_{max}$  необходимо знать величину дисторсии отклонения  $(\Delta\rho)_{max}$ , расчетную чувствительность отклонения  $s = \rho / u_{вх}$  со входа усилителя отклонения, на который подается также корректирующий сигнал, и величину максимального отклонения  $\rho_{max}$ .

Величина дисторсии отклонения, как известно, определяется через коэффициент  $A$  дисторсии и угол  $\alpha$  отклонения:

$$(\Delta\rho)_{max} = A\alpha^3,$$

причем, согласно результатам [6], необходимо использовать осевой коэффициент  $A_0$  дисторсии либо коэффициент  $A_d$  дисторсии при отклонении по диагонали в зависимости от того, в каком направлении величина дисторсии больше по абсолютной величине. Поскольку существует погрешность аппроксимации корректирующей функции, после введения коррекции будет существовать остаточная погрешность позиционирования пятна, наибольшее значение абсолютной величины которой обозначим  $(\Delta\rho_0)_m$ , а относительную величину введем как

$$(\delta\rho)_m = (\Delta\rho_0)_m / \rho_{max}. \quad (5)$$

Отметим, что величина  $(\Delta\rho_0)_m$  определяет прогиб линий растра и поэтому может служить для вычисления геометрических искажений. С другой стороны, учитывая линейную связь между корректирующей функцией и сигналом коррекции  $u_k = \nu\rho$ , а также приведенное выше выражение для чувствительности отклонения, которое может быть представлено также в виде  $s = \rho_{k\max} / u_{k\max}$ , где  $\rho_{k\max}$  — наибольшее отклонение пятна, вызванное сигналом  $u_{k\max}$ , получим, что максимальная относительная погрешность корректирующей функции в зоне

$$(\delta\rho)_m = (\Delta\rho)_m / \rho_{гр} = (\Delta u_k)_m / u_{k\max} = (\Delta\rho_0)_m / \rho_{k\max}. \quad (6)$$

Объединяя (5) и (6), найдем, что

$$(\delta\rho)_m = (\delta\rho)_m (\Delta\rho)_{max} / \rho_{max} = (\delta\rho)_m (\delta\rho)_{max}, \quad (7)$$

где  $(\delta\rho)_{\max}$  — не что иное, как максимальное значение относительной величины дисторсии отклонения. Очевидно, что выбор зон должен удовлетворять условию

$$(\delta\rho)_m \leq (\delta\rho)_{\text{доп}}. \quad (8)$$

В качестве примера рассмотрим типичную ЭЛТ высокой разрешающей способности, для которой характерна величина дисторсии  $(\delta\rho)_{\max} = 0,05$ . Из равенства (7) при допустимой погрешности  $(\delta\rho)_{\text{доп}} = 0,001$  с учетом равенства (8) получим  $(\delta\rho)_m = 0,02$ . По рис. 3 определяем допустимое наименьшее число равных зон:  $N = 12$ . Для реализации такого варианта схем потребуется  $(N + 1)^2 = 169$  элементов памяти и ключей (в канале коррекции по одной координате). Из графика рис. 3, однако, видно, что относительная погрешность корректирующей функции не превышает значения  $(\delta\rho)_m = 0,02$ , если размер первой зоны ( $n = 1$ ) будет выбран из расчета  $N = 6$ , размер второй зоны — из расчета  $N = 8$ , размер третьей зоны — из расчета  $N = 10$  и размеры последующих зон — из расчета  $N = 12$ . Нетрудно убедиться, что общее число зон по одной координате в этом случае будет равно 10, и, следовательно, число элементов памяти и ключей сократится до 121.

Анализ ошибок аппроксимации проведен, как указано выше, при условии точной настройки схемы в узлах. Величина ошибки может быть снижена примерно вдвое, если узловые значения корректирующего сигнала подбирать при настройке таким образом, чтобы полная коррекция достигалась не в крайних (узловых), а в промежуточных точках зоны (см. штриховую линию на рис. 2).

При двухкоординатном отклонении необходимо учитывать, что погрешность позиционирования по данной координате, например  $x$ , возрастает при увеличении второй координаты  $y$ . Степень этого возрастания имеет в первом приближении квадратичную зависимость от координаты  $y$  и по величине зависит от коэффициента дисторсии  $A$ . В типичных устройствах с ЭЛТ высокой разрешающей способности погрешность позиционирования при этом возрастает на единицы процентов.

Как известно, дисторсия проявляется еще в одном виде искажений — нелинейности отклонения пятна по экрану ЭЛТ, которая оценивается отличием в скорости движения пятна в различных участках экрана. При отсутствии нелинейности величина отклонения  $\rho = su_{\text{вх}}$ . С учетом дисторсии третьего порядка отклонение будет равно

$$\rho = su_{\text{вх}} + k_0 u_{\text{вх}}^3$$

где  $k_0$  — постоянный коэффициент, значение которого зависит от величины дисторсии. Можно убедиться, что, с другой стороны,  $k_0 = kvs^4$ .

При наличии рассматриваемой коррекции скорректированное (суммарное) отклонение

$$\rho_s = su_{\text{вх}} + k_0 u_{\text{вх}}^3 - p_A vs.$$

После подстановки выражения для  $p_A$  с учетом того, что  $\rho = su_{\text{вх}}$  и  $h = \rho_{\max}/n_{\max} = su_{\text{вх}\max}/n_{\max}$ , где  $n_{\max} = N/2$  — число зон квадранта раstra по одной из координат, получим

$$p_s = su_{\text{вх}} + k_0 u_{\text{вх}}^3 - vs \{ (a_n - a_{n-1}) [n_{\max} u_{\text{вх}}/u_{\text{вх}\max} - (n-1)] + a_{n-1} \},$$

и, следовательно, скорость движения пятна по экрану в предположении линейной связи  $u_{\text{вх}}$  с временем равна

$$d\rho_s/du_{\text{вх}} = s + 3k_0 u_{\text{вх}}^2 - n_{\max} vs (a_n - a_{n-1})/u_{\text{вх}\max}.$$

Очевидно, что в пределах некоторой зоны скорость будет иметь минимальное и максимальное значения при соответственно минимальном и максимальном значениях напряжения  $u_{\text{вх}}$  в пределах зоны, т. е. на

границах зоны. Тогда коэффициент нелинейности отклонения в пределах зоны

$$\beta = 2 \frac{d\rho_s/du_{\text{вх}}|n - d\rho_s/du_{\text{вх}}|n-1}{d\rho_s/du_{\text{вх}}|n + d\rho_s/du_{\text{вх}}|n-1} 100\%$$

или после подстановок, с учетом того что  $u_{\text{вх } n} = hn/s$ ,  $u_{\text{вх } n-1} = h(n-1)/s$ ,

$$\beta = 2 \frac{3k_0(2n-1)}{s^3/h^2 + 3k_0(n^2 - n + 0,5) - 3k_0vs^4\psi} 100\%$$

Вычисления, выполненные в качестве примера с использованием приведенных выше исходных данных при расчете требуемого числа зон для заданной погрешности позиционирования ( $n=6$ ,  $(\delta\rho)_{\text{max}}=0,05$ ), а также в предположении, что  $\rho_{\text{max}}=50$  мм,  $u_{\text{вх max}}=5$  В (при этом  $k_0=0,02$  мм/В<sup>3</sup>,  $s=10$  мм/В,  $h=8,3$  мм), показывают, что значение коэффициента нелинейности в центральной зоне ( $n=1$ )  $\beta=0,42\%$ , в крайней зоне ( $n=6$ )  $\beta=4,6\%$ . Аналогичные вычисления коэффициента нелинейности в пределах отклонения 0—50 мм при отсутствии коррекции дисторсии дают значение  $\beta=14\%$ .

Важно отметить, что отклонения в скорости движения пятна по экрану при наличии зонной коррекции в целом носят характер, представленный на рис. 4. Приравнявая выражение для  $d\rho_s/du_{\text{вх}}$  к величине  $s$ , нетрудно получить, что скорость движения пятна будет равна заданной в точках, определяемых равенством

$$\rho = \sqrt{n_{\text{max}}vs^3(a_n - a_{n-1})/3k_0u_{\text{вх max}}}$$

Наибольшее отклонение в скорости наблюдается в крайней зоне, отклонение же в скорости между краем и центром рабочего поля экрана оказывается меньшим. В том же числовом примере коэффициент нелинейности, найденный с учетом скоростей в крайней и центральной точках рабочего поля, имеет значение  $\beta=2,33\%$ .

## ВЫВОДЫ

1. Интерполяционно-узловой метод может с успехом применяться для коррекции дисторсии отклонения пучка в электронно-лучевых приборах, т. е. позволяет существенно уменьшить координатные, геометрические и нелинейные искажения отклонения пятна.
2. Разбиение поля изображения на неравные зоны, размер которых убывает к краям, уменьшает объем схем при сохранении требуемой точности коррекции.
3. Погрешность позиционирования может быть уменьшена примерно вдвое, если сопряжение аппроксимирующей и корректирующей функций осуществлять не в узловых, а в промежуточных точках зон.
4. Нелинейные искажения отклонения имеют специфический характер, обусловленный тем, что скорость движения пятна по экрану в начале каждой зоны меньше, а в конце больше номинальной. По рабочему полю в целом нелинейные искажения при использовании интерполяционно-узлового метода коррекции в 3—4 раза меньше искажений, наблюдаемых при отсутствии коррекции.
5. Применение интерполяционно-узлового метода коррекции дисторсии особенно целесообразно в устройствах, в которых этот метод используется для коррекции фокусировки пятна, поскольку такие узлы, как схемы адресации, интерполяторы и ключи, могут быть общими.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Anders H., Antonsen I., Shkundenkov V., Stumpe B., Wiskott D. Dynamic astigmatism and focus correction of the cathode-ray tube of ERASME.— In: Oxford Conf. on Computer Scanning. Oxford: Nucl. Physics Laboratory of Oxford, 1974, v. 2, p. 605—625.

2. Грицкий З. Д., Зеляновский Ю. Е. Выбор разрядности управляющих кодов при интерполяционно-узловом методе коррекции фокусировки пучка в электронно-лучевых трубках.— Автометрия, 1978, № 3, с. 80—84.
3. Маркович М. Г. Коррекция координатных искажений при отклонении пучка в электронно-лучевых приборах.— Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения, 1972, вып. 1, с. 56—61.
4. Горелик С. Л., Кац Б. М. Электронно-лучевые трубки в системах обработки информации.— М.: Энергия, 1977.
5. Kaashoek I. A study of magnetic-deflection errors.— Philips Research Reports. Suppl., 1968, N 11, p. 1—114.
6. Грицкий З. Д., Сницарук Л. А. О дисторсии магнитного отклонения электронных пучков в приемных ЭЛТ.— Электрон. техника, сер. 4, 1974, вып. 8, с. 26—34.

Поступила в редакцию  
6 июля 1983 г.

УДК 772.99 : 681.327.5

В. А. ДОМБРОВСКИЙ, С. А. ДОМБРОВСКИЙ, Е. Ф. ПЕН

(Новосибирск)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ГОЛОГРАММ В ГЗУ \*

**Введение.** Одним из главных достоинств ГЗУ является высокая помехоустойчивость к дефектам носителя информации. Качественное объяснение этого свойства заключается в том, что при голографической регистрации каждый бит информации распределен по всей поверхности голограммы. Поэтому наличие микродефектов на поверхности голограммы не приводит к полной потере информации, а только снижает качество восстановленного изображения.

В работе [1] показано, что микродефекты и загрязненность носителя оказывают заметное влияние на достоверность считывания. В [2] для одномерной модели ГЗУ исследовано влияние локальных повреждений голограммы на контрастность изображений.

Однако для более полной оценки помехоустойчивости голограмм необходимо знать влияние микродефектов на статистические характеристики изображения [3]: среднюю мощность оптической «1»  $\bar{P}^{(1)}$ , средний контраст  $K_n = \bar{P}^{(1)}/\bar{P}^{(0)}$ , отношение сигнал/шум «1» и «0» —  $(S/\Pi)_{1,0} = \bar{P}^{(1,0)}/\sqrt{D[P^{(1,0)}]}$  ( $D[P^{(1,0)}]$  — дисперсия  $P^{(1,0)}$ ).

Цель данной работы — исследование зависимости статистических характеристик восстановленного изображения от размера, положения и количества амплитудных микродефектов на голограмме, а также оценка помехоустойчивости голограмм в экспериментальных образцах ГЗУ. За меру помехоустойчивости принято изменение достоверности считывания.

**Теория.** Анализ проводится для случая записи фурье-голограмм с двухуровневой случайной фазовой маской в приближении гауссовых сигнального, опорного и восстанавливающего пучков. Амплитуда восстановленной волны при отсутствии дефектов на голограмме для  $\nu$ ,  $\mu$ -й разрядной ячейки запишется в виде

$$f(\xi, \eta) = A_{\nu, \mu} \exp[-(\xi^2 + \eta^2)/W^2] \exp[ik(a/f)(\xi\nu + \eta\mu)] \exp(i\varphi_{\nu, \mu}),$$

где  $\xi, \eta$  — координаты в плоскости голограммы;  $1/W^2 = 1/\omega_b^2 + 1/\omega_o^2 + 1/\omega_c^2$ ;  $W$  — эффективный радиус голограммы;  $\omega_b, \omega_o, \omega_c$  — радиусы восстанавливающего, опорного и сигнального пучков на уровне  $1/e^2$  по интенсивности;  $a$  — расстояние между разрядными ячейками в транспаранте

\* Основные результаты данной статьи доложены на IV Всесоюзной конференции по голографии. Ереван, май 1982 г.