

5. Бурый Л. В., Иванов В. А. Математическое описание и моделирование алгоритмов управления прецизионным двухкоординатным приводом с линейным электродвигателем. — Автометрия, 1977, № 3.

Поступила в редакцию 12 февраля 1979 г.;
окончательный вариант — 24 марта 1980 г.

УДК 681.142.62

С. Т. ВАСЬКОВ, А. Н. КАСПЕРОВИЧ,
Н. В. ЛИТВИНОВ, И. М. САХАРОВ
(Новосибирск)

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В автоматизированных системах измерения и обработки изображений широко применяются логарифмические усилители (ЛУ), использование которых позволяет осуществить преобразование коэффициента пропускания элементов изображений в плотность и простыми методами снизить влияние некоторых погрешностей на точность измерения плотности.

К настоящему времени уже создан ряд систем измерения и ввода в ЭВМ изображений с применением логарифмических усилителей [1, 2]. Однако погрешности измерения систем с такими усилителями изучены недостаточно полно. В частности, представляет большой интерес исследование влияния шумов, возникающих в измерительном канале системы, чему и посвящена настоящая статья.

Функциональная схема канала измерения оптической плотности изображений приведена на рисунке. В такой системе (с идеальным логарифмическим усилителем) выходной сигнал ЛУ описывается выражением [3]

$$U_{\text{вых}} = kD = k \ln \tau = k_1 \ln [I_{\text{вх}}(x, y)k_2], \quad k_1 = kk_0, \quad (1)$$

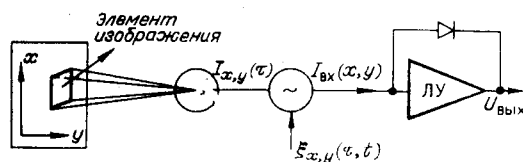
где k, k_1 — постоянные коэффициенты; k_0 — крутизна логарифмической амплитудной характеристики; k_2 — коэффициент, характеризующий логарифмический сдвиг, т. е. определяющий $I_{\text{вх}}$ при $U_{\text{вых}} = 0$; τ и D — коэффициент пропускания и оптическая плотность соответственно.

В общем случае входной сигнал логарифмического усилителя $I_{\text{вх}}(x, y)$ содержит в своем составе шумы

$$I_{\text{вх}}(x, y) = I_{x,y}(\tau) + \xi_{x,y}(\tau, t), \quad (2)$$

где $I_{x,y}(\tau)$ — выходной ток идеального фотоэлектрического узла при измерении коэффициента пропускания элемента изображения с координатами x, y ; $\xi_{x,y}(\tau, t)$ — шумовой ток, возникающий при измерении элемента изображения с координатами x, y и являющийся функциями координат, коэффициента пропускания τ и времени t . $\xi_{x,y}(\tau, t)$ представляет собой шум канала измерения (шумы фотоприемника, фотопленки/фотобумаги и электронных узлов), имеющий закон распределения амплитуд, близкий к нормальному с математическим ожиданием ΔI и дисперсией $\sigma_{\text{вх}}^2$. В дальнейшем (для краткости) обозначим $\xi_{x,y}(\tau, t) = \xi$.

Для оценки точности измерения оптической плотности необходимо определить



параметры (дисперсию, математическое ожидание и т. д.) сигнала $U_{\text{вых}}$ на выходе логарифмирующего усилителя (см. рисунок).

Так как в принципе логарифмирующий усилитель является нелинейным инерционным элементом, нахождение в общем виде требуемых статистических характеристик выходного сигнала вызывает трудности [4—6]. Однако для быстродействующих систем, постоянная времени которых, как правило, значительно меньше времени корреляции внешнего воздействия, инерционное преобразование правомерно рассматривать как безынерционное [5]. В этом случае с учетом (1) и (2) выходной сигнал усилителя можно представить в виде *

$$U_{\text{вых}} = k_1 \ln [k_2(I(\tau) + \xi)] = k_1 \{ \ln k_2 + \ln |1 + \xi/I(\tau)| + \ln I(\tau) \}. \quad (3)$$

Разложив логарифм в ряд (при $I(\tau) \geq 3\sigma_{\text{вх}}$), получим

$$U_{\text{вых}} = k_1 \{ \ln k_2 + \ln I(\tau) + \xi/I(\tau) - (1/2)(\xi^2/I(\tau)) + \dots + (-1)^{n+1} \xi^n/nI^n(\tau) \}. \quad (4)$$

В общем случае математическое ожидание шума канала измерения ΔI не равно нулю из-за наличия темнового тока ФЭУ, обратного тока фотодиодов, нестабильности параметров электронных схем и т. д. Представляется целесообразным отдельно исследовать влияние случайной составляющей шума ξ (при $\Delta I = 0$) и его систематической составляющей ΔI на точность измерения оптической плотности.

Рассмотрим влияние случайной составляющей шума ξ на точность измерения оптической плотности. Вычисляя с учетом (4) математическое ожидание и дисперсию выходного сигнала, получаем **

$$\bar{U}_{\text{вых}} \simeq k_1 \left[\ln k_2 + \ln I(\tau) - \frac{1}{2} \frac{\sigma_{\text{вх}}^2}{I^2(\tau)} \right]; \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{вых}}^2 \approx 1,2 k_1^2 \frac{\sigma_{\text{вх}}^2}{I^2(\tau)}. \quad (6)$$

Заметим, что для идеального канала измерения ($\xi = 0$) выходной сигнал логарифмического усилителя определяется выражением

$$U_{\text{вых}} = k_1 \{ \ln k_2 + \ln I(\tau) \}. \quad (7)$$

Сравнение (5) и (7) показывает, что наличие помех в канале измерения приводит к смещенности оценки оптической плотности, величина которой зависит от величины шума и сигнала на входе логарифмирующего усилителя.

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Сигнал фотоэлектрического узла систем измерения оптической плотности можно представить в виде

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{вх max}} \tau,$$

а дисперсию шума (при $I_{\text{вх}} \gg \sigma_{\text{м}}$) —

$$\sigma_{\text{вх}}^2 = \sigma_{\text{ф}}^2 + \sigma_{\text{м}}^2 + \sigma_{\text{э}}^2.$$

Здесь $\sigma_{\text{ф}}^2 = \sigma_{\text{ф max}}^2 \tau$ — дисперсия шума приемника света; $\sigma_{\text{м}}^2 = \sigma_{\tau_1}^2 \frac{\tau(1-\tau)}{\tau_1(1-\tau_1)}$ — дисперсия шума фотоматериала (шума гранулярности [7]); $\sigma_{\text{э}}^2$ — дисперсия шума электронных узлов канала измерения; $\sigma_{\tau_1}^2$ — дисперсия шума фотоматериала, измеренная при значении коэффициента пропускания,

* Выражение (3) справедливо в предположении $\xi < I(\tau)$. В случае когда ξ распределено по нормальному закону, это условие будет выполняться с большой вероятностью при $I(\tau) \geq 3\sigma_{\text{вх}}$.

** Для рассматриваемого случая ($I(\tau) > 3\sigma_{\text{вх}}$) погрешности вычисления $\sigma_{\text{вх}}^2$ и последнего члена выражения (5) не превышают 20% при $I_{\text{вх}} \approx 3\sigma_{\text{вх}}$.

равного τ_1 ; $I_{\text{вх max}}, \sigma_{\Phi \text{ max}}^2$ — соответственно сигнал и дисперсия шума приемника света при $\tau = 1$.

С учетом изложенного зависимости дисперсии и математического ожидания выходного сигнала логарифмирующего усилителя от коэффициента пропускания (отражения) τ определяются соотношениями

$$\sigma_{\text{вых}}^2(\tau) \approx 1,2 k_1^2 \frac{\sigma_{\Phi \text{ max}}^2 \tau + \alpha \tau (1 - \tau) + \sigma_0^2}{I_{\text{вх max}}^2 \tau^2}, \quad (8)$$

$$\bar{U}_{\text{вых}}(\tau) \approx k_1 \left[\ln(k_2 I_{\text{вх max}}) + \ln \tau - \frac{1}{2} \frac{\sigma_{\Phi \text{ max}}^2 \tau + \sigma_0^2 + \alpha \tau (1 - \tau)}{I_{\text{вх max}}^2 \tau^2} \right], \quad (9)$$

где $\alpha = \sigma_{\tau_1}^2 / \tau_1 (1 - \tau_1)$.

Определим зависимость погрешности измерения оптической плотности D от τ . При этом учтем, что для получения на выходе логарифмирующего усилителя сигнала, пропорционального оптической плотности $D = \lg(1/\tau)$, в прецизионных системах автоматически осуществляется операция калибровки. В процессе этой операции измеряется и запоминается выходной сигнал измерительного канала (сигнал калибровки) при $\tau = 1$. В качестве сигнала калибровки целесообразно использовать среднее значение выходного сигнала логарифмирующего усилителя при $\tau = 1$, так как при этом достигается минимальная погрешность измерения оптической плотности. Из этого сигнала в процессе измерения вычитается сигнал, пропорциональный оптической плотности в исследуемой точке изображения. Математическое ожидание разностного сигнала, пропорциональное среднему значению плотности \bar{D} , описывается выражением

$$\bar{D} \approx k_1 \left[-\ln \tau + \frac{1}{2 I_{\text{вх max}}^2} \left(\frac{\sigma_{\Phi \text{ max}}^2 \tau + \alpha \tau (1 - \tau) + \sigma_0^2}{\tau^2} - \sigma_{\Phi \text{ max}}^2 - \sigma_0^2 \right) \right], \quad (10)$$

а для дисперсии этого сигнала с учетом (4), (8) и (9) справедливо соотношение

$$\sigma^2(D) \approx 1,2 k_1^2 \frac{\sigma_{\Phi \text{ max}}^2 \tau + \alpha \tau (1 - \tau) + \sigma_0^2}{I_{\text{вх max}}^2 \tau^2}. \quad (11)$$

Погрешность оценки средней оптической плотности $\overline{\Delta D}$ (систематическая погрешность для данного D) определяется вторым членом выражения (10), а дисперсия случайной погрешности измерения оптической плотности элементов изображения $\sigma^2(D)$ — выражением (11).

Рассмотрим влияние на величину погрешности измерения оптической плотности различных составляющих шума канала измерения.

При

$$\sigma_{\Phi \text{ max}}^2 \neq 0, \text{ а } \sigma_{\text{м}}^2 = 0 \text{ и } \sigma_0^2 = 0$$

$$\overline{\Delta D}_1 \approx k_1 (1/2 q^2) (1/\tau - 1); \quad \sigma_1^2(D) \approx k_1^2 \frac{1,2}{q^2 \tau}$$

При

$$\sigma_{\text{м}}^2 \neq 0, \text{ а } \sigma_{\Phi \text{ max}}^2 = 0 \text{ и } \sigma_0^2 = 0$$

(12)

$$\overline{\Delta D} \approx (k_1 \alpha / 2 I_{\text{вх max}}) (1/\tau - 1); \quad \sigma_2^2(D) \approx k_1^2 \alpha \frac{1,2}{I_{\text{вх max}}^2} \left(\frac{1}{\tau} - 1 \right).$$

При

$$\sigma_0^2 \neq 0, \text{ а } \sigma_{\Phi \text{ max}}^2 = 0 \text{ и } \sigma_{\text{м}}^2 = 0$$

$$\overline{\Delta D} \approx k_1 (1/2 q^2) (1/\tau^2 - 1); \quad \sigma_3^2(D) \approx k_1^2 \frac{1,2}{q^2 \tau^2},$$

где $q^2 = I_{\text{вх max}}^2 / \sigma_{\text{вх}}^2$.

Из (11) и (12) видно, что при увеличении D (уменьшении τ) дисперсия $\sigma^2(D)$ и смещенность оценки $\overline{\Delta D}$ возрастают. Причем и дисперсия, и смещенность в двух первых случаях (при $\sigma_{\text{ф max}}^2 \neq 0$ и $\sigma_{\text{м}}^2 \neq 0$) увеличиваются обратно пропорционально τ (при $\tau \ll 1$), а в третьем случае ($\sigma_{\text{ф max}}^2 = 0$ и $\sigma_{\text{м}}^2 = 0$) — обратно пропорционально τ^2 . Так, при $q = 300$ в первом случае ($\sigma_{\text{ф max}}^2 \neq 0$) относительные величины систематической и случайной погрешностей измерения оптической плотности, равной 3,0 ед. плотности ($\tau = 0,001$), составляют 0,18 и 4% соответственно, а в случае $\sigma_{\text{ф max}}^2 = 0$ и $\sigma_{\text{м}}^2 = 0$ эти же погрешности измерения оптической плотности, равной только 2,0 ед. плотности ($\tau = 0,01$), составляют 2,8 и 18%. Следовательно, при разработке систем обработки оптической информации необходимо стремиться к тому, чтобы отношение сигнал/шум в канале измерения в основном определялось шумами приемника света. Этому требованию наиболее полно удовлетворяют системы измерения и обработки оптической информации, имеющие в качестве приемника света фотоэлектронные умножители (ФЭУ), которые, как правило, не нуждаются в дополнительных усилителях [1, 2]. Использование же в качестве приемника света фотодиодов предполагает (при прочих равных условиях) наличие дополнительных усилителей, которые вносят существенный вклад в шум канала измерения, что значительно снижает точностные характеристики систем.

Перейдем к рассмотрению влияния систематической составляющей входного шума ΔI на точность измерения оптической плотности. Наличие составляющей ΔI (при $\xi = 0$) приводит к тому, что в реальных системах на вход логарифмирующего усилителя подается сигнал

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{вх max}} \tau + \Delta I. \quad (13)$$

В этом случае выходной сигнал логарифмирующего усилителя описывается соотношением

$$U_{\text{вых}}(\tau) = k_1 [\ln(k_2 I_{\text{вх max}}) + \ln \tau + \ln(1 + \Delta I / I_{\text{вх max}} \tau)]. \quad (14)$$

С учетом описанных выше операций калибровки и вычитания

$$\overline{D} = k_1 [-\ln \tau + \ln(1 + \Delta I / I_{\text{вх max}}) - \ln(1 + \Delta I / I_{\text{вх max}} \tau)]. \quad (15)$$

Из приведенного соотношения видно, что составляющая шума ΔI вызывает погрешность измерения оптической плотности

$$\overline{\Delta D}_d = k_1 [\ln(1 - \Delta I / I_{\text{вх max}}) - \ln(1 + \Delta I / I_{\text{вх max}} \tau)]. \quad (16)$$

Например, измерение оптической плотности, равной 3 ед. плотности, при $\Delta I / I_{\text{вх max}} = 10^{-4}$ приводит к относительной погрешности $\approx 3,2\%$. Для значений $\tau = 1$ (оптическая плотность D близка к нулю) погрешность измерения также близка к нулю.

Принципиально погрешность измерения $\overline{\Delta D}$ может быть уменьшена путем введения дополнительной (до логарифмического усилителя) автоматической калибровки канала измерения $I_{\text{вх max}} = 0$ и $\tau = 0$ и последующего вычитания сигнала калибровки из сигнала, определяемого соотношением (13). Эффективность такой калибровки нами не оценивалась. Вместе с тем ясно, что если осуществление такой калибровки будет приводить к увеличению дисперсии σ_s^2 , то результирующая эффективность калибровки будет невысока, так как при этом увеличивается составляющая погрешности $\overline{\Delta D}_s$ и дисперсия $\sigma^2(D)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильков С. Т. и др. Прецизионная система ввода/вывода изображений для ЭВМ. — Автометрия, 1977, № 2.

2. Новая быстродействующая система для дискретизации и записи фотоизображения «Фотомейшн». — Проспект фирмы «Оптроникс» (США).
3. Хьюз Р. С. Логарифмические видеоусилители. М.: Энергия, 1976.
4. Деч Р. Нелинейные преобразования случайных процессов. М.: Сов. радио, 1965.
5. Заездный А. М. Основы расчетов по статической радиотехнике. М.: Связь, 1969.
6. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1966.
7. Хуанг Т. Обработка изображений и цифровая фильтрация. М.: Мир, 1979.

Поступила в редакцию 7 января 1980 г.

УДК 621.385.832.24

З. Д. ГРИЦКИВ

(Львов)

РАЗНОВИДНОСТИ И КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ ОТКЛОНЯЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ПРИБОРОВ

Во многих устройствах с электронно-лучевыми приборами по-прежнему находят широкое применение магнитные, точнее, электромагнитные, отклоняющие системы (МОС). Областью наиболее массового применения МОС остается телевидение, в том числе цветное. Интенсивное развитие вычислительной техники выявило возможности эффективного применения электронно-лучевых приборов с МОС в устройствах ввода-вывода информации в ЭВМ различного назначения (вычислительные, управляющие, документирующие, измерительные, полиграфические и другие системы). МОС используются также в технологических устройствах для обработки материалов электронным лучом, они являются неотъемлемым элементом растровых электронных микроскопов. Все это обуславливает постоянный интерес к МОС, о чем свидетельствует обилие публикуемых работ, в том числе изобретений.

Необходимо отметить, что МОС является весьма сложным узлом, характеризуемым одновременно электрическими, электронно-оптическими и конструктивными свойствами, которые, в свою очередь, определяются рядом параметров. При этом каждый данный тип электронно-лучевого прибора в каждом конкретном применении требует, как правило, специально разработанной МОС. Сложность задачи еще и в том, что до настоящего времени отсутствуют завершенные методики разработки, расчета и конструирования МОС.

Цель настоящей работы — дать общее представление о разновидностях и возможной классификации МОС на современном уровне их развития в надежде, что это позволит несколько уменьшить неопределенность в подходе к решению конкретных задач проектирования и создания МОС. В качестве литературных источников, в которых приведена обширная библиография по МОС, укажем [1—3].

С учетом разнообразия свойств МОС может быть выделен ряд классификационных признаков, который указан на левом поле рисунка. Наиболее распространенным признаком классификации является конструкция МОС. В настоящее время различают седлообразные, кольцевые (тороидальные), статорные, комбинированные и кососоленоидальные системы. Наиболее распространены два первых типа систем, наименее — статорные. К группе статорных МОС следует отнести также МОС с явно выраженными полюсами, которые используются в электронной