



УДК 621.317

Е.Н. Безвесильная, д-р техн. наук,
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический ин-т»
(Украина, 03056, Киев, пр-т Победы, 37, корп. 1,
тел. (044) 2793375, e-mail: bezvesilna@mail.ru),

Ю.А. Подчашинский, канд. техн. наук
Житомирский государственный технологический университет
(Украина, 10005, Житомир, ул. Черняховского, 103,
тел. (0412) 378482, e-mail: ju-p@ztu.edu.ua)

Оптимизация параметров и повышение точности системы для измерения двумерных механических величин

Рассмотрены математические модели и метод оптимизации параметров двумерной информации о механических величинах, используемой в системе, предназначенной для измерения двумерных механических величин. К основным параметрам двумерной информации относятся размер двумерного изображения объекта измерений, погрешности измерений координат, время ввода изображения в цифровую ЭВМ. Найдено аналитическое решение задачи оптимизации параметров двумерной информации. Экспериментально доказано, что точность измерений координат точек повышается в 1,3 раза.

Розглянуто математичні моделі та метод оптимізації параметрів двомірної інформації про механічні величини, які використовуються у системі, призначеній для вимірювання двомірних механічних величин. Основними параметрами двомірної інформації є розмір двомірного зображення об'єкта вимірювання, похибки вимірювань координат, час введення зображення у цифрову ЕОМ. Знайдено аналітичний розв'язок задачі оптимізації параметрів двомірної інформації. Експериментально показано, що точність вимірювань координат точок підвищується у 1,3 раз.

Ключевые слова: механические величины, оптимизация параметров, измерительная система, двумерная информация, изображение объекта измерений.

Исследуемая система для измерения двумерных механических величин построена на основе процедур формирования и алгоритмической обработки двумерных сигналов, которые являются двумерными изображениями объекта измерений и содержат измерительную информацию о нем. Для получения измерительной информации необходимо сформировать последовательность цифровых изображений, представляющих собой двумер-

© Е.Н. Безвесильная, Ю.А. Подчашинский, 2013

ный образ объекта измерений, и ввести ее в цифровую ЭВМ. С помощью алгоритмической обработки полученных изображений можно измерить геометрические параметры и параметры движения исследуемого объекта.

При разработке данной системы необходимо определить параметры двумерной информации, используемой в измерительном канале: размер двумерного изображения объекта измерений, погрешности измерений координат, время ввода изображения в цифровую ЭВМ. Определение оптимальных значений этих параметров позволяет повысить точность и быстродействие системы. Поэтому актуальной задачей является разработка математической модели и методик оптимизации параметров двумерной информации о геометрических параметрах и параметрах движения объектов измерений.

Математические модели и методы оптимизации измерительных каналов для средств измерения механических величин рассмотрены во многих научных работах [1—3]. Однако эти методы ориентированы на одномерные измерительные сигналы. В технических устройствах, построенных на основе двумерных сигналов, наибольшее влияние на формирование и погрешности двумерной информации имеют оптическая система, полупроводниковые преобразователи свет—сигнал, аналоговые цепи обработки сигналов [4—6]. Разработаны также методы оптимизации в различных областях науки и техники [7—9].

Необходимо учитывать, что измерительный канал исследуемой системы должен обеспечить высокоточную передачу двумерной измерительной информации о механических величинах. Это, прежде всего, связано с наиболее точным воспроизведением контуров объектов измерений и их геометрических характеристик, что существенно зависит от параметров двумерной информации.

Предлагаемый подход обеспечивает более высокую точность и быстродействие измерений по сравнению с существующими средствами измерений. Это особенно важно для измерений механических величин в реальном масштабе времени, например в процессе контроля различных технологических процессов.

Параметры двумерной информации о механических величинах.

Цифровые массивы двумерной информации о механических величинах имеют очень большой объем. Эта особенность двумерной информации существенно влияет на характеристики системы для измерения механических величин, в том числе на ее быстродействие, точность, функциональные возможности.

Однако это влияние неоднозначно. Для повышения точности необходимо уменьшать шаг дискретности двумерных цифровых массивов по пространственным координатам. Это требование реализуется увеличе-

нием числа дискретных точек при фиксированном поле зрения устройства формирования двумерной информации для объекта измерений с заданными линейными размерами, в результате чего объем цифровых массивов двумерной информации увеличивается. Но для повышения быстродействия объем двумерных массивов необходимо уменьшить для введения их в цифровую ЭВМ, регистрирования и обработки с минимальными затратами времени. Это требование может быть реализовано уменьшением числа дискретных точек или сжатием цифровых массивов двумерной информации, что, в свою очередь, приводит к увеличению погрешностей двумерной информации. Следовательно, необходимо определить оптимальные параметры двумерной информации, обеспечивающие существенное повышение метрологических характеристик системы для измерения механических величин.

Рассмотрим основные параметры цифровых массивов двумерной информации:

1. Размер цифрового массива по горизонтали и вертикали N и M (число дискретных точек (д.т)).

2. Шаг дискретности по горизонтали и вертикали δ_x и δ_y (м) (обычно $\delta_x = \delta_y$).

3. Число двоичных разрядов, используемых для кодирования амплитуды двумерной информации $N_{д.к}$.

4. Число каналов N_k , используемых для представления и передачи двумерной информации.

5. Коэффициент корреляции отсчетов в цифровом массиве двумерной информации $\rho_{д.и}$ и коэффициенты корреляции по горизонтали и вертикали ρ_x и ρ_y .

6. Коэффициент формы двумерной информации $k_\phi = N / M$.

7. Начальный объем двумерной информации в устройстве формирования

$$V_0 = k_{п1} N M N_{д.к} N_k = k_{п1} N^2 N_{д.к} N_k / k_\phi \text{ (бит)}, \quad (1)$$

где $k_{п1} = 1 \text{ бит}/(\text{д.т})^2$ — коэффициент пропорциональности, позволяющий при двоичном кодировании определить информационную емкость площадки $(1 \text{ д.т}) \times (1 \text{ д.т})$ в массиве двумерной информации при известных значениях $N_{д.к}$ и N_k .

8. Объем сжатого цифрового массива двумерной информации, вводимой в цифровую ЭВМ от устройства формирования этой информации,

$$V_{сж} = \frac{V_0}{k_{сж}} = \frac{k_{п1} N^2 N_{д.к} N_k}{k_{сж} k_\phi} \text{ (бит)}, \quad (2)$$

где $k_{сж}$ — коэффициент сжатия этого цифрового массива по одному из методов, который реализован в устройстве формирования двумерной информации,

$$k_{сж} = V_0 / V_{сж}. \quad (3)$$

Типичные значения параметров двумерной информации для существующих устройств формирования (на примере двумерного изображения объекта измерений).

Размер цифрового массива по горизонтали

$$N_{\min} \leq N \leq N_{\max}, \quad (4)$$

где $N_{\min} = 256$, $N_{\max} = 4000$.

Шаги дискретности δ_x и δ_y (от 0,001 до нескольких миллиметров). В общем случае шаг дискретности зависит от решаемой прикладной задачи и размеров объектов измерений.

Число двоичных разрядов для кодирования амплитуды видеоизображений $N_{д.к} = 8$ или $N_{д.к} = 16$.

Число каналов для полутонового $N_k = 1$ или для цветного $N_k = 3$ изображений.

Коэффициенты $\rho_{д.и}$, ρ_x и ρ_y : $\rho_{д.и} \geq 0,70$, $\rho_x = \rho_y \leq 0,95$.

Коэффициент формы для $k_\phi = 1$, специализированных видеокамер и для обычных видеокамер $k_\phi = 4/3$ или $k_\phi = 16/9$.

Начальный объем двумерной информации V_0 составляет приблизительно несколько сотен мегабит.

Коэффициент сжатия

$$k_{сж \min} \leq k_{сж} \leq k_{сж \max}, \quad (5)$$

где $k_{сж \min} = 1$, $k_{сж \max} = 50$; при $k_{сж} = 1$ сжатие отсутствует. Значение $k_{сж \max} = 50$ является предельно возможным для методов на основе дискретного косинусного и вейвлет-преобразования, при котором сохраняется основная часть измерительной информации.

В случае формирования временной последовательности двумерной информации существенное значение имеет шаг дискретности δ_d , определяющий интервал времени между моментами последовательного формирования двух соседних двумерных массивов. Для стандартных устройств формирования двумерной информации $\delta_d = 0,04$ с (формируется 25 изображений за одну секунду), в специализированных устройствах шаг дискретности может быть уменьшен до единиц миллисекунд или сотен микросекунд.

Параметры измерительного канала системы для измерения двумерных механических величин. При оптимизации параметров двумерной информации необходимо учитывать следующие параметры измери-

тельного канала исследуемой системы, которые влияют на ее метрологические характеристики.

1. Ширина поля зрения оптической системы в устройстве формирования двумерной информации

$$l_{д.и} = \frac{N \delta_x}{k_{\Pi}} \text{ (м)}, \quad (6)$$

где $k_{\Pi} = 1$ — коэффициент пропорциональности (д.т).

Ширина поля зрения составляет от нескольких миллиметров до нескольких метров. В общем случае она зависит от прикладной задачи, которая решается измерительной системой, и размеров объектов измерений. Обычно измерения организованы так, что линейный размер объекта измерений составляет $l_{о.и} = k_3 l_{д.и} = (0,8 \dots 0,9) l_{д.и}$, где k_3 — коэффициент заполнения плоскости цифрового массива двумерной информации объектом измерений.

2. Пропускная способность интерфейса ввода двумерной информации в цифровую ЭВМ $C_{инт}$ (бит/с). Например, $C_{инт} = 480$ Мбит/с для интерфейса USB 2.0, $C_{инт} = 400$ Мбит/с для интерфейса IEEE 1394. Поэтому минимально допустимый шаг дискретности временной последовательности двумерной информации (при фиксированном объеме $V_{сж}$) $\delta_{д \min} = V_{сж} / C_{инт}$, а максимально допустимый объем одного цифрового массива двумерной информации (при фиксированном шаге $\delta_{д}$)

$$V_{сж \max} = C_{инт} \delta_{д}. \quad (7)$$

3. Дисперсия погрешности измерения координат точек для объекта измерений

$$\sigma_{\Delta x}^2 = \sigma_{д}^2 + \sigma_{сж}^2, \quad (8)$$

где $\sigma_{д}^2 = \delta_x^2 / 12$ — составляющая погрешности, которая обусловлена дискретным характером цифровых массивов двумерной информации и имеет равномерное распределение на интервале $(-\delta_x / 2, \delta_x / 2)$; $\sigma_{сж}^2$ — составляющая погрешности, обусловленная влиянием процедур сжатия двумерной информации в устройстве формирования.

Следует заметить, что другие составные части погрешности (случайные и динамические искривления амплитуды, геометрические искривления формы двумерной информации) уменьшены при алгоритмической обработке до незначительного уровня относительно $\sigma_{д}^2$.

Математическая модель погрешностей измерений координат и их связь с параметрами двумерной информации. Рассмотрим составляющую погрешности измерения координат $\sigma_{сж}^2$, которая зависит от параметров алгоритмов сжатия двумерной информации, прежде всего от коэффи-

циента $k_{сж}$. Для определения этой зависимости преобразуем погрешность измерений координат в соответствующую погрешность амплитуды двумерной информации [10]:

$$\sigma_{сж.а}^2 = \frac{\sigma_{сж}^2 h_{п}^2}{l_{п}^2}, \quad (9)$$

где $h_{п}$ (дискретных уровней (д.у)) и $l_{п}$ (д.т) — соответственно высота и длина перепада амплитуды двумерной информации, образованного контуром объекта измерений на изображениях, сформированных с помощью видеокамеры.

Длина перепада согласно (5) составляет

$$l_{п} = \frac{N_{п} \delta_x}{k_{п}} = \frac{N_{п} l_{д.и}}{N} = \frac{N_{п} l_{о.и}}{k_3 N} \text{ (мм)},$$

где $N_{п}$ — длина этого перепада в дискретных точках, определяемая для изображений экспериментально.

Зависимость между $\sigma_{сж.а}^2$ и $k_{сж}$ определяем на основе данных, приведенных в работах [4, 11]. Для этого вводим понятие скорости создания информации ее источником:

$$R_{д.и}(D_{сж \max}) = \lim_{N_{эл} \rightarrow \infty} \left[\inf \left(\frac{1}{N_{эл}} I_{д.и}(f_{и}, f_{сж}) \right) \right],$$

где $D_{сж \max}$ — максимально допустимое значение меры искривлений двумерной информации в результате сжатия; $N_{д.о}$ — число дискретных отсчетов амплитуды в цифровом массиве двумерной информации; $\inf []$ — нижняя граница выражения в скобках для множества всех возможных реализаций двумерной информации; $I_{д.и}(f_{и}, f_{сж})$ — количество взаимной информации для исходного массива двумерной информации $f_{и}$ и массива $f_{сж}$, восстановленного после сжатия. В случае отсутствия искажений при сжатии количество взаимной информации равняется энтропии одного цифрового массива двумерной информации.

Для гауссового источника информации с нулевым средним значением и среднеквадратичной мерой искривлений

$$R_{д.и}(D_{сж \max}) = \begin{cases} \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{\sigma_{д.и}^2}{D_{сж \max}} \right) & \text{при } \sigma_{д.и}^2 > D_{сж \max}, \\ 0 & \text{при } \sigma_{д.и}^2 \leq D_{сж \max}, \end{cases} \quad (10)$$

где $\sigma_{д.и}^2$ — дисперсия массива двумерной информации. Если цифровой массив двумерной информации считать двумерным марковским источ-

ником с коэффициентами корреляции ρ_x и ρ_y вдоль строк и столбцов при незначительной степени искривлений, то можно записать

$$R_{д.и}(\sigma_{сж.а}^2) = \frac{k_{п1}}{2} \log_2 \left(\frac{\sigma_{д.и}^2 (1-\rho_x^2)(1-\rho_y^2)}{\sigma_{сж.а}^2} \right), \quad (11)$$

где коэффициент пропорциональности $k_{п1} = 1$ бит/(д.т)² определяет размерность скорости создания информации для случая двоичного кодирования двумерного массива.

Формула (10) позволяет найти предельные возможности сжатия для любого источника информации с заданными вторыми моментами и распространяется на случай кодирования изображений с преобразованием [4]. Методы сжатия, используемые в устройствах формирования двумерной информации, соответствуют этому случаю.

Используя формулы (1) — (3), (11), определяем коэффициент сжатия двумерной информации для идеального случая. Он равняется отношению количества бит, соответствующих одной дискретной точке в начальном массиве двумерной информации, к количеству бит, соответствующих одной дискретной точке в сжатом массиве двумерной информации:

$$k_{сж.0}(\sigma_{сж.а}^2) = \frac{k_{п1} N_{д.к} N_{к}}{R_{д.и}(\sigma_{сж.а}^2)} = \frac{2N_{д.к} N_{к}}{\log_2 \left(\frac{\sigma_{д.и}^2 (1-\rho_x^2)(1-\rho_y^2)}{\sigma_{сж.а}^2} \right)}, \quad (12)$$

где $N_{к}$ — число каналов, используемых для передачи данных о яркости и цвете поверхности изделий.

Будем считать, что $\rho_x = \rho_y$. Это предположение соответствует свойствам двумерных изображений, которые используются в исследуемой системе. Следует учитывать тот факт, что в реальных методах сжатия двумерной информации коэффициент сжатия для конкретного значения погрешности несколько меньше, чем коэффициент, определенный для идеального случая по формулам (11) и (12). Поэтому введем коррекцию, добавив величину $\lambda_{сж}$ (бит/(д.т)²) к величине скорости создания двумерной информации источником. В результате получим реальную величину этой скорости:

$$R_{д.и1}(\sigma_{сж.а}^2) = R_{д.и}(\sigma_{сж.а}^2) + \lambda_{сж}, \quad (13)$$

где $\lambda_{сж} \approx 0,7 \dots 1,5$ (бит/(д.т)²). Этот показатель определяется экспериментально на основе сравнения эффективности существующих методов сжатия с теоретически возможной эффективностью сжатия двумерной информации.

На основании формул (11) и (13) получаем значение реально возможного коэффициента сжатия двумерной информации в исследуемой системе:

$$k_{сж}(\sigma_{сж.а}^2) = \frac{2N_{д.к}N_{к}}{\log_2\left(\frac{\sigma_{д.и}^2(1-\rho_x^2)^2}{\sigma_{сж.а}^2}\right) + \frac{2\lambda_{сж}}{k_{п1}}}, \quad (14)$$

откуда находим

$$\sigma_{сж.а}^2(k_{сж}) = \sigma_{д.и}^2 \left(\frac{1-\rho_x^2}{2\left(\frac{N_{д.к}N_{к}}{k_{сж}} - \frac{\lambda_{сж}}{k_{п1}}\right)} \right)^2. \quad (15)$$

Из формул (9) и (15) следует:

$$\sigma_{сж}^2(k_{сж}) = \sigma_{сж.а}^2 \left(\frac{l_{п}}{h_{п}} \right)^2 = \sigma_{д.и}^2 \left(\frac{1-\rho_x^2}{2\left(\frac{N_{д.к}N_{к}}{k_{сж}} - \frac{\lambda_{сж}}{k_{п1}}\right)} \right)^2 \left(\frac{l_{п}}{h_{п}} \right)^2. \quad (16)$$

Тогда выражение для общей погрешности измерений координат точек с учетом формул (8) и (16) имеет вид

$$\sigma_{\Delta x}^2 = \frac{\delta_x^2}{12} + \sigma_{д.и}^2 \left(\frac{1-\rho_x^2}{2\left(\frac{N_{д.к}N_{к}}{k_{сж}} - \frac{\lambda_{сж}}{k_{п1}}\right)} \right)^2 \left(\frac{l_{п}}{h_{п}} \right)^2. \quad (17)$$

Для фиксированной ширины поля зрения в устройстве формирования двумерной информации $l_{д.и} = \text{const}$. Согласно (6) запишем

$$\delta_x = \frac{k_{п}l_{д.и}}{N} = \frac{k_{п}l_{о.и}}{k_3N}. \quad (18)$$

Из формул (17) и (18) получаем результирующее соотношение:

$$\sigma_{\Delta x}^2(N, k_{сж}) = \frac{k_{п}^2 l_{о.и}^2}{12k_3^2 N^2} + \sigma_{д.и}^2 \left(\frac{1-\rho_x^2}{2\left(\frac{N_{д.к}N_{к}}{k_{сж}} - \frac{\lambda_{сж}}{k_{п1}}\right)} \right)^2 \left(\frac{l_{п}}{h_{п}} \right)^2. \quad (19)$$

Решение задачи оптимизации параметров двумерной информации о механических величинах. Сформулируем задачу оптимизации параметров двумерной информации. При заданных показателях быстро-

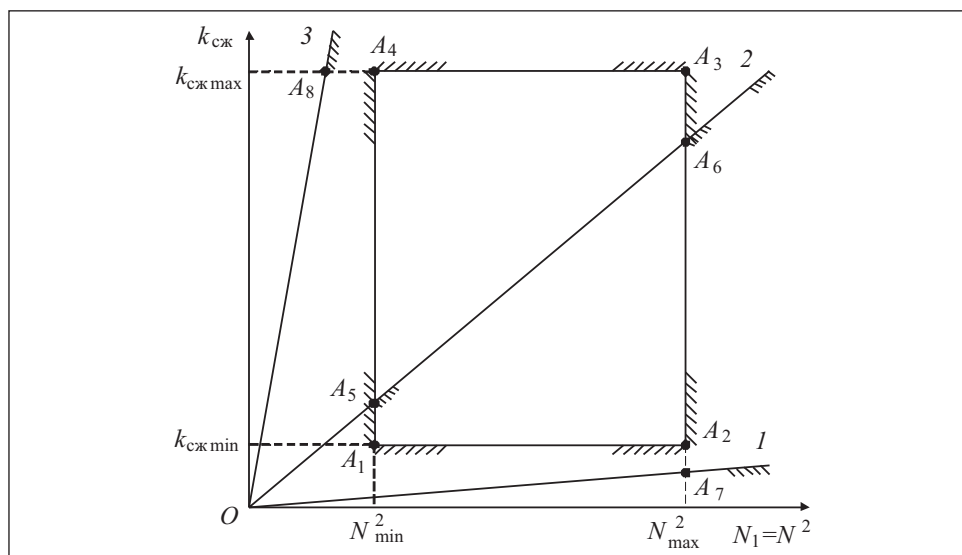


Рис. 1. Геометрическая интерпретация задачи оптимизации параметров двумерной информации

действия приборной системы необходимо минимизировать погрешность определения координат точек для объекта измерений

$$\sigma_{\Delta x}^2(N, k_{сж}) \rightarrow \min \quad (20)$$

посредством выбора оптимальных значений параметров двумерной информации N и $k_{сж}$. Целевая функция определяется соотношениями (19) и (20), а область допустимых значений параметров — соотношениями (4) и (5). Анализируя соотношение (19), можно сделать вывод о том, что для уменьшения погрешности $\sigma_{\Delta x}^2$ необходимо увеличивать значение N и уменьшать значение $k_{сж}$, учитывая область их допустимых значений. Поэтому целевая функция достигает минимума в точке A_2 (рис. 1).

Следует также учитывать ограниченную пропускную способность интерфейса ввода двумерной информации в цифровую ЭВМ. Согласно формулам (1), (3) и (7) запишем

$$k_{сж} \geq \frac{V_0}{V_{сж \max}} = \frac{k_{п1} N^2 N_{д.к} N_k}{k_{ф} C_{инт} \delta_d} \quad (21)$$

На рис. 1 формуле (21) соответствуют прямые OA_7 (случай 1), OA_6 (случай 2) или OA_8 (случай 3). Область допустимых значений параметров лежит выше каждой из этих прямых. Поэтому в случае 1 оптимальное

значение параметров достигается в точке A_2 . При этом $k_{сж} > k_{сж\ min}$, $V_{сж} < V_{сж\ max}$. Для достижения соотношения $V_{сж} = V_{сж\ max}$ можно несколько уменьшить значение δ_d .

В случае 2 решение задачи оптимизации лежит на отрезке A_5A_6 . В случае 3 задача оптимизации не имеет решения. Это объясняется тем, что интерфейс ввода двумерной информации не может обеспечить ее передачу в цифровую ЭВМ с заданной скоростью и точностью. В этом случае следует использовать интерфейс с большей пропускной способностью.

Согласно формуле (21) отрезку A_5A_6 соответствует ограничение

$$k_{сж}(N^2) = \frac{k_{п1} N^2 N_{д.к} N_k}{k_{ф} V_{сж\ max}}, \quad (22)$$

где $V_{сж\ min} = C_{инт} \delta_d$. Указанный максимальный объем может иметь другое значение, не превышающее $C_{инт} \delta_d$, которое задает оператор, исходя из нужного быстродействия исследуемой системы.

Определим область допустимых значений N . Поскольку при $k_{сж} = 1$ $N = N_{min}$, из (8) вытекает

$$\sigma_{\Delta x}^2(N_{min}) = \sigma_{\Delta_{max}}^2(N_{min}), \sigma_{\Delta_{max}}^2(N_{min}) = \frac{\Delta_{x\ max}}{\sqrt{3}}, \Delta_{x\ max} = \frac{\delta_x}{2},$$

где $\Delta_{x\ max}$ — заданная максимальная допустимая погрешность определения координат точек для объекта измерений. Тогда согласно (6)

$$N_{min} = \frac{l_{о.и} k_{п}}{2k_3 \Delta_{x\ max}}. \quad (23)$$

Поскольку при $k_{сж} = k_{сж\ max}$ $N = N_{max}$, используя соотношения (1), (2), (7), находим

$$V_{сж}(N_{max}) = \frac{V_0(N_{max})}{k_{сж\ max}} = C_{инт} \delta_d, V_0(N_{max}) = k_{п1} N_{max}^2 N_{д.к} N_k / k_{ф},$$

где

$$N_{max} = \sqrt{\frac{C_{инт} \delta_d k_{ф} k_{сж\ max}}{k_{п1} N_{д.к} N_k}}. \quad (24)$$

Таким образом, получена классическая задача оптимизации с целевой функцией (19), (20), двумя оптимизируемыми параметрами, N и $k_{сж}$, одним ограничением (22) и областью допустимых значений параметров (4), (5), (23), (24).

Для решения указанной задачи подставим значение $k_{сж}$ из (22) в (19):

$$\sigma_{\Delta x}^2(N^2) = \frac{k_{\Pi}^2 l_{\text{о.и}}^2}{12k_3^2 N^2} + \sigma_{\text{д.и}}^2 \left(\frac{1-\rho_x^2}{2 \left(\frac{k_{\Phi} V_{сж \max}}{k_{\Pi 1} N^2} - \frac{\lambda_{сж}}{k_{\Pi 1}} \right)} \right)^2 \left(\frac{l_{\Pi}}{h_{\Pi}} \right)^2 \rightarrow \min. \quad (25)$$

Затем найдем стационарные точки целевой функции (25) для переменной $N_1 = N^2$:

$$\frac{d\sigma_{\Delta x}^2}{dN_1} = -\frac{k_{\Pi}^2 l_{\text{о.и}}^2}{12k_3^2 N_1^2} + \frac{2\sigma_{\text{д.и}}^2 (1-\rho_x^2)^2 k_{\Phi} V_{сж \max} \ln(2)}{2 \left(\frac{2k_{\Phi} V_{сж \max}}{k_{\Pi 1} N_1^2} - \frac{2\lambda_{сж}}{k_{\Pi 1}} \right) N_1^2 k_{\Pi 1}} \left(\frac{l_{\Pi}}{h_{\Pi}} \right)^2 = 0, \quad (26)$$

$$N_{1 \text{ опт}} = \frac{k_{\Phi} V_{сж \max} \ln(2)}{\lambda_{сж} \ln(2) + \ln \left(\frac{2\sqrt{6} \ln(2) k_{\Pi 1} k_{\Phi} V_{сж \max} (\rho_x^2 - 1) k_3^2 l_{\Pi} \sigma_{\text{д.и}}}{h_{\Pi} l_{\text{о.и}}} \right) k_{\Pi 1}}. \quad (27)$$

Поскольку в точке $N_{\text{опт}} = \sqrt{N_{1 \text{ опт}}}$ знак минус производной (26) меняется на знак плюс, это и есть точка минимума целевой функции (25), которая соответствует оптимальному размеру изображения в дискретных точках по горизонтали. Оптимальный коэффициент сжатия может быть найден с учетом $N_{\text{опт}}$ по формуле (22), а погрешность измерений координат — по формуле (25). Таким образом, задача оптимизации решена.

Пример оптимизации параметров двумерной информации. Положим, необходим контроль линейных размеров облицовочных изделий из природного камня с помощью измерительной системы на основе двумерных изображений. Максимальный размер таких изделий $x_{\max} = 2000$ мм, максимальное отклонение линейных размеров $\Delta_{l_{\max}} = 3$ мм [12]. Для контроля используется цифровая камера Sony Cyber-Shot DSC-H9 с ПЗС-матрицей размером 7,18 мм и емкостью 8 Мпикселов с объективом Carl Zeiss Vario-Tessen (15^x оптическое увеличение, фокусное расстояние $f = 5,2 \dots 78$ мм или $31 \dots 465$ мм в перерасчете на пленку 35 мм).

Параметры сформированных цветных изображений: $k_3 = 0,9$; $N_{\Pi} = 5$ д.т при $N = 3200$ д.т; $l_{\Pi} = 3,13$ мм; $h_{\Pi} = 150$ д.у; $\sigma_{\text{д.и}} = 50$ д.у; $k_{\Phi} = 4/3$; $\rho_x = \rho_y = 0,9$; $N_{\text{д.к}} = 8$; $N_{\text{к}} = 3$. Эти изображения сжимаются в цифровой камере, для которой $\lambda_{сж} = 1,5$ бит/(д.т)², $k_{сж \max} = 50$ раз, и вводятся в цифровую ЭВМ по интерфейсу USB 2.0 с пропускной способностью $C_{\text{инт}} = 480$ Мбит/с. На ввод одного изображения отводится $\delta_{\text{д}} = 0,04$ с, т.е. $V_{сж \max} = 19,2$ Мбит = = 2,40 Мбайт (согласно (7)).

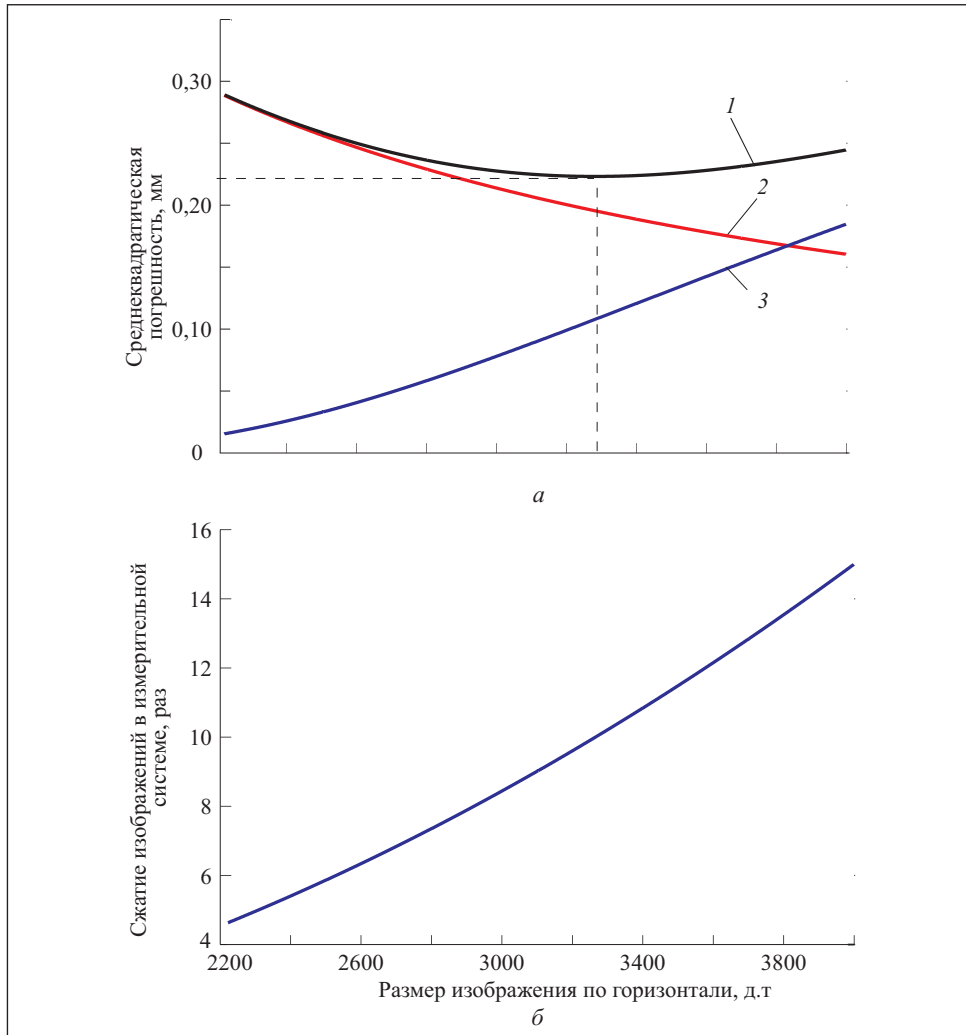


Рис. 2. Графики целевой функции измерительной системы (а) и сжатия изображений (б): 1 — общая погрешность определения координат точек; 2 и 3 — погрешности, обусловленные дискретностью цифрового изображения и его сжатием

Поскольку для контроля линейных размеров координаты точек необходимо определять с большей точностью, чем указанные отклонения, принимаем $\Delta_{x \max} = 0,50$ мм, $\sigma_{\Delta_{x \max}} = 0,29$ мм, $N_{\min} = 2222$ д.т, $N_{\max} = 7303$ д.т (согласно (23) и (24)). С учетом технических характеристик устройств формирования двумерной информации (4) и (5) находим $N_{\min} = 2222$ д.т, $N_{\max} = 4000$ д.т.

Решая задачу оптимизации, получаем оптимальные значения параметров двумерной информации по формулам (27) и (22): $N_{\text{опт}} = 3281$ д.т, $k_{\text{сж опт}} = 10,1$ раз. При этом согласно (25) минимальная среднеквадратичная погрешность определения координат $\sigma_{\Delta_{x\text{min}}} = 0,22$ мм, объем одного несжатого изображения согласно (1) $V_0 = 193,8$ Мбит = 24,2 Мбайт, объем одного сжатого изображения согласно (2) и (7) $V_{\text{сж}} = 19,2$ Мбит = 2,40 Мбайт, а быстродействие измерительной системы составляет 0,04 с на ввод в ЭВМ одного изображения. Таким образом, при заданном быстродействии приборной системы ($\delta_{\text{д}} = 0,04$ с) точность измерений координат точки выше в $\sigma_{\Delta_{x\text{max}}} / \sigma_{\Delta_{x\text{min}}} = 1,3$ раза.

На рис. 2, а и б, приведены результаты вычисления по формуле (25) целевой функции измерительной системы и кривая коэффициента сжатия, рассчитанная по формуле (22). Быстродействие измерительной системы (время формирования и ввода в цифровую ЭВМ одного двумерного массива) составляет 0,04 с.

Выводы

1. В приборной системе можно обеспечить существенное повышение точности и быстродействия измерения геометрических параметров на основе оптимизации ее параметров. Оптимизация выполнена для параметров видеоизображений измерительной информации, геометрических параметров измерительного канала приборной системы и параметров процедур алгоритмической обработки изображений.

2. В результате оптимизации параметров видеоизображений с измерительной информацией точность приборной системы повышается в 1,3 раз, быстродействие приборной системы — в 7 раз. Ошибка измерения геометрических параметров составляет 0,37 мм для одного цифрового видеоизображения размером 3200×2400 д.т (2000×1500 мм). Ошибка определения текущих координат и параметров движения изделий для специализированной цифровой видеокамеры составляет 0,2 мм при времени оценивания этих параметров 0,5 с.

The mathematical models and the method of parameters optimization of information about two-dimensional mechanical values are considered. The basic parameters of two-dimensional information include the size of a two-dimensional image of the object of measurements, errors of measurement of coordinates, time of the image input in the digital computer. Analytical solution of the problem of optimization of two-dimensional information parameters has been obtained. It has been proved by experiment that the accuracy of the point co-ordinate measurement increases 1,3 times.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вострокнутов Н.Г., Евтихийев Н.Н.* Информационно-измерительная техника. Учеб. пособие. — М. : Высшая школа, 1977. — 232 с.
2. *Безвесильна О.М., Тимчик Г.С.* Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем: Підручник. — Житомир : ЖДТУ, 2012. — 812 с.
3. *Безвесильна О.М., Подчашинський Ю.О.* Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин: Підручник. — Житомир : ЖДТУ, 2011. — 876 с.
4. *Претт У.* Цифровая обработка изображений. Пер. с англ. — М. : Мир, 1982. — 792 с.
5. *Измерительные сканирующие приборы.* Под ред. Б.С. Розова. — М. : Машиностроение, 1980. — 198 с.
6. *Шарыгин М.Е.* Сканеры и цифровые камеры. — СПб. : BHV — Санкт-Петербург, 2000. — 384 с.
7. *Иванов В.В.* Методы вычислений на ЭВМ. Спр. пособие. — К. : Наук. думка, 1986. — 582 с.
8. *Кориунов Ю.М.* Математические основы кибернетики. Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергия, 1980. — 424 с.
9. *Растринин Л.А.* Современные принципы управления сложными объектами. — М. : Сов. радио, 1980. — 232 с.
10. Пат. 78419 Україна, МПК (2006) G 01 В 7/00. Спосіб оцінки викривлень вимірювальної інформації на відеозображеннях, відновлених після стиснення / Ю.О. Подчашинський. № а2005 06848; Заявл. 11.07.05; Опубл. 15.03.07. Бюл. № 3.
11. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. — М. : Техносфера, 2005. — 1072 с.
12. *ДСТУ БВ 2.7-16-95.* Матеріали стінові кам'яні. Номенклатура показників якості. — К. : Держ. комітет у справах містобудування і архітектури, 1996. — 19 с.

Поступила 02.02.11

БЕЗВЕСИЛЬНАЯ Елена Николаевна, Заслуженный деятель науки и техники Украины, д-р техн. наук, профессор кафедры приборостроения Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». В 1972 г. окончила Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — методы измерения механических величин; гравиметрические системы.

ПОДЧАШИНСКИЙ Юрий Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и управления в технических системах Житомирского государственного технологического университета. В 1987 г. окончил Житомирский филиал Киевского политехнического ин-та. Область научных исследований — методы измерения механических величин; цифровая обработка двумерных сигналов.