

**ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ВИЗИРНОЙ ЦЕЛИ**А. Н. Шилин¹, Д. А. Роцин^{2*}¹ *Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия*² *Научно-исследовательский испытательный центр Железнодорожных войск, Москва, Россия** *whwhwh@mail.ru*

Аннотация. Представлен метод цифровой обработки изображения контура визирной цели в частотной области, позволяющий значительно повысить точность оптоэлектронного устройства при измерении угловых координат объектов. Контур визирной цели на изображении представляется в комплексной плоскости посредством построения ее профилограммы относительно базовой окружности. Для анализа и расчета погрешностей определения контура получен фурье-образ развернутой профилограммы контура визирной цели путем применения дискретного фурье-преобразования, что позволило определить характеристики рассеяния случайной составляющей погрешности измерения координат центра контура визирной цели и оценить погрешности измерения ее параметров на изображении. Параметры контура визирной цели определены по формулам Спрэгга путем решения оптимизационной задачи по вычислению минимума гладкой целевой функции. По результатам фильтрации изображения визирной цели с помощью идеального фильтра высоких частот достигнуто уменьшение абсолютной погрешности измерения угловых координат визирной цели более чем в два раза относительно результатов, полученных с помощью метода наименьших квадратов. Применение методов цифровой обработки изображения визирной цели в частотной области позволило привести погрешность измерения угловых координат оптоэлектронного устройства в пределы допускаемой среднеквадратической погрешности измерения угла для тахеометра технического класса точности.

Ключевые слова: *визирная цель, оптоэлектронное устройство, цифровая обработка изображений, частотная область, фурье-преобразование, аддитивный шум, фильтр высоких частот, профилограмма*

Ссылка для цитирования: *Шилин А. Н., Роцин Д. А. Применение частотного метода обработки изображения для повышения точности определения параметров визирной цели // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 200—209. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-200-209.*

**APPLICATION OF THE FREQUENCY METHOD OF IMAGE PROCESSING
TO IMPROVE THE ACCURACY
OF DETERMINING SIGHTING TARGET PARAMETERS**A. N. Shilin¹, D. A. Roshchin^{2*}¹ *Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia*² *Research and Testing Center of the Railway Troops, Moscow, Russia*
* *whwhwh@mail.ru*

Abstract. A method for digital processing of the image of sighting target contour in the frequency domain is presented, which makes it possible to significantly improve the accuracy of the optoelectronic device when measuring the angular coordinates of objects. The contour of the sighting target image is represented in the complex plane by constructing its profilogram relative to the base circle. To analyze and calculate the errors in determining the contour, the Fourier image of the expanded profilogram of the target contour is obtained by applying a discrete Fourier transform, which makes it possible to determine the scattering characteristics of the random component of the error in measuring the coordinates of the center of the sighting target contour and to evaluate the errors of its image parameters measurement. The contour parameters of the sighting target are determined using the Spragg formulas by solving the optimization problem of calculating the minimum of a smooth objective function. According to results of target image filtering with the help of an ideal high-pass filter, the absolute error in measuring the sighting target angular coordinates is reduced by more than two times relative to results obtained using the least squares method. The application of methods of digital image processing of the sighting target in the frequency domain enables to bring the measurement error of the angular coordinates of the optoelectronic device within the limits of the permissible average square error of angle measurement for a total station of technical accuracy class.

Keywords: sighting target, optoelectronic device, digital image processing, frequency domain, Fourier transform, additive noise, high-pass filter, profilogram

For citation: Shilin A. N., Roshchin D. A. Application of the frequency method of image processing to improve the accuracy of determining sighting target parameters. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 3. P. 200—209 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-200-209.

Введение. Оптоэлектронные устройства являются основной частью многих интеллектуальных информационно-измерительных систем, а также систем технического зрения. Сложность задач, решаемых такими системами, постоянно увеличивается, а требования к их техническим характеристикам повышаются. При этом вопросы повышения надежности и точности подобных систем особенно актуальны, в частности, для таких важных направлений, как безопасность и автоматизация процессов управления техникой. Визирные цели в основном используются при проведении инженерно-геодезических изысканий, а также в системах технического зрения, предназначенных для ориентирования в пространстве. С их помощью осуществляется обнаружение объектов и определение их параметров: координат, геометрических размеров, скорости и направления движения. Например, визирные цели могут применяться для локальной ориентации и навигации беспилотной техники [1], контроля пространственного положения строительной техники, а также автоматизации производства земляных работ [2—4]. Системы технического зрения находят применение и в современных геодезических приборах — тахеометрах, позволяя обнаруживать установленную на штативе визирную цель (отражатель) и отслеживать ее перемещение [5]. Это значительно упрощает работу геодезиста, позволяя ему самостоятельно перемещать визирную цель (вешку с отражателем) с места на место и с помощью пульта дистанционного управления подавать команду тахеометру снять и зарегистрировать в памяти все необходимые отсчеты.

Обнаружение визирной цели в безотражательном режиме возможно только на основе визуальных признаков [6]. Погрешность визирования геодезического прибора напрямую зависит от погрешности определения координат центра визирной цели. При этом точность обнаружения визирной цели на изображении зависит от таких качественных характеристик изображения, как контрастность, резкость, освещенность, цветопередача, оптические искажения, шумы, экспозиция, динамический диапазон, засветка, блики на линзах и т.д. Даже в лабораторных условиях практически невозможно получить идеальное изображение визирной цели. В связи с этим первостепенной задачей для любых оптических систем является улучшение качественных характеристик формируемого ими изображения. В последнее время значительное внимание уделяется частотным методам обработки изображений, что в первую очередь вызвано возросшей производительностью вычислительных машин, а также появлением более совершенных методов обработки изображения в частотной области.

В настоящей статье представлен метод цифровой обработки изображения контура визирной цели в частотной области, который позволяет повысить точность определения координат визирной цели и способствует увеличению дальности проведения бесконтактных измерений с помощью различных оптических и оптоэлектронных систем.

Определение параметров визирной цели в частотной области. Уровень резкости контура и другие скачкообразные изменения яркости визирной цели на изображении связаны с высокочастотными составляющими [7]. Воздействие частотных методов цифровой обработки изображения оценивалось с помощью оптоэлектронного устройства и визирной цели, имеющей форму шара радиусом 22,5 мм. В качестве оптоэлектронного устройства использовалась цифровая видеокамера с типом сенсора CMOS, имеющая следующие технические характеристики: разрешение кадра изображения 2048×1536 пкс, физический размер пиксела 2,2×2,2 мкм, фокусное расстояние объектива 5 мм, динамический диапазон 100 дБ, кадровая

частота видеосъемки 30 Гц. Все измерения проводились в лаборатории с климатической системой, поддерживающей постоянную температуру 20 °С, а также источником света, обеспечивающим постоянный уровень освещенности визирной цели 30 лк.

Изображение визирной цели (рис. 1, а) представлялось в виде двумерной функции $f(x, y)$. Цвет пиксела на изображении задавался с помощью трехкомпонентного вектора в цветовой модели RGB, в которой каждый компонент цвета имеет 256 градаций:

$$\mathbf{c}(x, y) = \begin{bmatrix} r(x, y) \\ g(x, y) \\ b(x, y) \end{bmatrix},$$

где $\forall n \in r(x, y) \vee g(x, y) \vee b(x, y) : n < 256 | r(x, y), g(x, y), b(x, y) \in N$.

Насыщенность компонентов цвета на изображении определялась из выражения

$$\zeta(x, y) = |r(x, y) - g(x, y)| + |r(x, y) - b(x, y)| + |g(x, y) - b(x, y)|.$$

Обнаружение контура визирной цели (рис. 1, б) осуществлялось путем вычисления градиента для каждой точки изображения по методу Ди Зензо [8].

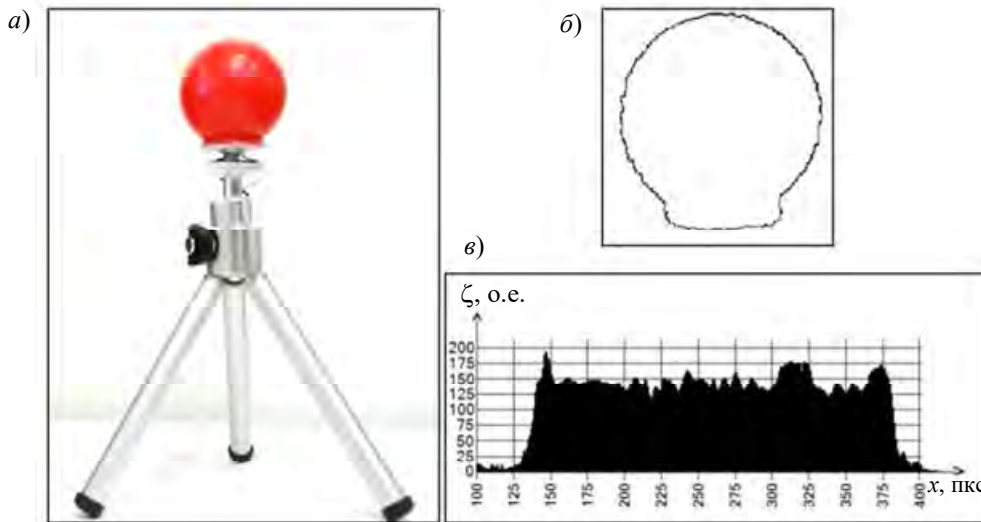


Рис. 1

На гистограмме насыщенности цвета, построенной в горизонтальном сечении изображения визирной цели, из-за недостаточной резкости изображения наблюдается размытость краев (рис. 1, в). Вследствие этого контур визирной цели имеет явно выраженное отклонение формы от окружности. Как следует из проведенных ранее исследований [9, 10], наиболее полное описание геометрических свойств контура сферических объектов можно получить, если в качестве базы выбрана средняя окружность [11]. Наиболее часто для определения параметров базовой средней окружности (координат ее центра и радиуса) используется метод Спрэгга. Данный метод обладает высокой точностью при условии равномерной дискретизации сигнала и относительно малых эксцентриситетах. Соответственно, параметры базовой средней окружности (x_0 , y_0 и r_0), аппроксимирующей контур визирной цели на изображении, можно определить по формулам Спрэгга [12—14]:

$$x_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i; y_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i; r_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i,$$

где x_i , y_i — декартовы координаты точек M_i на контуре L , взятые с равным угловым шагом; r_i — длины радиус-векторов точек M_i ; x_0 , y_0 — координаты центра средней окружности; r_0 — радиус средней окружности, n — количество точек контура.

Развернутая профилограмма контура визирной цели на изображении $\Delta r(\varphi)$ относительно ее среднего радиуса представлена на рис. 2 в виде периодической функции.

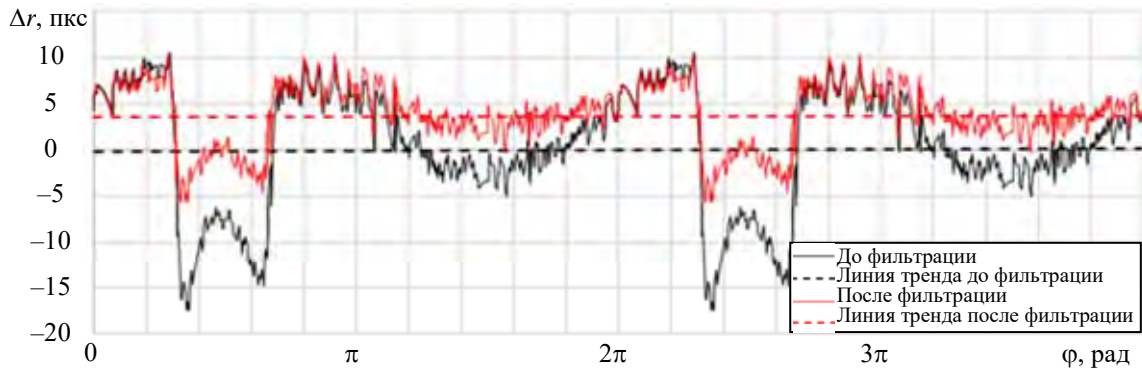


Рис. 2

При анализе погрешностей определения контура визирной цели использовался спектральный метод, основанный на разложении функции ее контура в полярных координатах в ряд Фурье [15]:

$$r(\varphi) = r_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\varphi + \varphi_k),$$

где k — коэффициент, определяющий отклонение формы контура визирной цели от окружности; φ — переменный угол, образуемый радиус-вектором с полярной осью; r_0 — радиус средней окружности, определяемый как среднее значение функции $r(\varphi)$; A_k и φ_k — амплитуда и начальная фаза k -гармоники, характеризующей погрешность формы, которые определяются с помощью следующих выражений:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \varphi_k = \arctg(b_k / a_k),$$

где параметры a_k и b_k определяются как

$$a_k = \frac{1}{\pi} \sum_{-\pi}^{\pi} r(\varphi) \cos(k\varphi) \cdot \Delta\varphi, \quad b_k = \frac{1}{\pi} \sum_{-\pi}^{\pi} r(\varphi) \sin(k\varphi) \cdot \Delta\varphi.$$

При реализации спектрального метода сравнительно просто решается задача определения радиуса средней окружности и координат центра визирной цели, поскольку амплитуда и фаза первой гармоники определяют смещение центра относительно базы измерения. Представление профилограммы в виде суммы гармонических составляющих с помощью теоремы Котельникова упрощает решение вопроса о выборе шага дискретизации. Кроме того, может быть решена задача фильтрации гармонических составляющих.

Фурье-образ развернутой профилограммы контура визирной цели сформирован путем применения дискретного фурье-преобразования:

$$\hat{f}(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-i2\pi(ux/M)},$$

где M — количество пикселей в строке изображения.

Элементы фурье-образа в общем случае являются комплексными величинами. Однако поскольку функция $f(x)$ вещественная, то ее фурье-преобразование обладает симметрией по отношению к операции комплексного сопряжения

$$\hat{f}(u) = f^*(-u).$$

Спектр фурье-преобразования (рис. 3, а) определяется из выражения

$$|\hat{f}(u)| = \sqrt{\text{Re}^2 u + \text{Im}^2 u},$$

где $\text{Re} u$, $\text{Im} u$ — действительная и мнимая части фурье-образа.

Фазовый спектр фурье-преобразования (рис. 3, б) был получен из выражения

$$|\varphi(u)| = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{Im} u}{\operatorname{Re} u} \right).$$

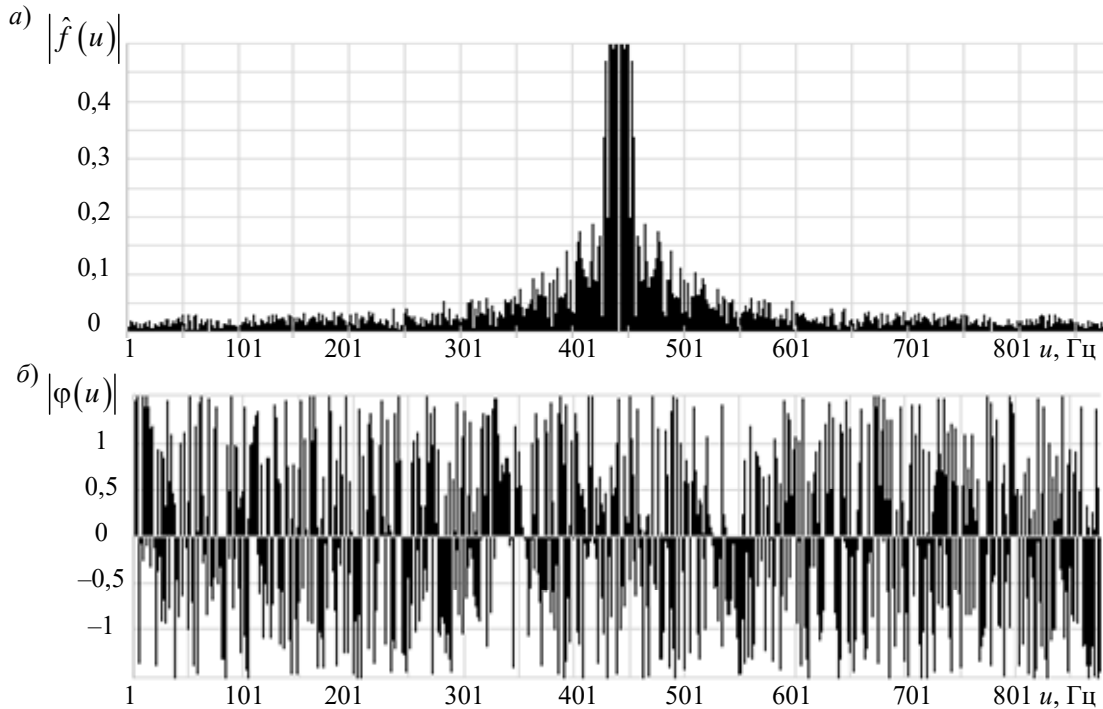


Рис. 3

Для анализа и расчета погрешностей определения контура также необходима информация о законах распределения величин r_0 , A_k и φ_k . Первая величина вызывает рассеяние результатов измерения радиуса визирной цели r_0 , вторая — рассеяние амплитуд A_k гармонических составляющих некруглости; третья — приводит к случайным величинам фазовых углов φ_k . Это означает, что r_0 , A_k и φ_k являются независимыми случайными величинами. В теории вероятностей случайные величины считаются независимыми, если известное значение одной из них не дает информации о других величинах. Двумерная функция плотности вероятности параметров A и φ задается выражением

$$p(A, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right).$$

Для определения одномерной функции плотности вероятности $p(A)$ двумерная функция плотности вероятности интегрируется по всем возможным значениям фазы:

$$p(A) = \int_0^{2\pi} p(A, \varphi) d\varphi = \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right); \quad 0 < A < \infty.$$

Это распределение амплитуды является распределением Рэля. Интегрируя двумерную функцию плотности вероятности по всем возможным значениям амплитуды, находим функцию плотности вероятности

$$p(\varphi) = \int_0^{\infty} p(A, \varphi) dA = \frac{1}{2\pi} \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right) A dA.$$

Используя замену переменной $A^2 = z$, получаем

$$p(\varphi) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{z}{2\sigma^2}\right) dz = \frac{1}{4\pi\sigma^2} 2\sigma^2 = \frac{1}{2\pi}; \quad 0 < \varphi < 2\pi.$$

Отсюда следует, что фаза распределена равномерно в промежутке $(0, 2\pi)$. Сопоставляя $p(A)$ и $p(\varphi)$ с выражением $p(A, \varphi)$, приходим к важному выводу, что $p(A, \varphi) = p(A)p(\varphi)$. Следовательно, амплитуда и фаза нормального узкополосного процесса, характеризующего отклонение формы визирной цели от окружности, являются независимыми случайными величинами в совпадающие моменты времени.

Из центральной предельной теоремы также следует, что сумма достаточно большого количества слабо зависимых случайных величин, имеющих примерно одинаковые масштабы (ни одно из слагаемых не доминирует, не вносит в сумму определяющего вклада), имеет распределение, близкое к нормальному, которое называют распределением Гаусса. Поскольку

$$r_0 = \frac{1}{2\pi} \sum_{-\pi}^{\pi} r(\varphi) \Delta\varphi,$$

где $r(\varphi)$ — достаточно большое количество слабо зависимых значений радиуса, взятых с малым шагом $\Delta\varphi$, то распределение $\hat{f}(r_0)$ будет близко к нормальному:

$$\hat{f}(r_0) = \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(r_0 - m_r)^2}{2\sigma_r^2} \right],$$

где σ_r — СКО радиуса визирной цели, m_r — математическое ожидание значения радиуса (центр рассеяния).

Соответственно амплитуда распределена по закону Рэлея:

$$\hat{f}(A_k) = \begin{cases} \frac{A_k}{\sigma_k^2} \exp \left(-\frac{A_k^2}{2\sigma_k^2} \right) & \text{при } A_k > 0; \\ 0 & \text{при } A_k \leq 0, \end{cases}$$

а фаза имеет равномерный закон распределения:

$$f(\varphi_k) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & \text{при } 0 \leq \varphi_k \leq 2\pi, \\ 0 & \text{при } \varphi_k < 0, \varphi_k > 2\pi. \end{cases}$$

В результате математических преобразований получен теоретический закон распределения некруглости [16]:

$$\hat{f}(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sqrt{\sigma_r^2 + \sum_{k=2}^p \sigma_k^2}} \exp \left[-0,5(r - m_r)^2 \left(\sigma_r^2 + \sum_{k=2}^p \sigma_k^2 \right)^{-1} \right].$$

Высшая гармоническая составляющая k ограничивается номером гармоники p , с которой начинается отсчет микрогеометрии. Это распределение является гауссовым с центром рассеяния $m_r = m_R$ и дисперсией

$$\sigma_R^2 = \sigma_r^2 + \sum_{k=2}^p \frac{m_{A_k}^2 + \sigma_k^2}{2}.$$

Результаты частотной обработки изображения. Среднеквадратическое отклонение радиуса визирной цели на изображении $\sigma_R \approx 5,22$ пкс, также были определены СКО высшей гармонической составляющей $\sigma_k \approx 2,21$ пкс и величина центра рассеяния $m_R \approx 132,62$ пкс. График функции распределения $f(r)$ для этих значений характеристик показан на рис. 4.

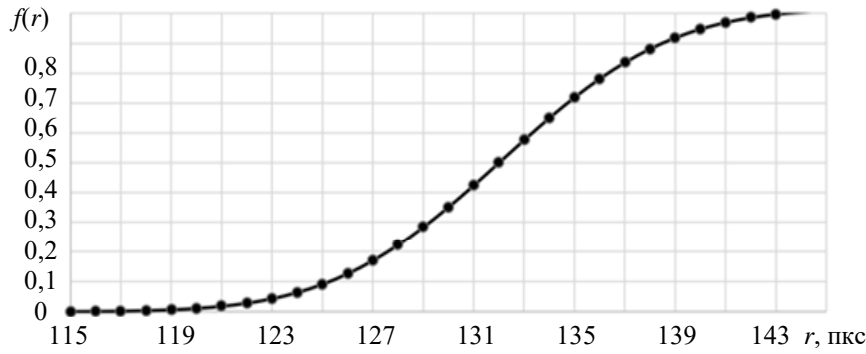


Рис. 4

В результате применения фильтра высоких частот из профилограммы были исключены значения радиусов, превышающие центр рассеяния m_R на величину σ_k . Для фильтрации применялся идеальный фильтр высоких частот, в радиусе действия гармоники p заданный выражением

$$h(u) = \begin{cases} 0 & \text{при } \hat{f}(u) \leq \sigma_k, \\ 1 & \text{при } \hat{f}(u) > \sigma_k. \end{cases}$$

Чтобы оценить результат фильтрации гармоник в спектре частот фурье-образа контура визирной цели, данный спектр частот необходимо привести к исходному виду — профилограмме (см. рис. 3). С этой целью применялось обратное преобразование Фурье:

$$g(\varphi) = \mathfrak{F}^{-1} [h(u) \hat{f}(u)].$$

Значение среднего радиуса r_0 вычислялось повторно для точек контура, оставшихся после фильтрации в частотной области изображения. Для определения параметров контура визирной цели с помощью формул Спрэгга была решена оптимизационная задача по вычислению минимума гладкой целевой функции:

$$\min_{x, y, R} \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - r_0 \right)^2.$$

В результате значение среднего радиуса контура визирной цели на изображении уменьшилось до $r_0 \approx 130,86$ пкс, также были найдены координаты центра окружности, аппроксимирующей контур визирной цели на изображении: $(x_0, y_0) \approx (130,52, 137,97)$ пкс.

Сравнительная оценка параметров визирной цели проводилась с помощью метода наименьших квадратов (МНК) [17], в соответствии с которым радиус и координаты центра визирной цели вычислялись согласно выражениям

$$R_{\text{МНК}} = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + \frac{\sum x^2 + \sum y^2 - 2(x_0 \sum x + y_0 \sum y)}{n}};$$

$$x_0 = (w_1 n_{22} - w_2 n_{12}) / \det N; \quad y_0 = (w_2 n_{11} - w_1 n_{21}) / \det N,$$

где w_i, n_{ij} — элементы введенных для упрощения матриц W и N , определяемых выражениями

$$W = \begin{bmatrix} \sum x^3 + \sum xy^2 - \frac{1}{n} \sum x^2 \sum x - \frac{1}{n} \sum y^2 \sum x \\ \sum x^2 y + \sum y^3 - \frac{1}{n} \sum x^2 \sum y - \frac{1}{n} \sum y^2 \sum y \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} 2 \left(\sum x^2 - \frac{1}{n} \sum x \sum x \right) & 2 \left(\sum xy - \frac{1}{n} \sum x \sum y \right) \\ 2 \left(\sum xy - \frac{1}{n} \sum x \sum y \right) & 2 \left(\sum y^2 - \frac{1}{n} \sum y \sum y \right) \end{bmatrix}.$$

Отклонение формы контура визирной цели на изображении от формы аппроксимирующей окружности (рис. 5) определялось на основании смещенной оценки дисперсии точек контура:

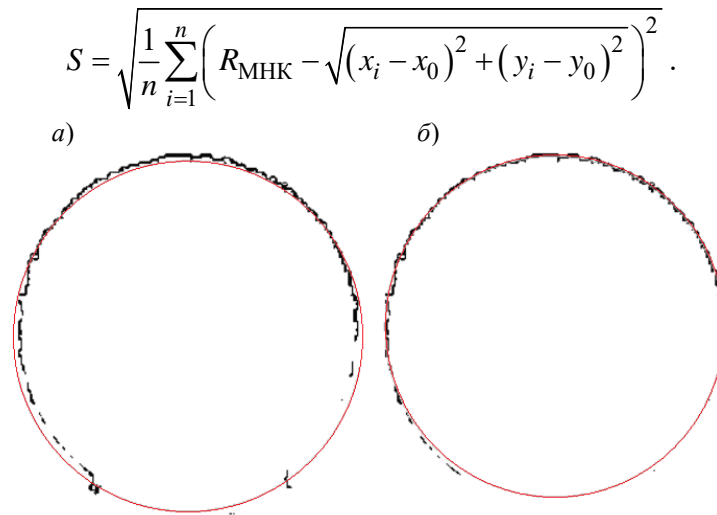


Рис. 5

Смещенная оценка дисперсии точек контура относительно параметров визирной цели, определенных частотным методом (рис. 5, б), уменьшилась в 2,85 раза (с 6,3 до 2,21) по сравнению с оценкой этих параметров, полученных методом наименьших квадратов (рис. 5, а). Погрешность определения угловых координат визирной цели уменьшилась на 0,71". По сравнению с погрешностью измерения, вносимой геодезическими приборами, данная погрешность (в соответствии с ГОСТ Р 51774-2001) является существенной и более чем в три раза превышает максимальную допустимую погрешность измерения углов тахеометром технического класса точности. Таким образом, применение изложенных методов цифровой обработки изображений в частотной области позволило выявить и устранить значительную погрешность измерения параметров визирной цели.

Заключение. Рассмотренные методы цифровой обработки изображений в частотной области применимы для различных типов оптических систем и направлены в первую очередь на повышение точности определения размера и координат визирных целей на изображении. Основной упор был сделан на дискретный метод преобразования Фурье и его особенности, связанные с обработкой контура визирной цели на изображении. Данное преобразование стало возможным благодаря представлению контура визирной цели в виде профилограммы относительно средней окружности, аппроксимирующей точки контура. Такой подход позволил представить изображение в комплексной плоскости и описать его с помощью совокупности составляющих частот. В результате были получены характеристики рассеяния случайной составляющей погрешности измерения координат центра контура и выявлены погрешности измерения параметров визирной цели на изображении.

Таким образом, применение частотных методов цифровой обработки изображений позволяет повысить точность определения координат визирной цели и способствует увеличению дальности проведения бесконтактных измерений с помощью различных оптических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов С. М., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Бесконтактные средства локальной ориентации роботов. СПб: Ун-т ИТМО, 2017. 169 с.
2. Роцин Д. А. Погрузка гусеничной техники своим ходом на автоприцеп: управление с помощью системы технического зрения // Измерительная техника. 2022. № 1. С. 23—29. DOI 10.32446/0368-1025it.2022-1-23-29.
3. Jinwoo K., Seokho Ch., Jongwon S. Interaction analysis for vision-based activity identification of earthmoving excavators and dump trucks // Automation in Construction. 2018. Vol. 87. P. 297—308. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.016.

4. Роцин Д. А. Применение системы машинного зрения для контроля пространственного положения строительной техники // Измерительная техника. 2022. № 3. С. 29—35. DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-3-29-35.
5. Виноградов А. В., Войтенко А. В. Современные технологии геодезических изысканий: Учеб. пособие. Омск: СибАДИ, 2012. 111 с.
6. Song Y., Fan R., Huang S. et al. A three-stage real-time detector for traffic signs in large panoramas // Computational Visual Media. 2019. N 5. P. 403—416. DOI:10.1007/s41095-019-0152-1.
7. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
8. Di Zenzo S. A note on the gradient of a multi-image // Computer vision, Graphics, and Image Processing. 1986. Vol. 33, N 1. P. 116—125
9. Гебель И. Д. Инвариантные свойства отклонения профиля от круглой формы // Измерительная техника. 1978. № 11. С. 16—19.
10. Гебель И. Д. Выбор базовой окружности при измерении формы профиля тел вращения // Измерительная техника. 1971. № 10. С. 20—24.
11. Шилин А. Н. Анализ методов и схем измерения геометрических параметров обечаек в процессе их формообразования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. № 9. С. 44—52.
12. Авдулов А. Н. Контроль и оценка круглости деталей машин. М.: Изд-во стандартов, 1974. 175 с.
13. Spragg R. C. Accurat calibration of Surface Texture and roundness Measuring Instruments // Proc. Institution of Mech. Engineers. 1967—1968. Vol. 182. Part 3k. P. 497.
14. Spragg R. C., Whitehouse D. J. New Unified Approach to Surface Metrology // Proc. Institution of Mech. Engineers. 1970—1971. Vol. 185. P. 47—71.
15. Гаврилова А. Н. Точность производства в машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение, 1973. 567 с.
16. Сизенов Л. К. Суммирование погрешностей размеров и формы в поперечном сечении цилиндрических деталей // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1969. № 11. С. 134—138.
17. Gander W., Golub G. H., Strelbel R. Least-squares fitting of circles and ellipses // BIT. 1994. Vol. 34, N 4. P. 558—578. DOI:10.1007/BF01934268.

Сведения об авторах

- Александр Николаевич Шилин** — д-р техн. наук, профессор; Волгоградский государственный технический университет, кафедра электроники; зав. кафедрой;
E-mail: eltech@vstu.ru
- Дмитрий Александрович Роцин** — канд. техн. наук; НИИЦ Железнодорожных войск;
E-mail: whwhwh@mail.ru

Поступила в редакцию 01.09.22; одобрена после рецензирования 11.11.22; принята к публикации 25.01.23.

REFERENCES

1. Vlasov S.M., Boykov V.I., Bystrov S.V., Grigoriev V.V. *Beskontaktnyye sredstva lokal'noy oriyentatsii robotov* (Non-Contact Means of Local Orientation of Robots), St. Petersburg, 2017, 169 p. (in Russ.)
2. Roshchin D.A. *Measurement Techniques*, 2022, no. 1, pp. 24-32.
3. Jinwoo K., Seokho Ch., Jongwon S. *Automation in Construction*, 2018, vol. 87, pp. 297-308, DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.016.
4. Roshchin D.A. *Measurement Techniques*, 2022, no. 3, pp. 180-187.
5. Vinogradov A.V., Voitenko A.V. *Sovremennyye tekhnologii geodezicheskikh izyskaniy* (Modern Technologies of Geodetic Surveys), Omsk, 2012, 111 p. (in Russ.)
6. Song Y., Fan R., Huang S. et al. *Computational Visual Media*, 2019, no. 5, pp. 403-416, DOI:10.1007/s41095-019-0152-1.
7. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 2008, 954 p.
8. Di Zenzo S. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1986, no. 1(33), pp. 116-125.
9. Gebel' I.D. *Measurement Techniques*, 1978, no. 11, pp. 1495-1500.
10. Gebel' I.D. *Measurement Techniques*, 1971, no. 10, pp. 1485-1492.
11. Shilin A.N. *Devices and Systems. Management, Control, Diagnostics*, 2002, no. 9, pp. 44-52. (in Russ.)
12. Avdulov A.N. *Kontrol' i otsenka kruglosti detaley mashin* (Control and Evaluation of the Roundness of Machine Parts), Moscow, 1974, 175 p. (in Russ.)

13. Spragg R.C. *Proc. Instr. Mech. Engrs.*, 1967–1968, vol. 182, pt. 3k, pp. 497.
14. Spragg R.C., Whitehouse D.J. *Proc. Instr. Mech. Engrs.*, 1970–1971, vol. 185, pp. 47–71.
15. Gavrilova A.N. *Tochnost' proizvodstva v mashinostroyenii i priborostroyenii* (Production Precision in Mechanical Engineering and Instrumentation), Moscow, 1973, 567 p. (in Russ.)
16. Sizenov L.K. *Journal of Instrument Engineering*, 1969, no. 11, pp. 134–138. (in Russ.)
17. Gander W., Golub G.H., Strebel R. *BIT*, 1994, no. 4(34), pp. 558–578, DOI:10.1007/BF01934268.

Data on authors

- Aleksander N. Shilin** — Dr. Sci., Professor; Volgograd State Technical University, Department of Electronics; Head of the Department; E-mail: eltech@vstu.ru
- Dmitry A. Roshchin** — PhD; Research and Testing Center of the Railway Troops; E-mail: whwhwh@mail.ru

Received 01.09.22; approved after reviewing 11.11.22; accepted for publication 25.01.23.