

Уменьшение искажений в оптических измерительных системах

Б. Т. БУДАИ, И. В. МЯКУТИНА, Н. В. КАСАТКИН

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия
e-mail: buda080316@rambler.ru

Показано, что в оптических измерительных системах погрешности измерений координат объекта во многом зависят от искажений изображений, обусловленных дифракцией объектива. Проведена аналитическая оценка указанных искажений в зависимости от размера объектива, свидетельствующая о возможности уменьшения искажений изображений путем более точного выбора размера объектива и других параметров оптического тракта.

Ключевые слова: оптические измерительные системы, размер объектива, низкочастотные искажения изображения, дифракция, эмпирическая и аналитическая оценки.

The decrease of image distortion and the blur of images is the main requirement for optical measuring systems. The dependence of the distortions of images from the sizes of the lens determined with high accuracy allowed to reduce the objective size. The application of analytical assessment leads to decrease of image distortions by means of more accurate selection of the lens sizes and other optical circuit parameters.

Key words: optical measuring systems, impact resistance, lens size, image low frequency distortions, diffraction, empirical and analytical estimates.

В настоящее время актуально применение оптических систем для измерений целостности продуктопроводов, угловых координат объектов и пр., в том числе при условии фоновых помех [1—3]. В качестве примера на рис. 1 представлена структурная схема оптической измерительной системы (ОИС) для обнаружения и измерения угловых координат цели $\alpha_c(t)$, наблюдаемой с находящейся рядом сигналоподобной помехой (далее, фон Φ) с угловыми координатами $\alpha_\Phi(t)$. Формирующая оптическая система ФОС, включающая объектив, проецирует изображение в плоскость фотоматрицы приемника Π . На выходе приемника формируется видеосигнал $U_{\text{пр}}(\Delta\alpha)$, где $\Delta\alpha$ — отклонение углового положения линии визирования ОИС $\alpha_b(t)$ относительно угловых координат изображения цели $\Delta\alpha_c(t) = \alpha_c(t) - \alpha_b(t)$ и угловых координат изображения фона $\Delta\alpha_\Phi(t) = \alpha_\Phi(t) - \alpha_b(t)$. Так как важным является отклонение координат цели и фона, то для простоты примем $\alpha_b(t) = 0$.

На выходе измерителя координат ИК формируется их оценка $\Delta\hat{\alpha}_c(t)$. Сигнал, пропорциональный этой оценке, через корректирующий фильтр КФ поступает на привод платформы ПП и изменяет положение линии визирования, соответствующее оценке координат цели $\alpha_b(t) = \hat{\alpha}_c(t)$.

В изображениях наиболее важен сигнатурный параметр. На рис. 2, а (кривые 1, 3) показано исходное изображение фоно-целевой обстановки на выходе приемника в предположении, что оптический тракт распространения сигнала изображения не вносит искажений:

$$U_{\text{п.исх}}(\Delta\alpha) = U_{\text{ц.исх}}(\Delta\alpha) + U_{\text{ф.исх}}(\Delta\alpha), \quad (1)$$

где $U_{\text{ц.исх}}(\Delta\alpha)$ — изображение цели размером L_c ,

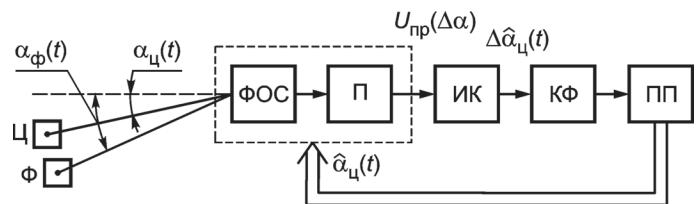


Рис. 1. Структурная схема оптической измерительной системы: Ц — цель; Ф — сигналоподобная помеха (фон); ФОС — формирующая оптическая система; П — приемник; ИК — измеритель координат; КФ — корректирующий фильтр; ПП — привод платформы

$$U_{\text{ц.исх}}(\Delta\alpha) = \begin{cases} U_0, & |\Delta\alpha - \Delta\alpha_c| \leq L_c/2; \\ 0, & |\Delta\alpha - \Delta\alpha_c| > L_c/2, \end{cases} \quad (2)$$

где $U_{\text{ф.исх}}(\Delta\alpha)$ — изображение фона размером L_Φ ,

$$U_{\text{ф.исх}}(\Delta\alpha) = \begin{cases} U_0, & |\Delta\alpha - \Delta\alpha_\Phi| \leq L_\Phi/2; \\ 0, & |\Delta\alpha - \Delta\alpha_\Phi| > L_\Phi/2. \end{cases}$$

В дальнейшем амплитуды сигналов от цели и фона приняты одинаковыми и равными U_0 .

Оптический тракт распространения сигнала приводит к искажениям изображения в результате турбулентности атмосферы, дифракции оптики, аберрации объектива, конечного размера элементов приемника и ограниченной полосы пропускания видеоусилителя, движения изображения объекта в плоскости фотоматрицы приемника ОИС и др. При этом оптический тракт вносит искажения, эквивалентные действию двухмерного фильтра нижних пространственных частот (ФНЧ) [4]. Действие этого фильтра эквивалентно по-

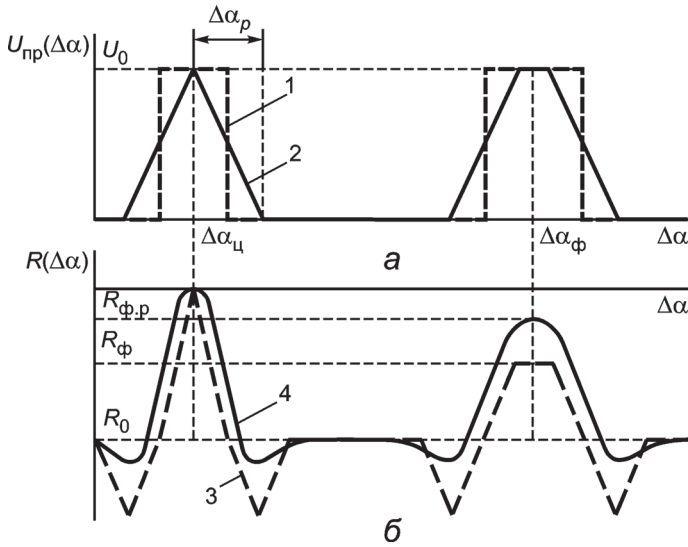


Рис. 2. Графики фоноцелевой обстановки на выходе приемника (а) и критериальные функции (б), полученные по (7):

1 — исходное изображение; 2 — результат свертки исходного сигнала с импульсной характеристикой; 3, 4 — неискаженный и искаженный сигналы, соответственно

следовательно действию двух ФНЧ в перпендикулярных направлениях. Для одномерного случая размытый (смазанный) сигнал на выходе приемника анализируют в виде свертки исходного сигнала в плоскости цели $U_{\text{п.исх}}(\Delta\alpha)$ с асимптотически гауссовой импульсной характеристикой (ИХ) тракта $h_{\text{тр}}(\tau)$ [4—7]:

$$U_{\text{п.р}}(\Delta\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{п.исх}}(\Delta\alpha - \tau) h_{\text{тр}}(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $h_{\text{тр}}(\tau) \approx \exp\left(-\tau^2 / (2\sigma_c^2)\right) / (\sigma_c \sqrt{2\pi})$,

$$\sigma_c(d) \approx \sqrt{\sigma_{\text{т}}^2(d) + \sigma_{\text{д}}^2(d) + \sigma_{\text{а}}^2(d) + \sigma_{\text{п}}^2 + \sigma_{\text{бу}}^2 + \sigma_{\text{дв}}^2}, \quad (4)$$

где σ_c — суммарное среднее квадратическое отклонение (СКО) тракта распространения оптического сигнала; $\sigma_{\text{т}}$, $\sigma_{\text{д}}$, $\sigma_{\text{а}}$, $\sigma_{\text{п}}$, $\sigma_{\text{бу}}$, $\sigma_{\text{дв}}$ — СКО, определяемые турбулентностью, дифракцией, абберацией, конечными размерами элементов приемников, полосой видеоусилителя, движением изображения в плоскости фотоматрицы [4]; d — диаметр объектива.

Низкочастотные искажения изображений приводят к увеличению погрешности первого вида, обусловленной флуктуацией [3]. Например, для традиционного алгоритма обнаружения по критерию максимального правдоподобия СКО измерений координат пропорционально СКО эквивалентного гауссовоподобного ФНЧ [3—4]:

$$\sigma_{\text{изм}} \approx \sigma_c. \quad (5)$$

Кроме того, низкочастотные искажения изображений приводят и к увеличению вероятности погрешности второго вида, обусловленной увеличением боковых лепестков критериальной функции [4].

Для анализа возможности возникновения погрешностей второго вида гауссову функцию аппроксимируем равномерной функцией с тем же СКО [3]:

$$h_{\text{тр}}(\tau) = \begin{cases} (2\sqrt{3}\sigma_c)^{-1}, & |\tau| \leq \sqrt{3}\sigma_c, \\ 0, & |\tau| > \sqrt{3}\sigma_c. \end{cases}$$

На рис. 2, а (кривая 2) показан результат свертки исходного сигнала (см. (1)) с ИХ. При этом значение низкочастотных искажений фронта сигнала (см. (2)) составляет

$$\Delta\alpha_p = 2\sqrt{3}\sigma_c. \quad (6)$$

В результате искажений изображения цели и фона становятся похожи. Для того чтобы это оценить, рассмотрим критериальную функцию, соответствующую обнаружению координаты цели $\Delta\hat{\alpha}_{\text{ц}}$ по критерию максимального правдоподобия [2]:

$$\begin{cases} R(\Delta\alpha) = \sum_j U_c(\Delta\alpha + j\Delta\alpha_d) U_{\text{эт}}(j\Delta\alpha_d) + R_0; \\ \Delta\hat{\alpha}_{\text{ц}} = \arg\max(R(\Delta\alpha)), \end{cases} \quad (7)$$

где $\Delta\alpha_d$ — шаг пространственного квантования; $U_c(\Delta\alpha + j\Delta\alpha_d)$ — аддитивная смесь сигнала $U_{\text{п}}(\Delta\alpha)$ и шума детектирования $\xi(\Delta\alpha)$; $U_{\text{эт}}(j\Delta\alpha_d)$ — эталонное изображение цели, соответствующее выражению (2):

$$U_{\text{эт}}(j\Delta\alpha_d) = \begin{cases} U_{\text{пр.ц}}(j\Delta\alpha_d) - U_{\text{ср}}; \\ 0, \end{cases}$$

где $U_{\text{ср}}$ — среднее значение по области определения эталона $J_{\text{ц}}; j \in J_{\text{ц}}$.

Учитывая, что рассмотрены только низкочастотные искажения, воспользуемся достаточно большим отношением сигнал—шум, при котором $\xi(\Delta\alpha) \approx 0$. На рис. 2, б приведены критериальные функции (7) для случая неискаженных (см. (1)) и искаженных (см. (3)) сигналов. В частности, максимум критериальной функции от фона в случае искаженного изображения $R_{\text{ф.р}}(\Delta\alpha_{\text{ф}})$ ощутимо больше соответствующего максимума $R_{\text{ф}}(\Delta\alpha_{\text{ф}})$ неискаженного изображения: $R_{\text{ф.р}}(\Delta\alpha_{\text{ф}}) > R_{\text{ф}}(\Delta\alpha_{\text{ф}})$ и стремится к отклику от цели $R_{\text{ф.р}}(\Delta\alpha_{\text{ф}}) \approx R(\Delta\alpha_{\text{ц}})$. Это и обуславливает увеличение вероятности погрешности второго вида [2].

Таким образом, СКО погрешностей первого вида (см. (5)) и второго, определяемые искажениями изображений типа смазывания с параметром $\Delta\alpha_p$ (см. (6)), обусловлены действием эквивалентного искажающего ФНЧ с СКО, равным σ_c . Чтобы уменьшить указанные погрешности, выясним, отчего зависит σ_c . Основной аргумент функции σ_c — диаметр объекта d . В зарубежных бортовых ОИС для уменьшения влияния аббераций и снижения стоимости применяют объективы с малыми диаметрами [10]:

$$d_{\text{м}} \approx 10^{-1,5} \text{ м.}$$

Обычно СКО, обусловленное дифракцией, имеет вид $\sigma_{\text{д}} \approx \lambda/d$ [4]. На длине волны $\lambda \approx 10^{-6}$ м и при диаметре объектива $d_{\text{м}}$

$$\sigma_{\text{д}} \approx 10''.$$

Покажем, что при типовых малых соотношениях диаметра и фокусного расстояния [4]:

$$d/f < 10^{-0,5},$$

которые характерны для малых диаметров объективов, влиянием аберрации можно пренебречь:

$$\sigma_a \ll \sigma_d.$$

Влиянием турбулентности также можно пренебречь $\sigma_t \ll \sigma_d$ [4].

При оценке СКО σ_n следует учесть, что при наблюдении удаленных малоразмерных объектов обычно применяют узкие поля зрения $\alpha_{п.з} < 10^{-1,5}$ при большом количестве элементов в строке фотоматрицы приемника $N_n \approx 10^3$. Так как

$$\sigma_n = \alpha_{п.з} / (\sqrt{12} N_n), \text{ то } \sigma_n \ll \sigma_d.$$

Обычно полосу видеосузителя выбирают из условия $\sigma_{ву} \approx \sigma_n$.

В статье рассмотрена ОИС, следящая за изображением цели, поэтому движением цели при автосопровождении ее в плоскости фотоматрицы приемника можно пренебречь. Тогда $\sigma_{дв} \ll \sigma_d$, а основной причиной искажений изображений в бортовых ОИС оказываются искажения, обусловленные дифракцией, причем $\sigma_c \approx \sigma_d$. В этом случае значение искажений при прямоугольной аппроксимации импульсной характеристики эквивалентного искажающего ФНЧ будет

$$\Delta\alpha_p = 2\sqrt{3}\sigma_d \text{ (см. рис. 2, а).}$$

Несмотря на то, что дифракция является главным фактором, приводящим к искажениям изображений, в научно-технической литературе нет аналитической оценки СКО, обусловленной дифракцией. Это приводит к значительному завышению размеров объективов. Более радикальным путем решения проблемы является уточнение оценки влияния дифракции путем вычисления СКО, определяемого импульсной характеристикой $h_d(x)$. Объективы обычно имеют круглую или прямоугольную форму. Для круглого объектива импульсная характеристика описывается сравнительно сложным для анализа выражением, а для прямоугольного объектива — более простым:

$$h_d(x) = \left[\sin^2(w_1 x) \right] / (w_1 x)^2. \quad (8)$$

Известно, что ИХ круглого объектива может быть сведена к ИХ прямоугольного [4]. Поэтому оценим СКО сначала прямоугольного, а затем круглого объектива.

На рис. 3 кривой 4 показана ИХ $h_d(\bar{x})$ как функция безразмерного расстояния $\bar{x} = x/w_1$ с $w_1 = \pi\delta^{-1}$, где δ — первое значение, при котором функция (8) равна нулю.

В соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятностей, функция $h_d(x)$ (8) асимптотически эквивалентна гауссовой:

$$h_r(x) = \left(\sqrt{2\pi}\sigma_r \right)^{-1} \exp\left(-\left(x^2/2\sigma_r^2\right)\right); \quad (9)$$

$$\sigma_r = \sigma_{диф}. \quad (10)$$

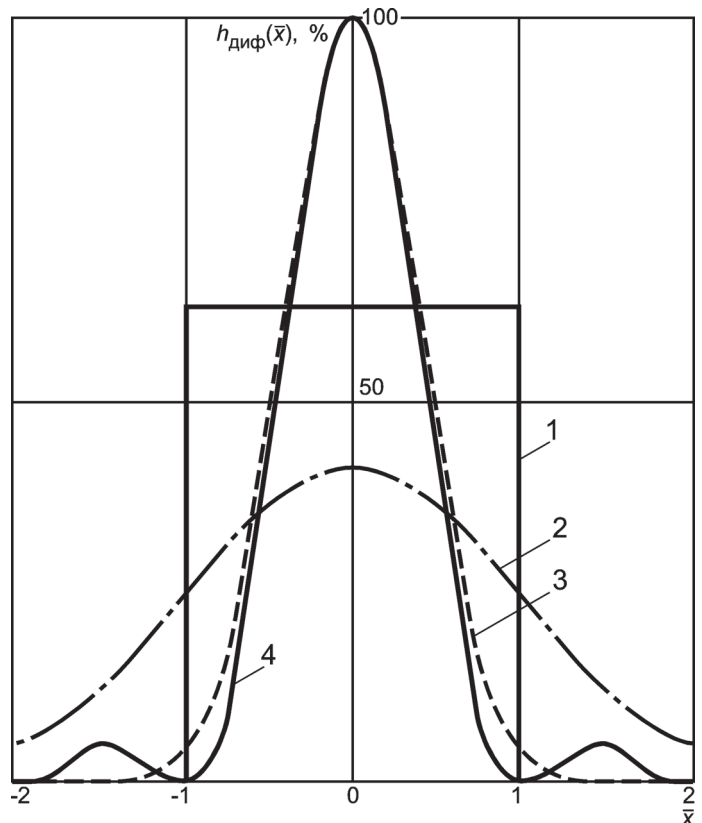


Рис. 3. Аппроксимация импульсной характеристики простыми функциями:

1 — прямоугольной формы; гауссовой формы для круглого 2 и прямоугольного 3 объективов; 4 — ИХ, определяемая по формуле (8)

Представим СКО σ_d для (8) в виде [5]:

$$\sigma_d = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_d(x) x^2 dx} / \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_d(x) dx}. \quad (11)$$

Подставив (8) в (11), получим $\sigma_d = \infty$.

Известно, что СКО, стремящееся к бесконечности, имеют многие функции [8], хотя свертка этих функций с другими ИХ приводит к гауссовоподобным распределениям с конечным СКО. Поэтому использование оценки СКО в виде (11) для оценки СКО ИХ тракта не всегда корректно, что противоречит центральной предельной теореме теории вероятностей [5].

Для преодоления противоречия между бесконечной оценкой СКО и конечным СКО эквивалентной ИХ (см. (10)) практические разработчики вместе с теоретиками идут по эмпирическому пути. Так, и в РФ [7], и за рубежом [6] они в качестве аппроксимирующей функции часто выбирают гауссову форму ИХ (9) с СКО (рис. 3)

$$\sigma_d = \delta, \quad (12)$$

где $\delta \approx \lambda_{ср}/d$, $\lambda_{ср}$ — средняя длина волны сигнала.

Также используют прямоугольную форму аппроксимации $h_d(x)$ (см. рис. 3) [9, 10]. При этом у зарубежных разработчиков [10] СКО $\sigma_d = \delta/\sqrt{3}$, а у российских оно еще больше [9]:

$$\sigma_d = 2\delta/\sqrt{3}. \quad (13)$$

Очевидно, что обе аппроксимации $h_d(x)$ с СКО (12), (13) далеки от ИХ (8). Это обстоятельство определяет актуальность поиска решений, обеспечивающих более точную оценку СКО.

Известно, что большая длительность ИХ соответствует малой ширине спектра сигнала Δw_3 , так как значения этих параметров обратно пропорциональны [11]: $\Delta w_3 \approx 2\pi/\Delta x_3$, причем эффективная длительность ИХ может быть представлена

$$\Delta x_3 = \int_{-\infty}^{\infty} h_d(x)|x|dx / \int_{-\infty}^{\infty} h_d(x)dx,$$

а эффективная ширина спектра сигнала определяется выражением

$$\Delta w_3 = \int_{-\infty}^{\infty} G_d(w)|w|dw / \int_{-\infty}^{\infty} G_d(w)dw,$$

в котором

$$G_d(w) = \begin{cases} 1-w/(2w_1), & w < w_1, \\ 0, & w \geq w_1, \end{cases}$$

где $G_d(w)$ — спектральная функция, определяемая преобразованием Фурье ИХ (8).

Очевидно, что эквивалентная ширина спектра $G_d(w)$ конечна. Сущность предлагаемого решения заключается в применении центральной предельной теоремы теории вероятности не к ИХ (8) с бесконечным СКО, а к ее спектру с конечной шириной. Эту функцию можно представить в виде

$$G_r(w) = \exp\left(-w^2/(2w_{\sigma r}^2)\right) / (w_{\sigma r} \sqrt{2\pi}),$$

где $w_{\sigma r}$ определяют из СКО гауссового распределения (9) как $w_{\sigma r} = 1/\sigma_r$.

Вычислим СКО спектра $G_r(w)$:

$$w_{\sigma d} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} G_d(w)w^2dw} / \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} G_d(w)dw} = \sqrt{2/3} w_1.$$

Тогда СКО гауссовоподобной ИХ составит

$$\sigma_d = \sqrt{3/2}\delta/\pi. \quad (14)$$

На рис. 3 изображена ИХ (см. (8)) с гауссовой аппроксимацией (см. (9)), обусловленной прямоугольным объективом, с СКО, определяемым по (14). В основной области определения ИХ $-\pi\sigma_d \leq x \leq \pi\sigma_d$ получим высокую степень совпадения ИХ и ее аппроксимации.

Для круглой формы объектива эффективна аппроксимация ИХ, аналогичная (8), [4]:

$$h_d(x) \approx \sin^2(w_1^*x) / (w_1^*x)^2, \quad (15)$$

где $w_1^* = \pi d^*/\lambda_{\text{ср}}$, $d^* \approx d/1,2$.

Сравнивая выражения ИХ для прямоугольного (8) и круглого (15) объективов, отмечаем, что дифракция от круглого объектива эквивалентна дифракции от квадратного при увеличении СКО дифракции примерно в 1,2 раза. Такое увеличение дифракции обусловлено уменьшением эквивалентного размера круглого объектива. С учетом этого СКО ИХ круглого объектива представим соотношением

$$\sigma_d^* \approx 1,2\delta\sqrt{3/2}/\pi. \quad (16)$$

Точность аппроксимаций, полученных для СКО прямоугольного (14) и круглого (16) объективов, составила единицы процентов, что соответствует неопределенности в оценке других параметров оптического тракта из выражения (4). Это позволяет эффективно использовать полученные аппроксимации при анализе существующих и создании новых ОИС.

Вывод. Таким образом, в оптических измерительных системах могут возникать погрешности измерения координат объектов двух видов, обусловленные, главным образом, дифракцией объектива. Обычно искажения, обусловленные дифракцией, вычисляются эмпирически. Определена аналитическая оценка искажений изображений, обусловленных дифракцией объектива, в зависимости от размеров объектива. При этом показано, что значения этих искажений примерно в 2 раза меньше, чем определенные эмпирически. Применение полученной аналитической оценки позволит не только уменьшить размеры объектива без увеличения искажений, но и уточнять параметры дифракции путем более эффективного выбора параметров оптического тракта.

Л и т е р а т у р а

1. Будаи Б. Т. и др. Поиск дефектов в оптико-электронных системах // Дефектоскопия. 2012. № 7. С. 45—56.
2. Баклицкий В. К. и др. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. М.: Радио и связь, 1986.
3. Будаи Б. Т., Красовский Н. А. К вопросу о повышении точности измерения координат // Научно-технические ведомости. 2008. № 6. С. 85—91.
4. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 1999.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников. СПб: Лань, 2003.
6. Ллойд Дж. Тепловидение / Пер. с англ. под ред. А. И. Горячева. М.: МИР, 1979.
7. Матвеев А. Н. Оптика. М: Высшая школа, 1985.
8. Кендалл М., Стюарт А. Теория распределений. Т. 1. М.: Физматлит, 1966.
9. Мирошников М. М. Теоретические основы оптикоэлектронных приборов. Л.: Машиностроение, 1977.
10. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972.
11. Харкевич А. А. Основы радиотехники. М.: Связьиздат, 1962.

Дата принятия 11.09.2014 г.