

Систематические погрешности измерения оптико-локационных характеристик малоразмерных объектов с нелокальным когерентным отражением

В. Д. Попело¹, Д. К. Проскурин², И. Р. Фахуртдинов³

¹Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия, e-mail: popelovd@gmail.com

²Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия, e-mail: pdk@vgsu.vrn.ru

³Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: ildar-215@mail.ru

Рассмотрено явление перестройки фазовой структуры оптического излучения, отражённого от малоразмерного объекта с нелокальным когерентным отражением, объектив которого обладает сферической аберрацией. Определены условия появления периферийных «блестящих зон» в пределах апертуры объекта, и оценён их вклад в формирование отражённого сигнала на трассе конечной протяжённости. Оценены систематические погрешности измерения эффективной площади рассеяния центральной «блестящей зоны» и линейной плотности эффективной площади рассеяния периферийной «блестящей зоны».

Ключевые слова: активная оптическая локация, объект с нелокальным отражением, сферическая аберрация.

Значительная группа объектов активной оптической (лазерной) локации относится к малоразмерным целям с нелокальным отражением. Это, прежде всего, оптические и оптико-электронные приборы различного назначения [1, 2], а также световозврататели различной конструкции, используемые в качестве мер сравнения при проведении оптико-локационных измерений [3, 4]. Такие объекты отражают падающее излучение в виде узкого пучка, направленного на источник подсвета, и поэтому в процессе оптико-локационного наблюдения выступают как малоразмерные отражатели с высоким блеском. В качестве основной характеристики отражения этих объектов используют эффективную площадь рассеяния (ЭПР) [5]. Однако её измерение сопровождается возникновением специфических систематических погрешностей [3], связанных с ха-

рактерными изменениями фазовой структуры зондирующего лазерного излучения в процессе взаимодействия с объектом с нелокальным когерентным отражением (НКО). Такие погрешности обычно анализируют, предполагая простую (сферическую, параболическую) форму волнового фронта отражённого излучения, а рассчитывают с учётом единственной центральной «блестящей зоны», локализованной вблизи нормали к волновому фронту, обращённой в точку приёма [3]. Термином «блестящая зона» будем обозначать локальную область в пределах апертуры объекта с НКО, на которую опирается пучок отражённого излучения, перехватываемый приёмным устройством оптического локатора. Результаты экспериментов свидетельствуют, что часто волновой фронт отражённого излучения имеет сложную форму, знак и значение его кривизны меняются от оси объекта к периферии. Это приводит к изменению конфигурации «блестящих зон», в том числе к их многосвязности. На рис. 1 показано изображение центральной и периферийной «блестящих зон». Изображение получено авторами в результате эксперимента по исследованию оптико-локационных характеристик реального объекта с НКО. Подобная конфигурация «блестящих зон» приводит к распаду единого пучка отражённого излучения на отдельные субпучки. В этом случае закономерности изменения систематических погрешностей будут отличаться от рассмотренных ранее [1–3]. Чаще всего причины серьёзной перестройки фазовой структуры отражённого излучения связаны с аберрациями фазового экрана (объектива) объекта с НКО.

Цель работы – анализ систематической погрешности измерения характеристик отражения в условиях активного лазерного зондирования малоразмерных целей (объектов) с НКО с учётом влияния сферической аберрации их объективов.

Функциональная модель объекта активной лазерной локации рассматриваемого типа представляет собой световозврататель, включающий три основных элемента [2]:

фазовый экран (объектив) с конечными значениями параксиального фокусного расстояния f , максимальной продольной аберрации Δ_a и радиуса a апертурной диафрагмы;

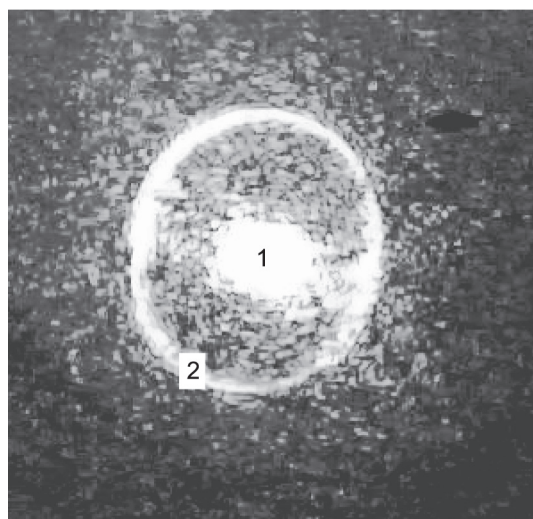


Рис. 1. Изображение центральной (1) и периферийной (2) «блестящих зон», полученное в ходе экспериментального исследования оптико-локационных характеристик реального объекта с НКО

отражающую поверхность, расположенную вблизи задней фокальной плоскости объектива радиуса a_r ;

оптический промежуток длиной l между объективом и поверхностью.

Оптическая схема объекта с НКО приведена на рис. 2.

Ограничим рассмотрение типовыми объектами, элементы которых обладают следующими свойствами:

плоская ($r \rightarrow \infty$) зеркальная ($r_k \rightarrow \infty$) отражающая поверхность расположена перпендикулярно оптической оси объектива (r – радиус кривизны отражающей поверхности, r_k – радиус когерентности излучения, отражённого поверхностью при условии облучения полностью когерентным излучением). Размеры этой поверхности существенно превышают сечение пучка, сфокусированного объективом излучения ($a_r \rightarrow \infty$);

энергетическое ослабление излучения в оптической системе отсутствует ($\tau=1$, $\rho=1$, где τ – коэффициент пропускания объектива, ρ – коэффициент отражения поверхности);

система параллельных лучей, падающих нормально плоскости апертуры объекта, в зависимости от начальной высоты h ($0 \leq h \leq a$) луча в точке H ($OH=h$) фокусируется в точке F_h , лежащей на оптической оси OZ на расстоянии $OF_h=z=f_h$ от главной точки O , где f_h – фокусное расстояние для луча, входящего в оптическую систему объекта с НКО, на высоте h (см. рис. 2). При этом огибающая семейства лучей после прохождения объектива представляет собой каустику, форма которой соответствует алгебраической кривой шестого порядка – астроиде

$$z^{2/3} + y^{2/3} = f^{2/3},$$

где y – координата в плоскости, перпендикулярной оси OZ .

Для произвольного луча разность $f-f_h$ определяет продольную абберацию, связанную, как следует из треугольника OHF_h (см. рис. 2), с начальной высотой h луча выражением

$$\Delta_h \approx h^2 / (2f). \quad (1)$$

Квадратичный характер зависимости (1) свидетельствует о том, что она описывает сферическую абберацию третьего порядка [6]. Максимальное значение продольной абберации достигается для лучей, имеющих высоту $h=a$, т. е.

$$\max_{h=a} \Delta_h = \Delta_a = a^2 / (2f).$$

Используем Δ_a в качестве параметра функциональной модели локационной цели и выразим продольную абберацию для луча с произвольной начальной высотой h как

$$\Delta_h = h^2 \Delta_a / a^2. \quad (2)$$

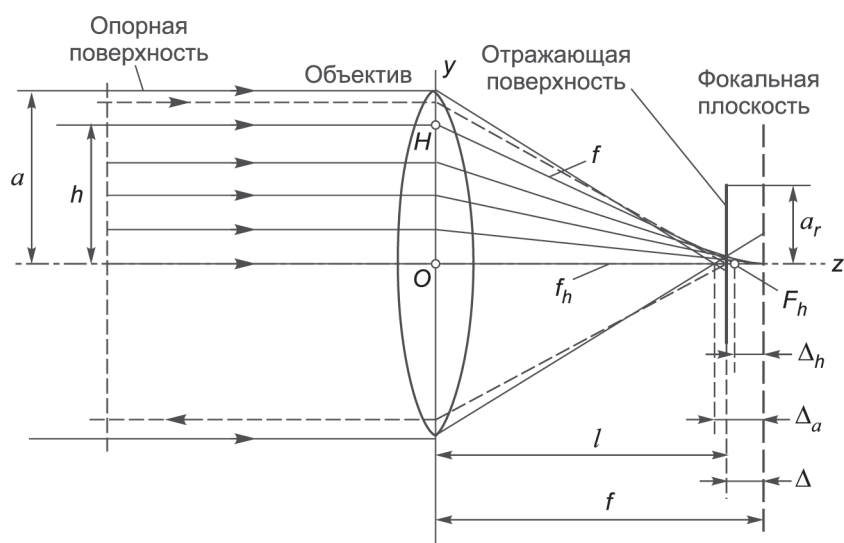


Рис. 2. Оптическая схема объекта с НКО

Расчёт систематической погрешности измерения ЭПР малоразмерного объекта с НКО проведём с использованием подхода, разработанного в [3]. Следует отметить, что заметная сферическая абберация объектива цели ($\Delta_a \gg \lambda f^2 / a^2$, где λ – длина волны зондирующего излучения), т. е. когда продольная абберация превышает продольный размер дифракционного фокального пятна, позволяет рассчитать энергетические параметры локационного сигнала в приближении геометрической оптики [7].

Используем матричный формализм геометрической оптики [8] и представим матрицу $[M]$ передачи локационной цели, полученную в [3], в модифицированном с учётом (2) виде

$$[M] = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \frac{2}{f^2} \left(\Delta + \frac{h^2 \Delta_a}{a^2} \right) & -1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $\Delta = l - f$ – смещение отражающей поверхности относительно параксиального фокуса (см. рис. 2).

Матрица (3) связывает высоты и углы наклона к оси оптической системы объекта с НКО падающего и соответствующего ему отражённого лучей в опорной плоскости $z = -f$, если $\Delta_a \ll f$.

Для анализа систематических погрешностей используем ряд допущений:

источник зондирующего монохроматического излучения с длиной волны λ является точечным и формирует в опорной плоскости, связанной с объектом, расположенной на расстоянии L , направленную сферическую волну с радиусом кривизны фронта R ;

среда на трассе распространения зондирующего и отражённого излучений однородная, поглощение отсутствует;

приёмное устройство локатора с апертурой радиуса b расположено на расстоянии L от объекта;

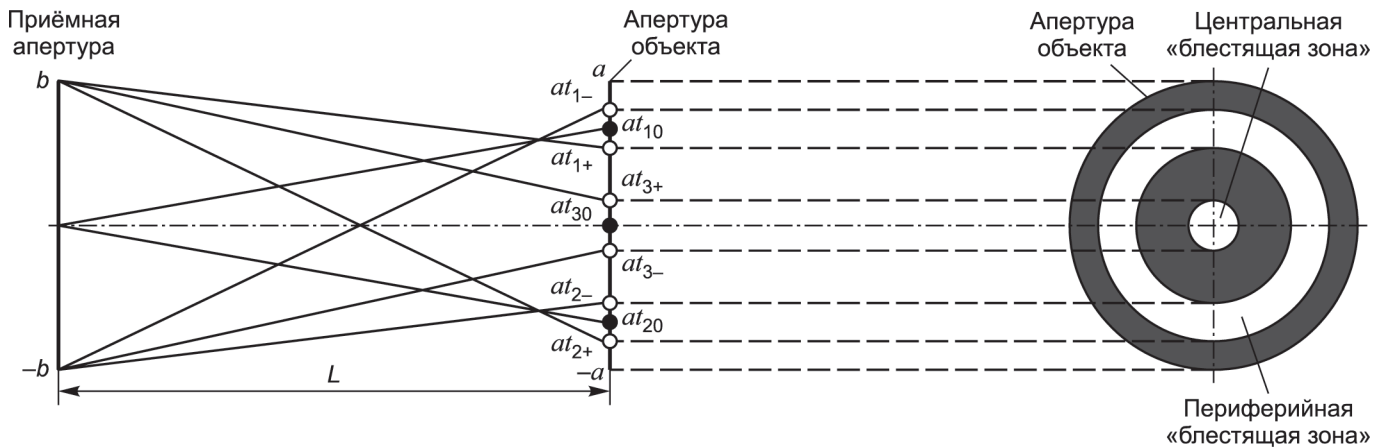


Рис. 3. Схема формирования субпучков отражённого излучения

источник зондирующего излучения, центры апертуры объекта и приёмной апертуры локатора лежат на одной оптической оси, а вся система обладает аксиальной симметрией.

Тогда векторы параметров лучей, лежащих в произвольной плоскости, которой принадлежит ось OZ, в перпендикулярных оси плоскостях источника $(h_0, \alpha_0)^T$ и приёмника $(h_L, \alpha_L)^T$ отражённого излучения связаны матричным выражением следующего вида:

$$\begin{bmatrix} h_L \\ \alpha_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ C & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ \alpha_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RC-1 & RLC-L-R \\ C & LC-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ \alpha_0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $C = C_0 + 2h^2\Delta_a/(fa)^2$, $C_0 = 2\Delta/f^2 = -R_\infty^{-1}$, R_∞ – радиус кривизны волнового фронта в параксиальной области пучка отражённого излучения при условии облучения объекта плоской волной [3].

Для точечного источника зондирующего излучения параметры луча в начальном сечении могут быть определены как $h_0=0$, $\alpha_0 = \tilde{h}/R$, где $\tilde{h}$ – высота произвольного луча, падающего на опорную плоскость $z = -f$ после распространения от источника до объекта. Матрица передачи (3) такова, что высоты падающего $\tilde{h}$ и соответствующего ему отражённого h лучей связаны как $h = -\tilde{h}$. Тогда высота луча в плоскости приёмной апертуры, расположенной на расстоянии L , будет определяться соотношением

$$h_L = -(CL - L/R - 1)h. \quad (5)$$

Ограничимся случаями сравнительно больших дистанций, когда $R \approx L \gg f$. Рассмотрим три характерных луча: $h_L=0$ – луч в пучке отражённого излучения, направленный в центр приёмной апертуры; $h_L=\pm b$ – лучи, направленные в «верхний» и «нижний» края приёмной апертуры, ограничивающие пучок принимаемого отражённого излучения.

Для таких лучей из выражения (5) с учётом (4) получим три уравнения:

$$t^3 + tp = 0; \quad t^3 + tp + q = 0; \quad t^3 + tp - q = 0, \quad (6)$$

где $t = h/a$ – относительная высота луча ($0 \leq t \leq 1$); $p = \Delta/\Delta_a - bf^3/(La^3)$, $q = -bf^3/(La^3)$. При проведении измерений на сравнительно протяжённых трассах, для которых выполняется соотношение $(p/3)^3 + (q/2)^2 \leq 0$, каждое из уравнений (6) имеет три действительных решения (в предельном случае равенства два из трёх решений совпадают). Обозначим решения первого уравнения t_{10} , t_{20} , t_{30} , решения второго – t_{1+} , t_{2+} , t_{3+} , а решения третьего – t_{1-} , t_{2-} , t_{3-} .

Решения первого уравнения $t_{10} = \sqrt{-p}$, $t_{20} = -\sqrt{-p}$, $t_{30} = 0$ определяют относительные высоты ($t = h/a$) трёх характерных лучей, выходящих из апертуры объекта и попадающих после распространения в центр приёмной апертуры локатора. Эти лучи соответствуют трём областям в плоскости апертуры, отражённое излучение из которых перехватывается приёмной апертурой. Эти области были названы «блестящими зонами». Границы областей определяют решения t_{1+} , t_{1-} (лежащие в окрестности t_{10}), решения t_{2+} , t_{2-} (в окрестности t_{20}) и решения t_{3+} , t_{3-} (в окрестности t_{30}). Схема соответствующих лучей показана на рис. 3. «Блестящие зоны» представлены при наблюдении апертуры объекта с НКО в плане. Структура построенных «блестящих зон» соответствует данным эксперимента, результаты которого показаны на рис. 1.

Таким образом, на приёмную апертуру попадает не единый пучок отражённого излучения, а два отдельных субпучка. Первый из них составляют лучи, распространяющиеся в приосевой области системы, опирающиеся в плоскости апертуры объекта на круг радиуса at_{3+} (в дальнейшем – центральную «блестящую зону» площадью $S_{\text{ц}} = \pi a^2 t_{3+}^2$). Второй субпучок опирается на кольцевую область в периферийной части апертуры объекта, которую в дальнейшем будем называть периферийной «блестящей зоной» площадью $S_{\text{п}} = 2\pi a^2 t_{10}(t_{1-} - t_{1+})$.

Решение

$$t_{3+} = -2\sqrt{-p/3} \sin(\varphi/3 - \pi/6),$$

где $\varphi = \arccos[-q/2(-3/p)^{3/2}]$, после ряда тождественных преобразований может быть приведено к виду

$$t_{3+} \approx -q(-p)^{-1}.$$

Тогда площадь центральной «блестящей зоны»

$$S_{\text{ц}} \approx \pi a^2 q^2 (-p)^{-2}. \quad (7)$$

Решения t_{1-} и t_{1+} также после ряда тождественных преобразований могут быть приведены к виду

$$t_{1-} \approx \sqrt{-p} - q(-2p)^{-1}; \quad t_{1+} \approx \sqrt{-p} + q(-2p)^{-1}.$$

Тогда площадь кольцевой периферийной «блестящей зоны»

$$S_{\text{п}} \approx 2\pi a^2 q(-p)^{1/2}. \quad (8)$$

Для оценки измеренного на трассе конечной протяжённости L значения ЭПР центральной и периферийной «блестящих зон» используем соотношения [9]:

$$\tilde{\sigma}_{\text{ц}}(L) = 4\pi L^2 E_{2\text{ц}}(L) / E_{1\text{ц}}(L); \quad (9)$$

$$\tilde{\sigma}_{\text{п}}(L) = 4\pi L^2 E_{2\text{п}}(L) / E_{1\text{п}}(L), \quad (10)$$

где $E_{1\text{ц}}(L) = \Phi_{\text{ц}} / S_{\text{ц}}$, $E_{1\text{п}}(L) = \Phi_{\text{п}} / S_{\text{п}}$ – облучённости, создаваемые зондирующим лазерным излучением на апертуре объекта соответственно в центральной и периферийной «блестящих зонах»; $E_{2\text{ц}}(L) = \Phi_{\text{ц}} / (\pi b^2)$, $E_{2\text{п}}(L) = \Phi_{\text{п}} / (\pi b^2)$ – облучённости, создаваемые субпучками отражённого излучения на приёмной апертуре локатора, опирающимися соответственно на центральную и периферийную «блестящие зоны»; $\Phi_{\text{ц}}$, $\Phi_{\text{п}}$ – потоки излучения в субпучках, опирающихся на центральную и периферийную «блестящие зоны».

Тогда с учётом (7), (9) получим

$$\tilde{\sigma}_{\text{ц}}(L) = \pi(-\Delta/f^2 + 1/L)^{-2}. \quad (11)$$

Предельное значение $\sigma_{\text{ц}} = \lim_{L \rightarrow \infty} \tilde{\sigma}_{\text{ц}}(L) = \pi f^4 / \Delta^2 = \text{const}$.

Зависимость мощности принимаемого локационного сигнала от параметров локатора и объекта, обусловленного отражением в области центральной «блестящей зоны», определяется соотношением

$$\Phi_{\text{ц}} = \Phi_0 A_2 \tilde{\sigma}_{\text{ц}}(L) / (4\pi L^4 \Omega), \quad (12)$$

где $A_2 = \pi b^2$ – площадь приёмной апертуры; $\Omega = \pi \theta^2$ – телесный угол расходимости зондирующего лазерного излучения, θ – плоский угол расходимости лазерного излучения; Φ_0 – поток зондирующего лазерного излучения.

Выражение (11) совпадает с зависимостью от дальности локации систематической погрешности измерения ЭПР объекта в случае, если его фазовый транспарант не обладает аберрацией [2].

Подобным образом подставим (8) в (10) и найдём выра-

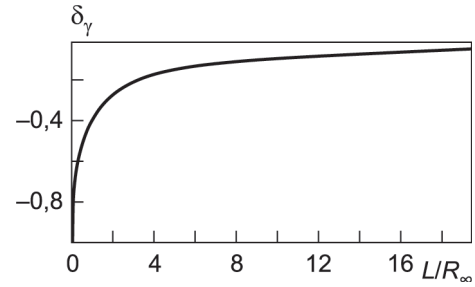


Рис. 4. Зависимость относительной систематической погрешности δ_{γ} измерения линейной плотности ЭПР объекта от относительной дальности L/R_{∞} .

жение для расчёта текущего значения ЭПР периферийной «блестящей зоны»:

$$\tilde{\sigma}_{\text{п}}(L) = \frac{8\pi L^2 a^2 (-q)(-p)^{1/2}}{b^2} = \frac{8\pi L f^3}{ba[-\Delta/\Delta_a + 2f^3/(La^2)]^{1/2}}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что с увеличением длины локационной трассы функция $\tilde{\sigma}_{\text{п}}(L)$ возрастает пропорционально L . Такая зависимость $\tilde{\sigma}_{\text{п}}(L)$ характерна для линейных объектов [5]. Зависимость от параметров локатора и объекта мощности принимаемого локационного сигнала, обусловленного отражением в области периферийной «блестящей зоны», определяется соотношением

$$\Phi_{\text{п}} = \Phi_0 A_2 \tilde{\sigma}_{\text{п}}(L) / (4\pi L^4 \Omega) = \Phi_0 A_2 \tilde{\gamma}_{\text{п}} / (2\pi^2 L^3 \theta), \quad (14)$$

где $\tilde{\gamma}_{\text{п}}(L) = \frac{4\pi f^3}{\theta ba[-\Delta/\Delta_a + 2f^3/(La^2)]^{1/2}} = \frac{\tilde{\sigma}_{\text{п}}}{2\theta L}$ – линейная плотность ЭПР периферийной «блестящей зоны».

Предел $\lim_{L \rightarrow \infty} \tilde{\gamma}_{\text{п}} = \gamma_{\text{п}} = \text{const}$, т. е.

$$\gamma_{\text{п}} = 4\pi f^3 / (\theta ba \sqrt{-\Delta/\Delta_a}). \quad (15)$$

Из выражений (12) и (14) следует, что для трасс большой протяжённости $\Phi_{\text{п}} \sim L^{-3}$, в то время как $\Phi_{\text{ц}} \sim L^{-4}$.

Значение систематической погрешности измерения ЭПР объекта с НКО на трассе протяжённостью L будет определяться действием двух факторов: кривизной волнового фронта зондирующего излучения в центре апертуры объекта и дополнительным вкладом периферийной «блестящей зоны». Тогда относительная систематическая погрешность может быть рассчитана на основе следующего выражения:

$$\begin{aligned} \delta_{\sigma}(L) &= \frac{\tilde{\sigma}_{\text{ц}}(L) + \tilde{\sigma}_{\text{п}}(L)}{\sigma_{\text{ц}}} - 1 = \\ &= [-1 + f^2/(-\Delta L)]^{-2} + \frac{8L \Delta \Delta_a^{1/2}}{fba \sqrt{-\Delta[-1 + f^2/(-\Delta L)]}} - 1. \end{aligned} \quad (16)$$

Для случая локации объекта с фазовым экраном, обеспечивающим в присутствии аберраций наилучшее изображение

удалённого точечного объекта, когда $\Delta \approx -0,75\Delta_a < 0$, выражение (16) преобразуется к следующему виду:

$$\delta_\sigma(L) = \frac{1}{[1 + 8f^3/(3La^2)]^2} + \frac{9La^3}{bf^3\sqrt{3}[1 + 8f^3/(3La^2)]^{1/2}} - 1. \quad (17)$$

Оценка длины трассы L_0 , для которой систематическая погрешность измерений, рассчитанная с использованием (17), близка к нулю, дает следующее значение:

$$L_0 \approx 2f^2/(3\Delta_a) = f^2/(2\Delta) = |R_\infty|,$$

т. е. L_0 не превышает нескольких десятков метров (например, при ЭПР объекта $\sigma_{\text{ц}} = 10^4 \text{ м}^2$ $L_0 = 28 \text{ м}$).

Проведение измерений оптико-локационных характеристик объекта на трассах протяжённостью $L > L_0$ приводит к неограниченному увеличению систематической погрешности измерения ЭПР в результате линейного увеличения относительного вклада периферийной «блестящей зоны». Это свидетельствует о том, что наиболее правильной характеристикой отражения объекта, обеспечивающей возможность её измерения с минимальной систематической погрешностью, является линейная плотность ЭПР [5], удовлетворяющая соотношению (15). Систематическая погрешность измерения этой характеристики уменьшается по мере увеличения длины трассы как

$$\delta_\gamma(L) = \tilde{\gamma}_n/\gamma_n - 1 = (1 - f^2/(\Delta L))^{-1/2} - 1.$$

Очевидно, что $\lim_{L \rightarrow \infty} \delta_\gamma = 0$. На рис. 4 приведена зависимость

δ_γ от относительной длины трассы L/R_∞ . Таким образом, в условиях активной лазерной локации аберрации объектива малоразмерной цели с НКО приводят к перестройке волнового фронта отражённого излучения, при которой локальная кривизна этого фронта изменяет значение и знак в пределах апертуры;

в области смены знака кривизны волнового фронта в дополнение к центральной образуется периферийная «блестящая зона», имеющая в случае аксиальной симметрии задачи форму кольца;

мощность составляющей отражённого сигнала, связанной с центральной «блестящей зоной», обратно пропорциональна четвёртой степени дальности локации. Вклад этой составляющей количественно характеризует такая величина, как ЭПР.

Мощность составляющей отражённого сигнала, связанной с периферийной «блестящей зоной», обратно пропорциональна третьей степени дальности локации. Вклад данной составляющей количественно характеризует другая физическая величина – линейная плотность ЭПР;

для введённых величин значения систематической погрешности их измерения неограниченно уменьшаются по мере роста длины измерительной трассы.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники, созданного на базе ВНИИОФИ и поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 14.595.21.0003 от 28.08.2017 г. (уникальный идентификатор RFMEFI59517X0003).

Литература

1. **Обнаружение** и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов / Под ред. Ю. Л. Козирацкого. М.: Радиотехника, 2015. 456 с.
2. **Попело В. Д., Проскурин Д. К., Шмаров А. Н.** Особенности активного оптического зондирования малоразмерных объектов с нелокальным частично когерентным отражением // Радиотехника. 2016. № 8. С. 38–44.
3. **Попело В. Д., Фахуртдинов И. Р.** Систематические погрешности измерения характеристик отражения малоразмерных объектов с когерентным характером отражения // Измерительная техника. 2010. № 9. С. 21–24.
4. **Попело В. Д., Фахуртдинов И. Р.** Калибровка рабочих мер для натурных измерений ЭПР объектов в оптическом диапазоне длин волн // Метрология. 2012. № 1. С. 22–34.
5. **Попело В. Д.** Оптико-локационные характеристики объектов различной размерности // Метрология. 2012. № 1. С. 22–30.
6. **Born M., Wolf E.** Principles of optics /seventh (expanded) edition. – Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 952 p.
7. **Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И.** Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.
8. **Ajoy Ghatak.** Optics. N.Y.: McGraw-Hill, 2010. 542 p.
9. **Merrill I. Skolnik.** Radar Handbook. N.Y.: The McGraw-Hill Companies, 2008. 1350 p.

Дата принятия: 21.08.2018.

Systematic errors in measurements of the LADAR characteristics of small objects with non-local coherent reflection

V. D. Popelo¹, D. K. Proskurin², I. R. Fakhurtdinov³

¹Zhukovskii and Gagarin Airforce Academy, Voronezh, Russia, e-mail: popelovd@gmail.com

²Voronezh State Technical University, Russia; e-mail: pdk@vgasu.vrn.ru

³All-Russia Research Institute of Optophysical Measurements (VNIIOFI), Moscow, Russia, e-mail: ildar-215@mail.ru

The phenomenon of phase structure adjustment of optical radiation reflected from a small object with non-local coherent reflection, the lens of which has spherical aberration, is considered. The conditions for the appearance of peripheral «brilliant zones» within the object aperture are determined and their contribution to the formation of the reflected signal on the finite length path is estimated. The systematic errors of measuring the effective scattering area of the Central «brilliant zone» and the linear density of the effective scattering area of the peripheral «brilliant zone» are estimated.

Key words: active optical location, object with non-local reflection, spherical aberration, systematic error.