

А.Н. Глушков, А.Л. Митрофанов

Эффективность работы лазерных локационных систем через локальный слой рассеивающей среды

5-й Центральный научно-исследовательский испытательный институт, г. Воронеж

Поступила в редакцию 18.10.1999 г.

Разработана инженерная методика оценки эффективности функционирования через локальный слой рассеивающей среды ЛЛС с когерентной и некогерентной обработкой информации. Проведено теоретическое исследование эффективности лазерных локационных систем при работе через локальный рассеивающий слой.

Введение

Задача исследования влияния среды распространения излучения на эффективность работы лазерных локационных систем (ЛЛС) актуальна, поскольку в большинстве случаев именно среда определяет потенциальные возможности локаторов по обнаружению и измерению параметров объектов [1]. В работах [1–3] исследовалось влияние рассеивающих слоев на структуру и мощность лазерного локационного сигнала. Задача решалась методами теории фотометрии применительно к лоцированию неограниченной ламбертовской поверхности.

Полученные результаты могут быть полезны при анализе качества функционирования лазерных локаторов с некогерентной обработкой принимаемого сигнала. При этом область их применимости определяется типом лоцируемой поверхности, а также соотношением ее размеров и диаметра поперечного сечения зондирующего излучения. Недостатком является то, что разработанный методический подход, во-первых, не учитывает дифракционные эффекты, сопровождающие распространение и рассеяние лазерного излучения, а во-вторых, он неприменим при анализе влияния рассеивающих сред на качество функционирования ЛЛС с когерентной обработкой принимаемого сигнала. Данные недостатки могут быть устранены при использовании численных методов [3, 4]. Однако их реализация требует больших вычислительных затрат, что, в свою очередь, не позволяет получать оперативные оценки влияния рассеивающих сред на характеристики ЛЛС с различной обработкой принимаемого сигнала.

Цель настоящей статьи состоит в разработке инженерной методики оценивания влияния локальных рассеивающих слоев на эффективность работы ЛЛС с приемником прямого детектирования и ЛЛС с гетеродинным приемником и исследовании эффективности их функционирования.

1. Методика оценки эффективности ЛЛС

Геометрическая схема рассматриваемой локационной задачи представлена на рис. 1. На нем приняты следующие обозначения: *A* – плоскость месторасположения ЛЛС; *B* – входная плоскость локального слоя рассеивающей среды;

C – выходная плоскость локального рассеивающего слоя; *D* – плоскость месторасположения объекта; $r_1, r_2, \eta_1, \eta_2, q_1, q_2, s_1, s_2$ – радиусы-векторы, описывающие положение точек соответственно в плоскостях *A, B, C* и *D*; $R, \rho, \eta, \omega; V, q, S, p$ – суммарные и разностные радиусы-векторы в соответствующих плоскостях; b – единичный вектор направления рассеяния; b' – единичный вектор направления падающего на элементарный рассеиватель излучения.

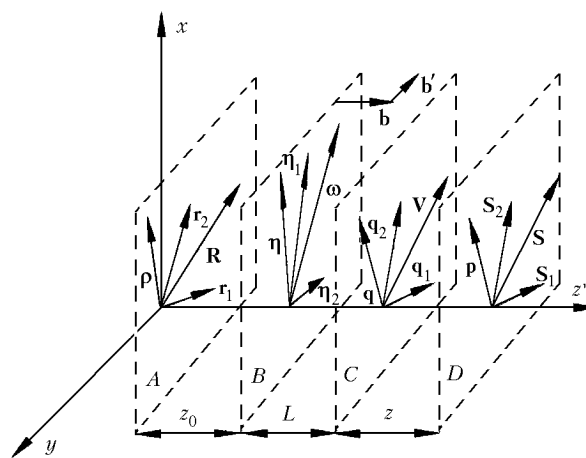


Рис. 1. Геометрическая схема локационной задачи

Основным параметром, определяющим предельные возможности локационных систем по обнаружению и точности получения координатной и некоординатной информации об удаленных объектах, является отношение сигнал-шум на выходе последетекторного фильтра приемного устройства локатора [5–7]. Указанный параметр можно найти из следующего соотношения:

$$Q_\chi = \langle |j_c^\chi(t)|^2 \rangle / \langle |j_m^\chi(t)|^2 \rangle,$$

где $\langle |j_c^\chi(t)|^2 \rangle, \langle |j_m^\chi(t)|^2 \rangle$ – средние значения квадратов сигнальной и шумовой составляющих фототока, определяемые выражениями [5, 7]:

$$\langle |j_c^k(t)|^2 \rangle = \left(\frac{\beta e}{\hbar \nu} \right)^2 \iint_{\Sigma} \Gamma_{2c}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \tau) \Gamma_{2r}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) T(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) d^2 \mathbf{r}_1 d^2 \mathbf{r}_2; \quad (1)$$

$$\langle |j_{in}^k(t)|^2 \rangle = \left[\frac{\beta e}{\hbar \nu} \int_{\Sigma} \Gamma_{2r}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2 = 0) T(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2 = 0) d^2 \mathbf{r}_1 \right] e \Delta f; \quad (2)$$

$$\langle |j_{in}^h(t)|^2 \rangle = \frac{\beta e}{\hbar \nu} [N_{\phi} \Delta \nu + 2 \hbar \nu \langle |j_c^h(t)|^2 \rangle \sqrt{\Delta f} / \beta e + P_{\text{пор}}(t) \sqrt{\Delta f} e]; \quad (3)$$

$$\langle |j_c^h(t)|^2 \rangle = \frac{\beta e}{\hbar \nu} \int_{\Sigma} \Gamma_{2r}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2 = 0) T(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2 = 0) d^2 \mathbf{r}_1, \quad (4)$$

где β – квантовая эффективность фотодетектора; e – заряд электрона; \hbar – постоянная Планка; ν – частота излучения передатчика ЛЛС; Σ – площадь приемной апертуры; $\Gamma_{2c}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \tau)$ – функция когерентности 2-го порядка (ФК) локационного оптического сигнала; $\Gamma_{2r}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ – ФК излучения гетеродина; $T(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ – функция пропускания оптического приемного тракта ЛЛС; N_{ϕ} – спектральная плотность фона; $P_{\text{пор}}(t)$ – мощность помехи обратного рассеяния; $\Delta \nu$ – ширина полосы пропускания приемного оптического канала ЛЛС; Δf – ширина полосы пропускания последетекторного фильтра; τ – временная задержка; χ – индекс, принимающий значение $\chi = \langle \text{н} \rangle$ для ЛЛС с приемником прямого детектирования (некогерентной ЛЛС (НЛЛС)) и $\chi = \langle \text{к} \rangle$ для локатора с гетеродинным приемником (когерентной ЛЛС (КЛЛС)).

Из выражений (1)–(4) видно, что для нахождения искомым величин Q_{χ} необходимо найти ФК локационного сигнала в плоскости приемной апертуры ЛЛС.

ФК локационного сигнала можно найти в виде [1, 2]:

$$\begin{aligned} \Gamma_{2c}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \tau) &= \Gamma_{2c}(\mathbf{R}, \mathbf{p}, \tau) = \int \dots \int \Gamma_{2n}(\mathbf{R}', \mathbf{p}', \tau) \times \\ &\times G_{AB}(\mathbf{R}', \mathbf{p}', \hbar, \omega) \hat{G}_{BC}(\hbar, \omega'; \mathbf{V}', \mathbf{q}') \times \\ &\times G_{CD}(\mathbf{V}', \mathbf{q}', \mathbf{S}, \mathbf{p}) U(\mathbf{S}, \mathbf{p}) G_{CD}^*(\mathbf{S}, \mathbf{p}; \mathbf{V}, \mathbf{q}) \times \\ &\times \hat{G}_{BC}^*(\mathbf{V}, \mathbf{q}; \eta, \omega) G_{AB}^*(\eta, \omega; \mathbf{R}, \mathbf{p}) d^2 R' d^2 p' d^2 \eta' \times \\ &\times d^2 \omega' d^2 V' d^2 q' d^2 S d^2 p d^2 V d^2 q d^2 \eta d^2 \omega, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Gamma_{2n}(\bullet)$ – ФК зондирующего излучения; $U(\bullet)$ – функция, описывающая отражательные характеристики объекта; $G_{AB}(\bullet)$, $G_{CD}(\bullet)$ – функции Грина, соответственно на трассе «ЛЛС – рассеивающий слой» и «рассеивающий слой – объект»; $\hat{G}_{BC}(\bullet)$ – функция передачи рассеивающего слоя; символом «*» обозначена операция комплексного сопряжения.

Функция передачи рассеивающего слоя может быть найдена путем решения уравнения переноса [9] в виде

$$\begin{aligned} \hat{G}_{BC}(\eta, \omega; \mathbf{V}, \mathbf{q}) &= \left(\frac{K}{2\pi L} \right)^2 \exp \left\{ i \frac{K}{L} (\mathbf{V} - \eta) (\mathbf{q} - \omega) - \alpha_t + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{4\pi} \int_0^L d\zeta P \left[k\omega + \frac{\zeta}{L} K(\mathbf{q} - \omega) \right] \right\}, \end{aligned}$$

где

$$P(\xi) = \iint p(\mathbf{b}) \exp \{ i \mathbf{b} \xi \} d^2 b; K = \text{Re} \{ k + 2\pi f_p(\mathbf{b}, \mathbf{b}') \rho_n / k \};$$

$k = 2\pi/\lambda$ (λ – длина волны зондирующего излучения); $\alpha_t = \rho_n \sigma_t L$ – показатель полного ослабления (оптическая плотность локального слоя); ρ_n – плотность рассеивателей; $\sigma_t = \sigma_a + \sigma_p$ – полное сечение ослабления, σ_a – сечение поглощения, σ_p – сечение рассеяния; $p(\bullet) = \frac{4\pi}{\sigma_t} |f_p(\mathbf{b}, \mathbf{b}')|^2$,

$f_p(\mathbf{b}, \mathbf{b}')$ – индикатриса рассеяния элементарного рассеивателя. Для сферических рассеивателей, с учетом

$p(\mathbf{b}, \mathbf{b}') \approx \frac{\alpha \sigma_p}{\pi \sigma_t} \exp \{ -\alpha \theta^2 \}$ [8], функция $\hat{G}_{BC}(\bullet)$ может быть определена выражением

$$\begin{aligned} \hat{G}_{BC}(\eta, \omega; \mathbf{V}, \mathbf{q}) &= \left(\frac{k}{2\pi L} \right)^2 \exp \left\{ i \frac{k}{L} (\mathbf{V} - \eta) (\mathbf{q} - \omega) - \alpha_t + \right. \\ &+ \left. \rho_n \sigma_p \int_0^L d\zeta \exp \left\{ - \frac{[\omega - \zeta/L (\mathbf{q} - \omega)]^2}{4s^2} \right\} \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где θ – угол между векторами \mathbf{b} и \mathbf{b}' ; $\alpha \approx 2,66 (d/\lambda)^2$; d – диаметр рассеивателя ($d \gg \lambda$); $\sigma_p \approx 2\pi (d/2)^2$; $s^2 \approx 10,64 d^2/\pi$.

Для получения аналитических выражений, определяющих Q_k и Q_n в явном виде, воспользуемся следующей аппроксимацией функции передачи рассеивающего слоя:

$$\begin{aligned} \hat{G}_{BC}(\eta, \omega; \mathbf{V}, \mathbf{q}) &= \left(\frac{k}{2\pi L} \right)^2 \exp \left\{ i \frac{k}{L} (\mathbf{V} - \eta) (\mathbf{q} - \omega) - \alpha_t \right\} \times \\ &\times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\alpha_p)^n}{n!} \exp \left\{ -n \frac{(\mathbf{q} - \omega)^2}{4s^2} \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

а функции $\Gamma_{2n}(\bullet)$, $G_{AB}(\bullet)$ и $T(\bullet)$ определим гауссовскими моделями, предложенными в [1, 2].

Мощность помехи обратного рассеяния от локального слоя для моностатической коаксиальной схемы локации по аналогии с [2] может быть найдена из следующего выражения:

$$\begin{aligned} P_{\text{пор}}(t) &= \int_{z_0}^{z_0+L} d\zeta \int d\eta \sigma_p(\zeta) f_p(\pi, \zeta) T_a^2 \Gamma_{2n}(z_0, \eta, 0, 0) \Gamma_{2n}(z_0+L, \eta, 0, 0) \times \\ &\times f^2(t - 2\zeta/c), \end{aligned} \quad (8)$$

где $f_p(\pi, z)$ – индикатриса обратного рассеяния;

$$T_a = \exp \{ -\alpha_t L \}; \Gamma_{2n}(z_0+L, \eta, \omega) = \int T(\mathbf{R}, 0) G_{AB}(\mathbf{R}, \mathbf{p}; \eta, \omega) d^2 R;$$

$f(t)$ – огибающая импульса зондирующего излучения; c – скорость света.

Выражение (8) с учетом принятых моделей, а также

$$f(t) = 2/\sqrt{\pi} \exp \{ -4t^2/\tau_n^2 \},$$

где τ_n – длительность зондирующего импульса, принимает следующий вид:

$$P_{\text{пор}}(t) = U_0^2 \frac{\pi a_n^2 \sigma_p \rho_n f_p(\pi) T_a^2 a_n^2 \tau_n c}{1 + a_n^2/a_3^2} \frac{2}{a_3} \sqrt{\pi} \times$$

$$\times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{2(z_0 + L)}{c\tau_n} + \frac{t}{\tau_n} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{2z_0}{c\tau_n} + \frac{t}{\tau_n} \right) \right],$$

где a_3 – эффективный радиус пучка зондирующего излучения на входе в слой; $\operatorname{erf}(\bullet)$ – функция ошибок [10].

Анализ влияния локального слоя рассеивающей среды на характеристики ЛЛС удобно производить по относительным показателям $\tilde{\mu}_k, \tilde{\mu}_n$, нормированным на величину $\exp\{-2\alpha_n L\}$ (α_n – показатель поглощения):

$$\tilde{\mu}_n = \frac{Q_n^a}{Q_n^0} = \frac{P_n^a 1/Q_n^0}{P_n^0 1/Q_n^0 + P_{\text{пор}}/P_n^a} \exp\{2\alpha_n L\};$$

$$\tilde{\mu}_k = \frac{Q_k^a}{Q_k^0} = \frac{P_k^a}{P_k^0} \exp\{2\alpha_n L\},$$

где $Q_n^a, Q_n^0, Q_k^a, Q_k^0$ и $P_n^a, P_n^0, P_k^a, P_k^0$ – соответственно отношения сигнал-шум и мощности принятого сигнала при когерентной

и некогерентной обработке при наличии «а» и отсутствии рассеивающего слоя «0».

Результаты расчетов сведены в таблицу. При этом отражательные характеристики лоцируемого объекта задавались в соответствии с известными моделями точечного, зеркального и диффузного отражателей [1, 5]. При проведении расчетов в качестве t выбрано время прихода отраженного от цели импульса, рассчитываемое по формуле $t = 2(z_0 + L + z)/c$.

Полученные выражения позволяют с единых теоретических позиций проводить анализ влияния локальных рассеивающих сред на эффективность работы ЛЛС с когерентной и некогерентной обработкой принимаемого сигнала. При этом они позволяют учесть основные параметры приемопередаточных трактов локаторов, рассеивающие свойства объектов локации, а также дифракционные эффекты, сопровождающие формирование и распространение локационных сигналов. Представляет интерес сравнение результатов, полученных с использованием разработанной методики, с известными результатами исследования влияния рассеивающих слоев на характеристики локационных сигналов. На рис. 2 представлены результаты расчетов нормированной мощности локационного сигнала, принимаемого детекторным приемником, от диффузной поверхности.

Модель лоцируемого объекта	Показатель эффективности ЛЛС с некогерентной обработкой сигнала	Показатель эффективности ЛЛС с когерентной обработкой сигнала
Точечный отражатель $U(\mathbf{r}) = 2\pi \frac{V_z}{k^2} \delta(\mathbf{r})$	$\mu_n = \frac{\sum_{n,m=0}^{\infty} \frac{\alpha_p^n \alpha_p^m}{n! m!} a_{\text{эб}}^{-2} \frac{\Omega_z^2}{\Omega_3^2} v_5^{-1}}{a_{\text{эб}0}^{-2} \frac{\Omega_{z0}^2}{\Omega_3^2} v_{50}^{-1}} \Psi_1 T_a^2$	$\mu_k = \frac{\sum_{n,m=0}^{\infty} a_{\text{эи}0}^{-2} a_{\text{эи}0}^{-2} \frac{\alpha_p^n \alpha_p^m}{n! m!}}{a_{\text{эи}0}^{-2} a_{\text{эи}0}^{-2}} T_a^2$
Диффузный объект $U(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \frac{4\pi}{k^2} V_d^2 \times$ $\times \exp\left\{-\frac{r_1^2 + r_2^2}{2a_d^2}\right\} \times$ $\times \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)$	$\mu_n = \frac{\sum_{n,m=0}^{\infty} \frac{\alpha_p^n \alpha_p^m}{n! m!} \left(1 + a_{\text{эб}}^2 \frac{\Omega_z^2}{\Omega_3^2} \frac{v_3}{a_d^2}\right)^{-1}}{\left(1 + a_{\text{эб}0}^2 \frac{\Omega_{z0}^2}{\Omega_3^2} \frac{v_{30}}{a_d^2}\right)^{-1}} \Psi_2 T_a^2$	$\mu_k = \frac{\sum_{n,m=0}^{\infty} a_{\text{эи}0}^{-2} \frac{\alpha_p^n \alpha_p^m}{n! m!} \left(1 + \frac{a_{\text{эи}0}^2}{a_d^2} + \frac{a_{\text{эи}0}^2}{a_{\text{эи}0}^2}\right)^{-1}}{a_{\text{эи}0}^{-2} \left(1 + \frac{a_{\text{эи}0}^2}{a_d^2} + \frac{a_{\text{эи}0}^2}{a_{\text{эи}0}^2}\right)^{-1}} T_a^2$
Зеркальный отражатель $U(\mathbf{r}) = V_3 \exp\left\{-\frac{r^2}{2a_3^2}\right\} \times$ $\times \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_n)$	$\mu_n = \frac{\sum_{n,m=0}^{\infty} \frac{\alpha_p^n \alpha_p^m}{n! m!} a_{\text{эб}}^2 v_9^{-1} v_{10}^{-1}}{a_{\text{эб}}^2 v_9^{-1} v_{10}^{-1}} \Psi_3 T_a^2$	$\mu_k = \frac{\sum_{n,m=0}^{\infty} \frac{\alpha_p^n \alpha_p^m}{n! m!} \frac{a_{\text{эи}0}^2}{a_{\text{эк}}^2} v_7^{-1} v_8^{-1}}{\frac{a_{\text{эи}0}^2}{a_{\text{эк}0}^2} v_{70}^{-1} v_{80}^{-1}} T_a^2$

Примечания:

1. Индекс «0» соответствует отсутствию локального рассеивающего слоя.
2. В таблице приняты следующие обозначения:

$$v_{10} = \Omega_z^2 \frac{v_4}{v_5} + \frac{mL a_{\text{эб}}^2}{s^2 (z_0 + z + L)^2} + \frac{k^2 a_n^2 a_{\text{эб}}^2}{(z_0 + z + L)^2} + \Omega_3^2 \frac{v_5}{v_9} \left(\frac{v_6}{v_5} + \Omega_z^{-1} \frac{ka_{\text{эб}}^2}{(z_0 + z + L)^2} \right)^2, \quad v_9 = \left(1 + \frac{a_{\text{эб}}^2 v_5 \Omega_z^2}{a_3^2 \Omega_z^2} \right)^2,$$

$$v_8 = 1 + \frac{a_{\text{эк}}^2}{a_3^2} + \frac{a_{\text{эк}}^2}{a_{\text{эи}0}^2} + \left[v_3 + v_{3n} \frac{a_{\text{эи}}^2}{a_{\text{эи}0}^2} \right]^2 \frac{a_{\text{эк}}^2}{a_{\text{эи}}^2} v_7^{-1}, \quad v_7 = 1 + \frac{a_{\text{эи}}^2}{a_3^2} + \frac{a_{\text{эи}}^2}{a_{\text{эи}0}^2},$$

$$v_6 = v_4 + v_3 (v_3 + \Omega_z/\Omega_3), \quad v_{6n} = v_{4n} + v_{3n} (v_{3n} + \Omega_{zn}/\Omega_{3n}), \quad v_5 = v_4 + (v_3 + \Omega_z/\Omega_3)^2, \quad v_{5n} = v_{4n} + (v_{3n} + \Omega_{zn}/\Omega_{3n})^2,$$

$$v_4 = v_2 + n \left(\frac{a_{\text{эб}}^2}{s^2} \right) \Omega_3^{-2}, \quad v_{4n} = v_{2n} + m \left(\frac{a_{\text{эб}}^2}{s^2} \right) \Omega_{3n}^{-2},$$

$$v_3 = (1 + \gamma/\Omega_3) \gamma \Omega_3^{-1} + (a_3/\rho_a)^2 \Omega_3^{-2}, \quad v_{3n} = (1 + \gamma_n/\Omega_{3n}) \gamma_n \Omega_{3n}^{-1} + (a_{3n}/\rho_{an})^2 \Omega_{3n}^{-2},$$

$$v_2 = \Omega_3^{-2} \left\{ (a_3/\rho_a)^2 + n \left(\frac{a_3}{s} \right)^2 [1 - 2\gamma \Omega_3^{-1} - n \left(\frac{a_3}{s} \right)^2 \Omega_3^{-2}] \right\}, \quad v_{2n} = \Omega_{3n}^{-2} \left\{ (a_{3n}/\rho_{an})^2 + m \left(\frac{a_{3n}}{s} \right)^2 [1 - 2\gamma_n \Omega_{3n}^{-1} - m \left(\frac{a_{3n}}{s} \right)^2 \Omega_{3n}^{-2}] \right\},$$

$$v_1 = (1 - \gamma/\Omega_3)^2 + (a_3/\rho_a)^2 \Omega_3^{-2} + n \left(\frac{a_3}{s} \right)^2 \Omega_3^{-2}, \quad v_{1n} = (1 - \gamma_n/\Omega_{3n})^2 + (a_{3n}/\rho_{an})^2 \Omega_{3n}^{-2} + m \left(\frac{a_{3n}}{s} \right)^2 \Omega_{3n}^{-2},$$

$$\begin{aligned} \Omega_3 &= ka_3^2/L, \quad \Omega_z = ka_{3n}^2/z, \quad \Omega_{3n} = ka_{3n}^2/L; \quad \Omega_z = ka_{3n}^2/z; \quad a_{3n}^2 = a_3^2 v_1; \quad a_{3n}^2 = a_{3n}^2 v_{1n}, \\ a_3^2 &= a_n^2 [1 + \Omega_n^{-2} (1 + a_n^2/a_k^2)], \quad a_{3n}^2 = a_n^2 + \Omega_n^{-2} a_n^2; \\ \rho_a^2 &= a_3^2 [1 + a_n^2/a_k^2]; \quad \gamma = \Omega_n^{-1} (1 + a_n^2/a_k^2); \quad \rho_{an}^2 = a_{3n}^2; \quad \gamma_n = \Omega_n^{-1}; \\ \Omega_n &= \frac{k a_n^2}{z_0}; \quad a_{3n}^2 = \frac{a_{3n}^2 v_5 \Omega_3^2}{\Omega_z^2}; \quad \Omega_{3n} = \frac{k a_n^2}{z_0}; \quad a_{3n}^2 = \frac{a_{3n}^2 v_{5n} \Omega_{3n}^2}{\Omega_{zn}^2}; \quad a_{3n}^2 = \frac{a_{3n}^2 v_5}{\Omega_z^2 v_4}; \quad v_3 = \frac{\Omega_3 v_6}{\Omega_z}; \quad a_{3n}^2 = \frac{a_{3n}^2 v_{5n}}{\Omega_z^2 v_{4n}}; \quad v_{3n} = \frac{\Omega_{3n} v_{6n}}{\Omega_{zn}}; \\ \Psi_1 &= \frac{1/Q_n^0}{1/Q_n^0 + \frac{V_t^2 \Omega_{z0}^2 (1 + a_n^2/a_{z0}^2) a_{z0}^2 \sqrt{\pi}}{(2\pi)^4 (z_0 + z + L)^2 k^2 a_{3n}^2 \Omega_{z0}^2 v_{50} \sigma_p \rho_n f_p (\pi) c \tau_n} E}, \quad \Psi_2 = \frac{1/Q_n^0}{1/Q_n^0 + \frac{V_n^2 (1 + a_n^2/a_{z0}^2) v_9^{-1} a_{z0}^2}{(2\pi)^4 (z_0 + z + L)^2 \sigma_p \rho_n f_p (\pi) c \tau_n} E}; \\ \Psi_3 &= \frac{1/Q_n^0}{1/Q_n^0 + \frac{V_3^2 (1 + a_n^2/a_{z0}^2) v_9^{-1} a_{z0}^2}{\pi \lambda^2 (z_0 + z + L)^2 \sigma_p \rho_n f_p (\pi) c \tau_n} E}; \quad E = \operatorname{erf}\left(\frac{2(z_0 + L)}{c \tau_n} + \frac{t_1}{\tau_n}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{2z_0}{c \tau_n} + \frac{t_1}{\tau_n}\right); \end{aligned}$$

a_n – эффективный радиус передатчика ЛЛС; a_k – радиус когерентности зондирующего излучения; n, m – индексы суммирования.

3. Расчеты выполнены для коллимированного излучения.

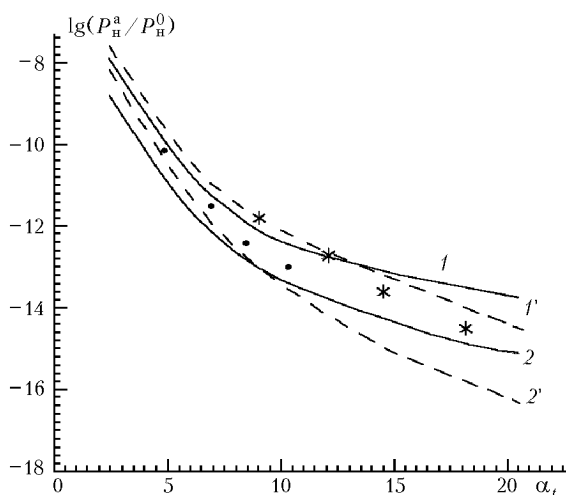


Рис. 2. Зависимости нормированной мощности принимаемого сигнала от расстояния между источником и лоцируемой диффузной поверхностью: 1, 2 – результаты расчета по предлагаемой методике; 1', 2' – результаты исследований [2]; «*», «•» – экспериментальные данные [11]. Исходные данные: 1, 1', «*» – $\varphi_n \alpha_t = 2,8 \cdot 10^{-3}$; $\varphi_n \alpha_t = 1,9 \cdot 10^{-2}$; $\alpha_p/\alpha_t = 0,8$; 2, 2', «•» – $\varphi_n \alpha_t = 1,6 \cdot 10^{-3}$; $\varphi_n \alpha_t = 1,0 \cdot 10^{-2}$; $\alpha_p/\alpha_t = 0,78$ (φ_n, φ_n – угловые размеры источника и приемника излучения соответственно)

Зависимости 1, 2 рассчитаны с использованием разработанной методики; зависимости 1', 2' и экспериментальные результаты получены в работах [2, 11]. Исходные данные, при которых получены приведенные зависимости, представлены в подрисуночной подписи. На основе этих результатов можно сделать вывод, что разработанная методика позволит получать зависимости, имеющие хорошее качественное и удовлетворительное количественное совпадение с известными результатами исследований. Количественное расхождение между графиками 1, 2 и 1', 2' может быть объяснено следующим. Графики зависимостей 1' и 2' получены в [2] с использованием диффузионного варианта малоуглового приближения. В нем индикатриса рассеяния частиц полагается изотропной при малых углах рассеяния.

В основе разработанной методики лежит теория рассеяния на сферических частицах большого диаметра. Следует отметить, что при этом одинаковость размеров всех частиц

не ограничивает общность полученных соотношений, поскольку случай разноразмерности частиц может быть учтен путем усреднения частиц по размерам [9]. Проведенный анализ дает основание заключить, что разработанная методика может быть использована при получении инженерных оценок влияния локальных рассеивающих слоев на эффективность излучения по мере уменьшения толщины слоя и отношения d/λ . Насыщение зависимости показателя эффективности ЛЛС от d/λ объясняется тем, что сечение рассеяния частицы при больших значениях параметра Ми стремится к своему предельному значению [13]. В этом случае независимо от типа отражателя эффект «кальки» проявляется при нахождении рассеивающего слоя вблизи объекта. Этот результат следует из теоремы Ван-Циттера–Цернике [13]: степень когерентности локационного сигнала растет по мере увеличения расстояния от вторичного источника излучения. Работа ЛЛС с когерентной и некогерентной обработкой принимаемого сигнала.

2. Результаты оценки эффективности ЛЛС

Исследования показателей μ_n, μ_k выполнены для случая лоцирования точечного, зеркального и диффузного отражателей в зависимости от характеристик рассеивающего слоя и дифракционных параметров приемопередаточного тракта локатора. Полученные результаты представлены на рис. 3–9.

На рис. 3–5, 7, 8 показаны зависимости показателя эффективности работы ЛЛС от положения рассеивающего слоя. Из рисунков видно, что при лоцировании точечного и диффузного отражателей, а для КЛЛС еще и при лоцировании зеркального отражателя, наглядно проявляется эффект «кальки» [12], т.е. влияние слоя на величину μ_k тем меньше, чем ближе слой расположен к объекту. Для ЛЛС эффект выражен тем отчетливее, чем меньше апертура приемника ЛЛС и чем меньше геометрическая толщина рассеивающего слоя при неизменной оптической его плотности. При лоцировании зеркального отражателя эффект «кальки» проявляется при расположении рассеивающего слоя вблизи локатора. Из полученных результатов также видно, что рассеивающий слой оказывает тем большее влияние на показатель эффективности ЛЛС, чем больше отношение d/λ . При $d/\lambda \geq 10$ зависимость $\mu_n = f(d/\lambda)$ входит в насыщение.

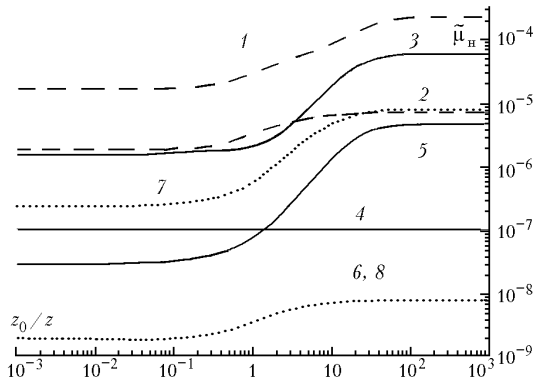


Рис. 3. Зависимости $\tilde{\mu}_n$ от положения рассеивающего слоя при лоцировании диффузного отражателя и при $a_w/a_k = 0$; $R/F = 0$. 1–6 – $d/\lambda = 3$; 7, 8 – $d/\lambda = 1$; 1, 2, 5, 6, 7, 8 – $a_w/a_n = 1$; 3, 4 – $a_w/a_n = 0,1$; 1–8 – $\alpha_p = 1,41$; 1, 3, 5, 7 – $L = 10$ м; 2, 4, 6, 8 – $L = 100$ м

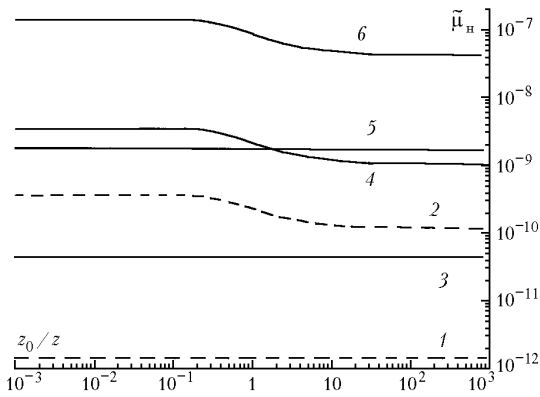


Рис. 4. Зависимости $\tilde{\mu}_n$ от положения рассеивающего слоя при лоцировании зеркального отражателя и при $a_w/a_k = 0$; $R/F = 0$. 1, 2 – $d/\lambda = 1$; 3, 4, 5, 6 – $d/\lambda = 3$; 1, 2 – $a_w/a_n = 1$; 3, 4, 5, 6 – $a_w/a_n = 0,1$; 1–6 – $\alpha_p = 14,1$; 1, 3, 5 – $L = 10$ м; 2, 4, 6 – $L = 100$ м

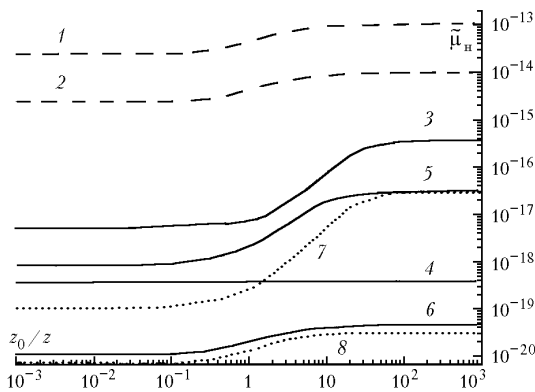


Рис. 5. Зависимости $\tilde{\mu}_n$ от положения рассеивающего слоя при лоцировании точечного отражателя и при $a_w/a_k = 0$; $R/F = 0$. 1, 2, 3, 4, 7, 8 – $d/\lambda = 3$; 5, 6 – $d/\lambda = 1$; 1, 2, 5 – 8 – $a_w/a_n = 1$; 3, 4 – $a_w/a_n = 0,1$; 1–8 – $\alpha_p = 1,41$; 1, 3, 5, 7 – $L = 10$ м; 2, 4, 6, 8 – $L = 100$ м

Первопричиной возникновения данных эффектов является рост не рассеянной слоем составляющей излучения по мере уменьшения толщины слоя и отношения d/λ . Насыщение зависимости показателя эффективности НЛЛС от d/λ объясняется тем, что сечение рассеяния частицы при больших значениях параметра Ми стремится к своему предельному значению [13]. В этом случае независимо от типа

отражателя эффект «кальки» проявляется при нахождении рассеивающего слоя вблизи объекта. Этот результат следует из теоремы Ван-Циттера–Цернике [13]: степень когерентности локационного сигнала растет по мере увеличения расстояния от вторичного источника излучения.

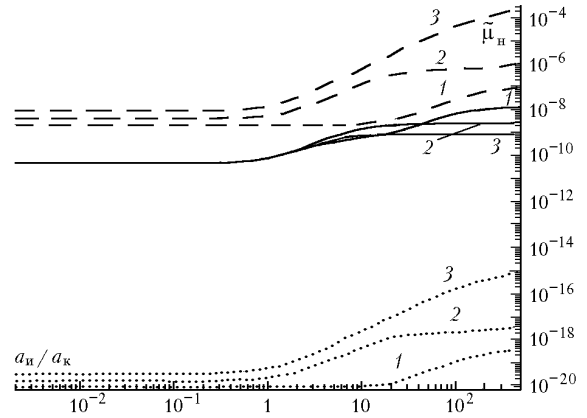


Рис. 6. Зависимости $\tilde{\mu}_n$ от начального радиуса пространственной когерентности источника при лоцировании зеркального (—), точечного (····) и диффузного (---) отражателей и при $d/\lambda = 3$; $a_w/a_n = 1$; $R/F = 0$; $\alpha_p = 14,1$; $L = 100$ м; $R = 4100$ м; $z_0 = 100$ м (1); 2000 м (2); 3900 м (3)

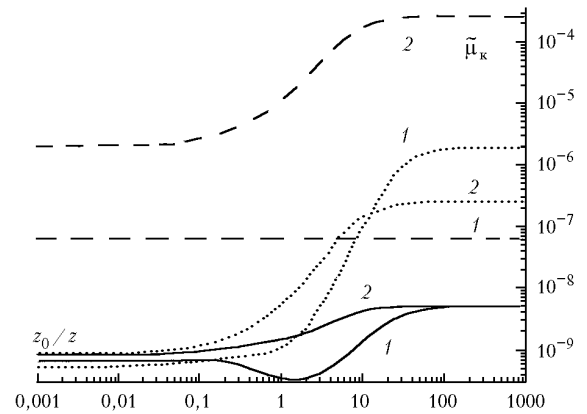


Рис. 7. Зависимости $\tilde{\mu}_k$ от от расположения рассеивающего слоя при лоцировании зеркального (—), точечного (····) и диффузного (---) отражателей при $\alpha_p = 14,1$; $d/\lambda = 3$; $L = 10$ м; $a_w/a_k = 0$; $R/F = 0$ и $R = 4100$ м (1); 2100 м (2)

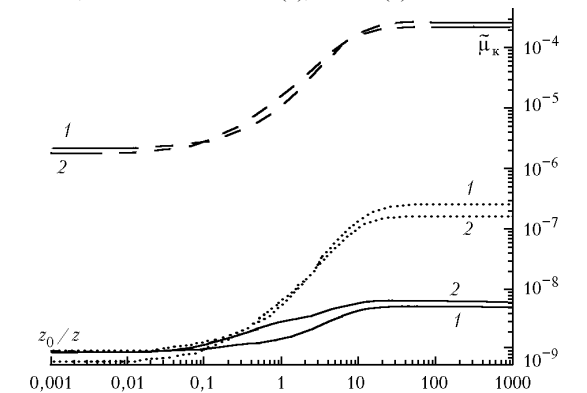


Рис. 8. Зависимости $\tilde{\mu}_k$ от расположения рассеивающего слоя при лоцировании зеркального (—), точечного (····) и диффузного (---) отражателей при $\alpha_p = 14,1$; $d/\lambda = 3$; $a_w/a_k = 0$; $L = 100$ м; $R = 2100$ м; $R/F = 0$ (1); 1 (2)

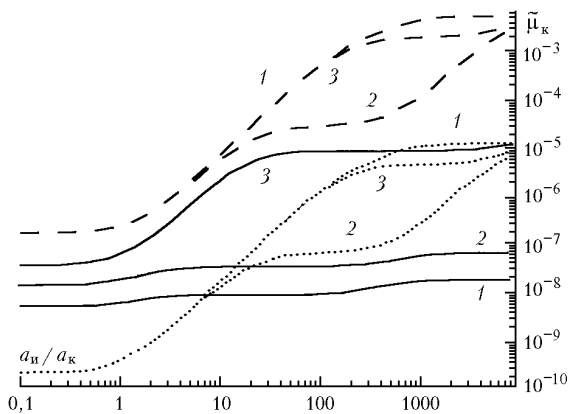


Рис. 9. Зависимости $\tilde{\mu}_k$ от начального радиуса пространственной когерентности источника при лоцировании зеркального (—), точечного (---) и диффузного (· · ·) отражателей при $d/\lambda = 3$; $a_n/a_k = 1$; $R/F = 0$; $\alpha_p = 14,1$; $L = 100$ м; $R = 4100$ м; $z_0 = 100$ м (1); 2000 м (2); 3900 м (3)

На рис. 6, 9 представлены результаты расчетов величины μ_n и μ_k в зависимости от когерентных свойств зондирующего излучения, а также рассеивающих свойств объекта локации. В результате расчетов установлено, что независимо от типа отражателя значение показателей эффективности растет по мере увеличения отношения a_n/a_k . Это связано с тем, что характеристики излучения на выходе рассеивающего слоя мало зависят от когерентных свойств излучения на входе в слой. Немонотонный характер зависимостей $\mu_k = \mu_k(a_n/a_k)$ обусловлен конкуренцией дифракционных эффектов – возрастания радиуса когерентности по мере распространения излучения в свободном пространстве и потери пространственной когерентности в рассеивающем слое. Это явление качественно подобно немонотонному характеру зависимости радиуса пространственной когерентности от начального радиуса когерентности источника в турбулентной атмосфере [4].

Заключение

Итак, с использованием метода Гюйгенса–Кирхгофа и решения уравнения переноса излучения в малоугловом приближении нами разработана инженерная методика оценивания влияния локальных рассеивающих слоев на эффективность работы ЛЛС с приемником прямого детектирования и гетеродинным приемником.

Сравнение результатов, полученных с помощью этой методики, с результатами, полученными как эксперимен-

тально, так и с использованием диффузионного варианта малоуглового приближения, показало, что такая методика позволяет получать зависимости, имеющие хорошее качественное соответствие с известными результатами исследований.

Установлено, что в целом эффективность работы НЛЛС через локальный рассеивающий слой ниже, чем у КЛЛС, что связано с влиянием помехи обратного рассеяния на эффективность НЛЛС.

В результате проведенного исследования эффективности работы ЛЛС через локальные рассеивающие слои с малой оптической плотностью установлено, что эффективность ЛЛС в основном определяется энергетическим ослаблением в слое. С ростом оптической плотности слоя возрастает значимость дифракционных эффектов, которые проявляются наиболее отчетливо при лоцировании зеркальных отражателей.

1. *Сигналы и помехи в лазерной локации* / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, Г.М. Креков и др. / Под ред. В.Е. Зуева. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
2. *Элементы теории светорассеяния и оптическая локации* / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, Г.Г. Матвиенко и др. / Под ред. В.М. Орлова. Новосибирск: Наука, 1982. 225 с.
3. *Зуев В.Е., Кабанов М.В.* Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 254 с.
4. *Ковалев В.А.* Видимость в атмосфере и ее определение. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 215 с.
5. *Лазерная локации* / И.Н. Матвеев, В.В. Протопопов, И.Н. Троицкий и др. / Под ред. Н.Д. Устинова. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.
6. *Вопросы статистической теории радиолокации* / П.А. Бакут, И.А. Большаков, Б.М. Герасимов и др. / Под ред. Г.П. Тартаковского. М.: Сов. радио, 1963. Т. 1. 424 с.
7. *Протопопов В.В., Устинов Н.Д.* Лазерное гетеродинирование. М.: Наука, 1985. 200 с.
8. *Исмару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах: В 2 ч. Однократное рассеяние и теория переноса. М.: Мир, 1981. Ч. 1. 280 с.
9. *Исмару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах: В 2 ч. Многократное рассеяние... М.: Мир, 1981. Ч. 2. 318 с.
10. *Справочник по специальным функциям* / Под ред. М. Абрамовича, И. Сиган: Пер. с англ. / Под ред. В.А. Диткина. М.: Наука, 1979.
11. *Иванов А.П., Калинин И.И., Скрелин А.Л., Шербаф И.Д.* // Изучение пространственно-временной структуры световых импульсов в водной среде // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1972. № 8. С. 884–890.
12. *Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л.* Перенос изображения в рассеивающей среде. М.: Наука и техника, 1985. 327 с.
13. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. 823 с.

Glushkov A.N., Mitrofanov A.L. Effectiveness of operation of laser location systems through localized scattering layer.

Efficiency of laser location systems operation through local scattering layer was estimated using the developed engineering procedure.