

## МОЩНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ НЕРОВНОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЗАМУТНЕННОЙ АТМОСФЕРЫ

М.Л. Белов<sup>1</sup>

belov@bmstu.ru

В.А. Городничев<sup>1</sup>

gorod@bmstu.ru

В.А. Алехин<sup>2</sup>

alekhin@mirea.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Московский технологический университет (МИРЭА), Москва,  
Российская Федерация

---

### Аннотация

Исследована мощность лазерного локационного сигнала, отраженного от неровной земной поверхности в условиях оптически плотной (замутненной) атмосферы. Рассмотрена общая схема бистатической локации, когда источник и приемник локатора разнесены в пространстве. Получено аналитическое выражение для мощности лазерного локационного сигнала, регистрируемого приемником локатора при облучении узким лазерным пучком в сильно рассеивающей среде случайно-неровной поверхности с локальной индикатрисой отражения, имеющей как диффузную (широкую в угловом смысле), так и квазизеркальную (узкую в угловом смысле) компоненты. Полученная формула позволяет правильно описывать зависимость мощности лазерного локационного сигнала от дальности до поверхности как в прозрачной земной атмосфере (на начальном участке трассы локации), так и в оптически плотной земной атмосфере (на больших расстояниях от лазерного локатора до поверхности)

### Ключевые слова

*Мощность локационного сигнала, неровная поверхность, замутненная атмосфера*

Поступила в редакцию 09.12.2016  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

**Введение.** В большинстве работ, посвященных рассеянию волновых пучков на неровных земных поверхностях, используется модель идеально отражающей случайно-неровной поверхности (см. работы [1–4]).

В оптическом диапазоне такая модель применяется для задачи рассеяния лазерных пучков на морской поверхности [5, 6]. Для поверхности суши более адекватными являются модели диффузной поверхности (с характерными широкими индикатрисами отражения) [6–9]. Более общая модель поверхности имеет комбинированную индикатрису отражения (имеющую как широкую в угловом смысле, так и зеркальную или квазизеркальную компоненты) [9–12].

Однако в большинстве работ задача нахождения мощности лазерного локационного сигнала от земной поверхности рассматривалась в прозрачной земной атмосфере, когда многократное рассеяние в атмосфере не искажает лазерный пучок.

В настоящей работе в общей схеме локации, когда источник и приемник разнесены в пространстве, рассмотрена задача определения мощности, регистрируемой приемником, при облучении узким лазерным пучком случайно-неровной поверхности с комбинированной индикатрисой отражения локальных участков в рассеивающей аэрозольной атмосфере, в которой многократное рассеяние в атмосфере может существенно искажать лазерный пучок.

**Постановка задачи.** Пусть трехмерная случайно-неровная поверхность  $S$  облучается узким лазерным пучком. Источник и приемник в общем случае разнесены в пространстве (рис. 1).

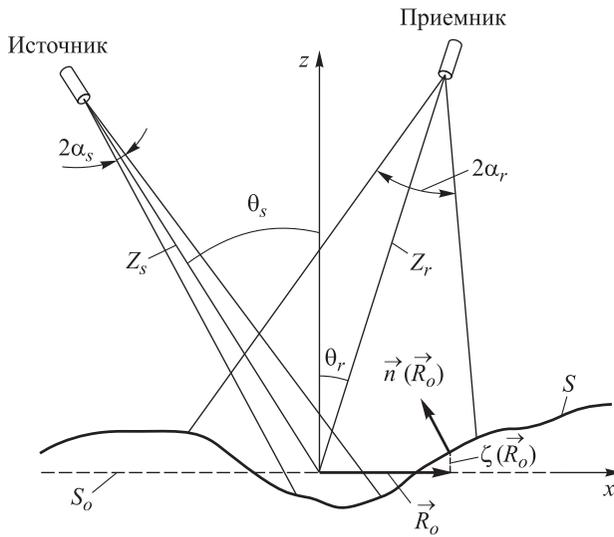


Рис. 1. Схема локации

Интегральное выражение для мощности  $P$ , регистрируемой приемником в рассеивающей среде для общей схемы бистатической локации, может быть получено (в отсутствие затенений одних элементов лоцируемой поверхности  $S$  другими) с использованием теоремы взаимности для функции Грина и введением понятия фиктивного источника с параметрами приемника [6]:

$$P = \int_S d\vec{R} \int_{2\pi} d\Omega(\vec{m}) L_r(\vec{R}, \vec{m}) L_{ref}(\vec{R}, \vec{m}) \cos \theta, \quad (1)$$

где  $L_{ref}(\vec{R}, \vec{m})$  — яркость отраженного излучения на лоцируемой поверхности  $S$  в точке  $\vec{R}$  в направлении  $\vec{m}$ ;  $d\Omega(\vec{m})$  — элемент телесного угла;  $\theta$  — угол между нормалью к поверхности  $S$  и направлением на приемник.

Величина  $L_r(\vec{R}, \vec{m})$  имеет размерность  $\text{ср}^{-1}$ . Если ее умножить на  $1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ , то полученная величина будет иметь смысл яркости, создаваемой на элементе поверхности  $S$  излучением, падающим от фиктивного источника (с параметрами приемника, регистрирующего мощность) мощностью  $1 \text{ Вт}$ .

В рамках фотометрического подхода яркость  $L_{ref}(\vec{R}, \vec{m})$  может быть представлена в виде

$$L_{ref}(\vec{R}, \vec{m}) = \chi(\vec{R}, \vec{k}, \vec{m}) L_o(\vec{R}, \vec{m}), \quad (2)$$

где  $\chi(\vec{R}, \vec{k}, \vec{m})$  — локальная (относящаяся к элементарному участку неровной поверхности, много большему длины волны излучения, но много меньшему размеров неровностей поверхности) индикатриса отражения. Для однородной поверхности  $\chi(\vec{R}, \vec{k}, \vec{m}) = \chi(\vec{k}, \vec{m})$ ;  $\vec{k}, \vec{m}$  — вектора, характеризующие направление падающего и отраженного излучения;  $L_o(\vec{R}, \vec{m})$  — яркости отраженного излучения для идеального отражателя (ламбертовской поверхности с альбедо, равным единице).

Распределение яркости  $L_o(\vec{R}, \vec{m})$  имеет вид [6]

$$L_o(\vec{R}, \vec{m}) \equiv L_o(\vec{R}) = \frac{E_s(\vec{R})}{\pi}, \quad (3)$$

$E_s(\vec{R})$  — освещенность элементарного участка лоцируемой поверхности, создаваемая излучением, падающим от источника.

Локальная индикатриса отражения характеризует рассеивающие свойства локальных участков крупномасштабной поверхности  $S$ . Предположим, что поверхность однородная и в качестве локальной индикатрисы  $\chi(\vec{k}, \vec{m})$  возьмем модель индикатрисы, имеющей диффузную (широкую в угловом смысле) и квазизеркальную компоненты:

$$\chi(\vec{n}, \vec{m}) = A \frac{1}{\alpha \frac{2}{n+2} + \beta \Delta^2} \left[ \alpha \cos^n \theta + \beta \exp \left( -\frac{(\vec{m} - \vec{m}_{sp})^2}{\Delta^2} \right) \right], \quad (4)$$

где  $A$  — коэффициент отражения (альбедо) элементарной отражающей площадки;  $\alpha, \beta$  — доля диффузного и квазизеркального отражения для элементарной отражающей площадки,  $\alpha + \beta = 1$ ;  $n$  — параметр, характеризующий угловую ширину диффузной составляющей индикатрисы отражения,  $n > 0$ ;  $\theta$  — угол между нормалью к элементарному участку неровной поверхности и направлением на приемник;  $\vec{m}_{sp}$  — вектор зеркального отражения, зависящий от вектора направления падающего излучения  $\vec{m}_s$  и нормали  $\vec{n}$  к отражающей площадке;  $\vec{m}_{sp} = \vec{m}_s - 2\vec{n}(\vec{n}\vec{m}_s)$ ;  $\Delta$  — параметр, характеризующий угловую ширину квазизеркальной составляющей отражения.

При  $n = 0$  и  $\beta = 0$  формула (4) переходит в выражение для индикатрисы отражения ламбертовской поверхности:  $\chi(\vec{n}, \vec{m}) = A$ . При  $\alpha = 0$  в формуле (4) остается только квазизеркальная составляющая отражения, переходящая в зеркальное отражение при  $\Delta \rightarrow 0$ .

**Получение формулы для мощности лазерного локационного сигнала, отраженного от неровной земной поверхности в условиях замутненной атмосферы.** Используя формулы (2)–(4), из (1) получаем (углы расходимости источ-

ника и поля зрения приемной оптической системы и угловая ширина квазиэрихальной компоненты  $\Delta$  много меньше среднеквадратического значения наклонов поверхности  $S$ ):

$$P \cong \frac{A}{\pi} \frac{1}{\alpha \frac{2}{n+2} + \beta \Delta^2} \left\{ \alpha \int_S d\vec{R} E_s(\vec{R}'_{o\zeta}) E_r(\vec{R}''_{o\zeta}) (\vec{n}(\vec{R}_o) \vec{m}_n)^n + \right. \\ \left. + \beta \int_S d\vec{R} E_s(\vec{R}'_{o\zeta}, z_s) E_r(\vec{R}''_{o\zeta}, z_r) \exp\left(-\frac{(\vec{m} - \vec{m}_{sp})^2}{\Delta^2}\right) \right\}, \quad (5)$$

где  $\vec{R}'_{o\zeta} = \{[R_{ox} \text{ctg} \theta_s - \zeta(\vec{R}_o)] \sin \theta_s, R_{oy}\}$ ;  $\vec{R}''_{o\zeta} = \{[R_{ox} \text{ctg} \theta_r - \zeta(\vec{R}_o)] \sin \theta_r, R_{or}\}$ ;  $E_s(\vec{R}, z_s)$ ,  $E_r(\vec{R}, z_r)$  — освещенность на поверхности  $S$  от действительного и «фиктивного» (с параметрами приемника) источников;  $E_{s,r}(\vec{R}, z_{s,r}) = (\vec{m}_{s,r} \vec{n}) E_{s,r}^n(\vec{R}, z_{s,r})$ ;  $E_{s,r}^n(\vec{R}, z_{s,r})$  — распределение освещенности в поперечном сечении лазерных пучков от действительного и «фиктивного» источников;  $\vec{m}_{s,r}$  — единичные вектора, определяющие направление излучения действительного и «фиктивного» (с параметрами приемника) источников;  $z_s, z_r$  — наклонные расстояния от источника и приемника до поверхности;  $\zeta(\vec{R}_o)$  — высота поверхности  $S$  в точке  $\vec{R}_o$ ;  $\vec{R}_o = \{R_{ox}, R_{oy}\}$  — вектор на поверхности  $S_0$  (проекции неровной поверхности  $S$  на плоскость  $z = 0$ );  $\vec{n} = \{n_x, n_y, n_z\}$  — единичный вектор нормали к локальной площадке неровной поверхности  $S$ ;  $\theta_s, \theta_r$  — угол между нормалью к поверхности  $S_0$  и направлением на источник и приемник.

При получении (5) полагалось, что наклонные расстояния от источника и приемника до поверхности много больше высоты неровностей поверхности  $S$ . В выражение (5) входят освещенности  $E_{s,r}(\vec{R})$  в рассеивающей среде от действительного и «фиктивного» (с параметрами приемника) источников. Приближенные выражения для этих величин в однородной среде можно найти на основе уточненного малоуглового диффузионного приближения с выделением в световом поле рассеянной и нерассеянной составляющих с применением процедур упрощения, аналогичных использованным в работах [13, 14].

Усредняя по высотам и наклонам случайно-неровной поверхности  $S$  (полагая, что поверхность плавнонеровная и в среднем плоская, а высоты и наклоны поверхности распределены по нормальному закону), получаем следующую формулу для средней (по ансамблю реализаций случайных поверхностей) принимаемой мощности локационного сигнала  $\bar{P}$  в общей схеме бистатической локации. Полагаем, что среднеквадратические значения высот поверхности много меньше размеров лазерного пятна и поля зрения приемника на поверхности. Используем малоугловое приближение, результаты, приведенные в работах [2, 6, 10], и считаем, что источник, приемник и их оптические оси лежат в плоскости  $xOy$ :

$$\begin{aligned} \bar{P} \equiv & \frac{Aa_s a_r}{z_s^2 z_r^2} \frac{1}{\alpha \frac{2}{n+2} + \beta \Delta^2} \left[ \alpha F(\theta_s, \theta_r) + \beta \exp\left(-\frac{q_x^2}{2q_z^2 \gamma_0^2}\right) \right] \times \\ & \times \left( a_0 b_0 + \frac{\Lambda \varepsilon \exp(\Lambda \varepsilon z_r)}{C_r} \int_0^{z_r} a_1 b_1 \tilde{C}_r \exp(-\Lambda \varepsilon y) dy + \right. \\ & \left. + \frac{\Lambda \varepsilon \exp(\Lambda \varepsilon z_s)}{C_s} \int_0^{z_s} a_2 b_2 \tilde{C}_s \exp(-\Lambda \varepsilon x) dx + \right. \\ & \left. + \frac{(\Lambda \varepsilon)^2 \exp[\Lambda \varepsilon (z_s + z_r)]}{C_s C_r} \int_0^{z_s} dx \int_0^{z_r} dy a_3 b_3 \tilde{C}_s \tilde{C}_r \exp[-\Lambda \varepsilon (x + y)] \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= (C_s + C_r)^{-1/2}; \quad a_1 = (C_s + \tilde{C}_r)^{-1/2}; \quad a_2 = (\tilde{C}_s + C_r)^{-1/2}; \quad a_3 = (\tilde{C}_s + \tilde{C}_r)^{-1/2}; \\ b_0 &= (C_s \cos^2 \theta_s + C_r \cos^2 \theta_r)^{-1/2}; \quad b_1 = (C_s \cos^2 \theta_s + \tilde{C}_r \cos^2 \theta_r)^{-1/2}; \\ b_2 &= (\tilde{C}_s \cos^2 \theta_s + C_r \cos^2 \theta_r)^{-1/2}; \quad b_3 = (\tilde{C}_s \cos^2 \theta_s + \tilde{C}_r \cos^2 \theta_r)^{-1/2}; \\ C_{s,r} &= (\alpha_{s,r}^2 z_{s,r}^2)^{-1}; \quad \tilde{C}_s = (\alpha_s^2 z_s^2 + 6\mu^2 x^2 + 2\Lambda \varepsilon \mu^2 z_s^3 - 2\Lambda \varepsilon \mu^2 x^3)^{-1}; \\ \tilde{C}_r &= (\alpha_r^2 z_r^2 + 6\mu^2 y^2 + 2\Lambda \varepsilon \mu^2 z_r^3 - 2\Lambda \varepsilon \mu^2 y^3)^{-1}; \quad q_x = (\sin \theta_s - \sin \theta_r); \\ q_z &= -(\cos \theta_s + \cos \theta_r). \end{aligned}$$

Изотропная локально-ламбертовская поверхность с локальной индикатрисой  $\chi(\vec{n}, \vec{m}) = A$  и дисперсией  $\gamma_0^2$  наклонов неровной поверхности S:

$$\begin{aligned} F(\theta_s, \theta_r) &= \exp\left(\frac{1}{4\gamma_0^2}\right) \left[ \cos \theta_s \cos \theta_r (2\gamma_0^2)^{-1/4} W_{-\frac{1}{4}, \frac{1}{4}}\left(\frac{1}{2\gamma_0^2}\right) + \right. \\ & \left. + 0,5 \sin \theta_s \sin \theta_r (2\gamma_0^2)^{1/4} W_{-\frac{3}{4}, \frac{3}{4}}\left(\frac{1}{2\gamma_0^2}\right) \right]; \end{aligned}$$

Изотропная поверхность с локальной индикатрисой более общей, чем ламбертовская  $\chi(\vec{n}, \vec{m}) = A \frac{n+2}{2} \cos^n \theta$ , и дисперсией  $\gamma_0^2$  наклонов неровной поверхности S:

$$\begin{aligned} F(\theta_s, \theta_r) &= \cos^n \theta_r (2\gamma_0^2)^{-n/4} \exp\left(\frac{1}{4\gamma_0^2}\right) \left[ \cos \theta_r \cos \theta_s (2\gamma_0^2)^{-1/4} \times \right. \\ & \left. \times W_{-\frac{n+1}{4}, -\frac{n-1}{4}}\left(\frac{1}{2\gamma_0^2}\right) + \frac{1}{2} \sin \theta_r \sin \theta_s (n+1) (2\gamma_0^2)^{1/4} W_{-\frac{n+3}{4}, -\frac{n-3}{4}}\left(\frac{1}{2\gamma_0^2}\right) \right], \end{aligned}$$

где  $P_0$  — мощность, излучаемая источником;  $2\alpha_{s,r}$  — эффективный угол расходимости источника и угол поля зрения приемника;  $r_r$  — эффективный размер приемной апертуры;  $\varepsilon, \sigma$  — показатели ослабления и рассеяния среды;  $\Lambda$  — вероятность выживания фотона в среде;  $\mu$  — параметр индикатрисы рассеяния среды [6];  $W_{n,m}(x)$  — функция Уиттекера.

В случае моностатической наклонной локации ( $z_s = z_r = z$ ,  $\theta_s = \theta_r = \theta$ ) формула (6) упрощается:

$$\bar{P} \cong \frac{Aa_s a_r}{z^4 \cos \theta} \frac{\alpha F(\theta_s = \theta_r = \theta) + \beta}{\alpha \frac{2}{n+2} + \beta \Delta^2} \left\{ a_0^2 + \frac{\Lambda \varepsilon \exp(\Lambda \varepsilon z)}{C_r} \int_0^z a_1^2 \tilde{C}_r \exp(-\Lambda \varepsilon y) dy + \right. \\ \left. + \frac{\Lambda \varepsilon \exp(\Lambda \varepsilon z)}{C_s} \int_0^z a_2^2 \tilde{C}_s \exp(-\Lambda \varepsilon x) dx + \right. \\ \left. + \frac{(\Lambda \varepsilon)^2 \exp(2\Lambda \varepsilon z)}{C_s C_r} \int_0^z dx \int_0^z dy a_3^2 \tilde{C}_s \tilde{C}_r \exp[-\Lambda \varepsilon (x + y)] \right\}. \quad (7)$$

**Анализ полученных результатов.** В прозрачной атмосфере ( $\tau = \varepsilon z \ll 1$ ) в выражениях (6), (7) остаются только первые слагаемые в фигурных скобках и они совпадают с соответствующими выражениями для случайно-неровной локально ламбертовской поверхности, приведенными в работе [6]. Для моностатической локации вертикально вниз локально ламбертовской поверхности в этом приближении из (7) получим

$$\bar{P} \cong \frac{AP_o r^2 F(\gamma_o, \theta_s = \theta_r = 0) \exp(-2\varepsilon z)}{z^2} \left( \frac{\alpha_r^2}{\alpha_s^2 + \alpha_r^2} \right). \quad (8)$$

Отметим, что переход к плоской зеркальной поверхности в полученных в настоящей работе формулах не может быть проведен (формулы справедливы только тогда, когда величина  $\alpha_s$  много меньше среднеквадратического значения наклонов поверхности).

В случае оптически плотной атмосферы ( $\tau = \varepsilon z \gg 1$ ,  $\frac{\alpha_{s,r}^2}{2\Lambda \mu^2 \tau} \gg \exp(-\Lambda \tau)$ ) в выражениях (6), (7) остаются только последние слагаемые в фигурных скобках и они совпадают для плоской ламбертовской поверхности с результатами, приведенными в работе [6]. Для моностатической локации вертикально вниз локально ламбертовской поверхности в этом приближении из (7) имеем

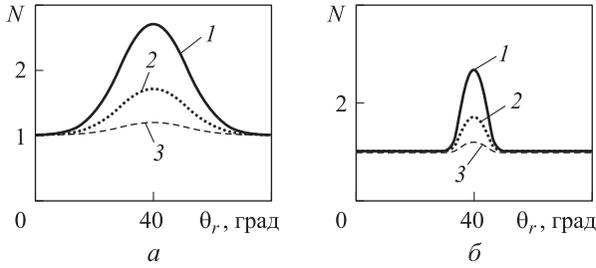
$$\bar{P} \cong \frac{AP_o r^2 \alpha_r^2 F(\gamma_o, \theta_s = \theta_r = 0) \exp[-2(\varepsilon - \sigma)z]}{[(\alpha_s^2 + \alpha_r^2)z^2 + 4\Lambda \mu^2 \tau z^2]}. \quad (9)$$

При  $\beta = 0$  в прозрачной атмосфере формула (6) совпадает с результатами, приведенными в работе [15].

Влияние квазизеркальной составляющей локальной индикатрисы отражения (элементарных отражающих участков поверхности) на мощность, регистрируемую приемником, показано на рис. 2. Здесь приведена зависимость отношения  $N$  принимаемой мощности  $\bar{P}$  от поверхности с локальной индикатрисой отражения (4) к мощности, регистрируемой от поверхности только с диффузной составляющей локальной индикатрисы отражения, от угла приема  $\theta_r$ :

$$N \cong \frac{\frac{2}{n+2} \alpha F(\theta_s, \theta_r) + \beta \exp\left(-\frac{q_x^2}{2q_z^2 \gamma_o^2}\right)}{\alpha \frac{2}{n+2} + \beta \Delta^2} F(\theta_s, \theta_r).$$

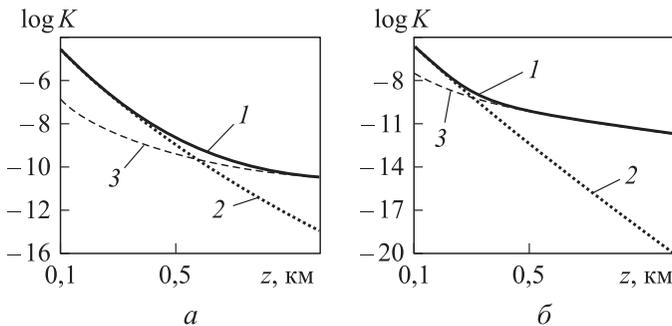
Расчеты проведены при следующих значениях параметров:  $\theta_s = 40^\circ$ ;  $\gamma_o^2 = 10^{-2}$ ;  $\gamma_o^2 = 9 \cdot 10^{-4}$ ;  $n=0$ ;  $\Delta^2 = 10^{-4}$ . При проведении расчетов функции Уиттекера аппроксимировали асимптотическими рядами с учетом первых членов ряда.



**Рис. 2.** Влияние квазизеркальной составляющей локальной индикатрисы отражения на принимаемую мощность для  $\gamma_o^2 = 10^{-2}$  (а) и  $9 \cdot 10^{-4}$  (б):  
 1 —  $\alpha=0,5$ ,  $\beta=0,5$ ; 2 —  $\alpha=0,7$ ,  $\beta=0,3$ ; 3 —  $\alpha=0,9$ ,  $\beta=0,1$

Кривые, приведенные на рис. 2, показывают как принимаемая мощность зависит от наличия квазизеркальной составляющей локальной индикатрисы отражения поверхности. В направлениях, близких к углу зеркального отражения ( $\theta_r = -\theta_s$ ), появляется пик, величина и ширина которого определяются среднеквадратическим значением наклонов неровной поверхности и долей зеркальной составляющей локальной индикатрисы отражения поверхности.

Для моностатической локации вертикально вниз приведены результаты расчетов, показывающих влияние на принимаемую мощность оптической толщи до лоцируемой поверхности (рис. 3). Здесь приведены результаты расчетов



**Рис. 3.** Влияние оптической толщи атмосферы между локатором и поверхностью на принимаемую мощность для  $\epsilon = 8 \cdot 10^{-3}$  (а) и  $1,6 \cdot 10^{-2}$  (б):  
 1, 2, 3 — кривые, построенные по формулам (7), (8) и (9) соответственно

зависимости от расстояния  $z_r = z_s = z$  локатора до локально ламбертовской поверхности величины  $K$ :

$$K = \frac{\bar{P}}{AP_0 r_r^2 F(\gamma_0, \theta_s = \theta_r = 0)}.$$

Расчеты выполнены при следующих значениях параметров:  $\beta = 0$ ;  $n = 0$ ;  $\alpha_s = 10^{-3}$ ;  $\alpha_r = 2 \cdot 10^{-2}$ ;  $\varepsilon = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ ;  $\varepsilon = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$ ;  $\Lambda = 0,9$ ;  $\mu = 0,08$ .

Формула (8) для прозрачной атмосферы очень плохо описывает случай локации в оптически плотной среде (при больших расстояния от локатора до поверхности), а формула (9) — начальный участок трассы локации (при небольших расстояния от локатора до поверхности). Формула (7) позволяет правильно описывать зависимость принимаемой мощности от расстояния локатора до поверхности как на начальном участке трассы локации, так и при больших расстояниях от локатора до поверхности. Причем начальный участок трассы локации (где хорошо «работает» формула (8)) и расстояние от локатора до поверхности, где начинает хорошо «работать» формула (9), сильно зависят от характеристик атмосферы.

**Выводы.** В общей схеме бистатической локации, когда источник и приемник разнесены в пространстве, получено выражение для мощности лазерного локационного сигнала, регистрируемого приемником при облучении узким оптическим пучком в сильно рассеивающей среде случайно-неровной поверхности с локальной индикатрисой отражения, имеющей как широкую в угловом смысле, так и квазизеркальную компоненты. Полученная формула позволяет правильно описывать мощность локационного сигнала в прозрачной атмосфере (на начальном участке трассы локации) и в оптически плотной атмосфере (на больших расстояниях от локатора до поверхности).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Voronovich A.G. Wave scattering from rough surfaces. New York: Springer-Verlag, 2012. 244 p.
2. Bass F.G., Fuks I.M. Wave scattering from statistically rough surfaces. Oxford: Pergamon Press, 1979. 537 p.
3. Harvey J.E., Krywonos A., Vernold C.L. Modified Beckmann — Kirchhoff scattering model for rough surfaces with large incident and scattering angles // Optical Engineering. 2007. Vol. 46. No. 7. P. 78002-1–78002-10. DOI: 10.1117/1.2752180  
URL: <http://spie.org/Publications/Journal/10.1117/1.2752180>
4. Basu S., Hyde M., McCrae J.E., Fiorino S. Scattering from rough surface in presence of atmospheric turbulence // Proc. of SPIE. 2013. Vol. 8732. P. 87320G1–87320G9.  
DOI: 10.1117/12.2016105  
URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1689784>
5. Запевалов А.С., Лебедев Е.Н. Моделирование статистических характеристик поверхности океана при дистанционном зондировании в оптическом диапазоне // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 7. № 1. С. 28–33.
6. Основы импульсной лазерной локации / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 572 с.
7. Rogatkin D.A., Tchernyi V.V. Scattering of the transmitted light by a randomly rough dielectric surface // Progress in Electromagnetics Research Symposium. 2005. Hangzhou, China. P. 686–690.

8. *Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р.* Лазерная локация земли и леса. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. 230 с.
9. *Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.* Основы теоретической атмосферной оптики. СПб.: СПбГУ, 2007. 152 с.
10. *Белов М.Л., Орлов В.М.* О мощности, регистрируемой лидаром при зондировании в атмосфере поверхности с комбинированной индикатрисой рассеяния // *Оптика атмосферы.* 1991. Т. 4. № 10. С. 1066–1069.
11. *Ticconi F., Pulvirenti L., Pierdicca N.* Models for scattering from rough surfaces. URL: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/16082.pdf> (дата обращения: 13.02.2017).
12. *Копилович Л.Е., Фукс И.М.* Индикатрисы рассеяния и альbedo сильношероховатых поверхностей // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика.* 1981. Т. 24. № 7. С. 840–850.
13. *Долин Л.С., Савельев В.А.* К теории распространения узкого пучка света в стратифицированной рассеивающей среде // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика.* 1979. Т. 22. № 11. С. 1310–1317.
14. *Карасик В.Е., Орлов В.М.* Лазерные системы видения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 478 с.
15. *Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.И.* Рассеяние лазерного пучка на неровной земной поверхности // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки.* 2004. № 3. С. 79–90.

**Белов Михаил Леонидович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Городничев Виктор Александрович** — д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Элементы приборных устройств» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Алехин Владимир Александрович** — д-р техн. наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники Московского технологического университета (МИРЭА) (Российская Федерация, 119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

#### **Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Белов М.Л., Городничев В.А., Алехин В.А. Мощньсть лазерного локационного сигнала, отраженного от неровной земной поверхности в условиях замутненной атмосферы // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение.* 2017. № 3. С. 107–117.  
DOI: 10.18698/0236-3933-2017-3-107-117

## **POWER OF LASER TARGET SIGNAL FROM ROUGH EARTH SURFACE IN HAZY ATMOSPHERE**

**M.L. Belov<sup>1</sup>**

[belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

**V.A. Gorodnichev<sup>1</sup>**

[gorod@bmstu.ru](mailto:gorod@bmstu.ru)

**V.A. Alekhin<sup>2</sup>**

[alekhin@mirea.ru](mailto:alekhin@mirea.ru)

<sup>1</sup> **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

<sup>2</sup> **Moscow Technological University, Moscow State University of Information Technologies, Radio Engineering and Electronics, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

The paper is concerned with investigation of power of a laser target signal from the rough earth surface in hazy (optically-dense) atmosphere. The paper examines a common case of bistatic location wherein the transmitter and receiver of the laser locator are situated in different points of coordinate space. We found an analytic expression for the received power of the laser target signal for lighting the rough surface with local indicatrix of reflection, comprised of diffuse (wide angle) and quasispecular (narrow angle) components by a narrow laser beam in turbid medium. The formula makes it possible to correctly describe the relationship between the power of the laser target signal and the distance to surface both in optically-transparent earth atmosphere (on initial section of location line), and in optically-dense earth atmosphere (for long distance laser radar from surface)

**Keywords**

*Power of laser target signal, rough surface, hazy atmosphere*

**REFERENCES**

- [1] Voronovich A.G. Wave scattering from rough surfaces. New York, Springer-Verlag, 2012. 244 p.
- [2] Bass F.G., Fuks I.M. Wave scattering from statistically rough surfaces. Oxford, Pergamon Press, 1979. 537 p.
- [3] Harvey J.E., Krywonos A., Vernold C.L. Modified Beckmann — Kirchhoff scattering model for rough surfaces with large incident and scattering angles. *Optical Engineering*, 2007, vol. 46 (7), pp. 78002-1–78002-10. DOI: 10.1117/1.2752180  
Available at: <http://spie.org/Publications/Journal/10.1117/1.2752180>
- [4] Basu S., Hyde M., McCrae J.E., Fiorino S. Scattering from rough surface in presence of atmospheric turbulence. *Proc. of SPIE*, 2013, vol. 8732, pp. 87320G1–87320G9. DOI: 10.1117/12.2016105  
Available at: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1689784>
- [5] Zapevalov A.S., Lebedev E.N. Simulation of the sea surface statistical characteristics at the remote sensing in the optical range. *Optika atmosfery i okeana*, 2014, vol. 7, no. 1, pp. 28–33 (in Russ.).
- [6] Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. Osnovy impul'snoy lazernoy lokatsii [Fundamentals of pulsed location]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 572 p.
- [7] Rogatkin D.A., Tchernyi V.V. Scattering of the transmitted light by a randomly rough dielectric surface. *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, 2005, Hangzhou, China, pp. 686–690.
- [8] Medvedev E.M., Danilin I.M., Mel'nikov S.R. Lazernaya lokatsiya zemli i lesa [Laser location of forest and ground]. Krasnoyarsk, Sukachev Institute of Forest Publ., 2007. 230 p.
- [9] Timofeev Yu.M., Vasil'yev A.V. Osnovy teoreticheskoy atmosfernoy optiki [Fundamentals of theoretical atmospheric optics]. Saint-Petersburg, SPbSU Publ., 2007. 152 p.
- [10] Belov M.L., Orlov V.M. On power registered by lidar in process of atmosphere sounding of the surface with combined dissipation indicatrix. *Optika atmosfery*, 1991, vol. 4, no. 10, pp. 1066–1069 (in Russ.).

- [11] Ticconi F., Pulvirenti L., Pierdicca N. Models for scattering from rough surfaces. Available at: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/16082.pdf> (accessed 13.02.2017).
- [12] Kopilovich L.E., Fuks I.M. Dissipation indicatrix of highly rough surfaces. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radiofizika*, 1981, vol. 24, no. 7, pp. 840–850 (in Russ.).
- [13] Dolin L.S., Savel'yev V.A. Toward a theory of narrow light beam propagation in stratified scattering medium. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radiofizika*, 1979, vol. 22, no. 11, pp. 1310–1317 (in Russ.).
- [14] Karasik V.E., Orlov V.M. *Lazernye sistemy videniya* [Laser vision systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013. 478 p.
- [15] Belov M.L., Gorodnichev V.A., Kozintsev V.I. Laser beam scattering on uneven Earth surface. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2004, no. 3, pp. 79–90 (in Russ.).

**Belov M.L.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor of Laser and Optoelectronic Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Gorodnichev V.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Head of Elements of Instrument Devices Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Alekhin V.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor of Theoretical Foundations of Electrical Engineering Department, Moscow Technological University, Moscow State University of Information Technologies, Radio Engineering and Electronics (Vernadskogo prospekt 78, Moscow, 119454 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Belov M.L., Gorodnichev V.A., Alekhin V.A. Power of Laser Target Signal from Rough Earth Surface in Hazy Atmosphere. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 3, pp. 107–117. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-3-107-117