

УДК 551.501

М. Л. Белов, В. А. Городничев,
В. И. Козинцев, Б. В. Стрелков

СРЕДНЯЯ МОЩНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО СИГНАЛА В СХЕМЕ БИСТАТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ СЛУЧАЙНО-НЕРОВНОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ СЛАБЫХ ЗАТЕНЕНИЙ

Проведен расчет мощности принимаемого лазерного сигнала при локации случайно-неровной поверхности с ламбертовской индикатрисой отражения локальных участков в условиях слабых затенений. В общей схеме бистатической локации получено аналитическое выражение для средней принимаемой мощности локационного сигнала при нормальном распределении высот и наклонов поверхности в случаях, когда источник и приемник находятся по одну и по разные стороны от нормали к поверхности. Показано, что влияние неровностей поверхности и самозатенений элементов поверхности на принимаемую мощность в наибольшей степени проявляется, когда источник и приемник находятся по разные стороны от нормали к поверхности.

E-mail: ekomonit@mx.bmstu.ru

Ключевые слова: лазер, неровная поверхность, локация, затенения, мощность сигнала.

Мощность эхо-сигнала, регистрируемого приемником лазерного локатора в условиях отсутствия затенений для земной поверхности рассматривалась в ряде работ [1–6] для различных схем локации и разных индикатрис отражения локальных участков поверхности. Условие отсутствия затенений элементов поверхности справедливо для углов подсвета и приема, близких к вертикальным, что существенно ограничивает область применения этих результатов. Даже для лазерных локационных систем, размещенных на авиационных носителях, более адекватным является условие слабых затенений элементов земной поверхности.

Средняя мощность лазерного сигнала, регистрируемого приемником лазерного локатора в условиях слабых и сильных затенений, исследовалась в работе [7]. При этом учет слабых затенений проводился приближенно: не учитывались самозатенения элементов поверхности, корреляция затенений элементов поверхности и их наклонов, а решение получено с использованием сложных специальных функций — вырожденных гипергеометрических функций (функций Уиттекера).

Далее для условий слабых затенений получена простая модель для средней принимаемой мощности в общей схеме бистатической локации земной поверхности (когда источник и приемник разнесены в пространстве) при учете самозатенений элементов поверхности и корреляции затенений элементов поверхности и их наклонов.

Пусть неровная земная поверхность S облучается узким лазерным пучком. В качестве модели рельефа неровной земной поверхности используем модель трехмерной случайно-неровной в среднем плоской поверхности, высоты и наклоны которой распределены по нормальному закону [7]. Индикатрису отражения локальных участков земной поверхности (размер которых много больше длины волны излучения, но меньше характерных масштабов поверхности и размеров освещенного лазерного пятна) считаем ламбертовской [7, 8].

Аналогично вычислениям, приведенным в работах [2, 4, 7], можно получить интегральное выражение для мощности P , регистрируемой приемником при локации случайно-неровной поверхности S с ламбертовской индикатрисой. После перехода от интегрирования по неровной поверхности S к интегрированию по поверхности S_0 (проекция S на плоскость $Z = 0$) интегральное выражение для мощности P при освещении поверхности узким лазерным пучком и узком угловом поле зрения приемника имеет следующий вид (считаем для простоты (как и в работах [1–8], что источник, приемник и их оптические оси лежат в одной плоскости XOZ некоторой произвольной системы координат, у которой ось Z совпадает с нормалью к поверхности S_0):

$$P \cong \frac{A}{\pi} \int_{S_0} \frac{d\mathbf{R}_0}{n_Z} E_{\text{н}}(\mathbf{R}'_{0\zeta}) E_{\text{п}}(\mathbf{R}''_{0\zeta}) Y(\mathbf{m}_{\text{н}}, \mathbf{R}_0) Y(\mathbf{m}_{\text{п}}, \mathbf{R}_0), \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} E_{\text{н}}(\mathbf{R}'_{0\zeta}) &= E_{\text{н}}(R'_{0X\zeta}, R'_{0Y\zeta}) = \\ &= (\mathbf{m}_{\text{н}}\mathbf{n}) E_{\text{н}0} \{ [R_{0X} \text{ctg} \theta_{\text{н}} - \zeta(\mathbf{R}_0)] \sin \theta_{\text{н}}, R_{0Y} \}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{п}}(\mathbf{R}''_{0\zeta}) &= E_{\text{п}}(R''_{0X\zeta}, R''_{0Y\zeta}) = \\ &= (\mathbf{m}_{\text{п}}\mathbf{n}) E_{\text{п}0} \{ [R_{0X} \text{ctg} \theta_{\text{п}} - \zeta(\mathbf{R}_0)] \sin \theta_{\text{п}}, R_{0Y} \}; \end{aligned}$$

$\mathbf{R}_0 = \{R_{0X}, R_{0Y}\}$ – вектор в плоскости $Z = 0$; $E_{\text{н}}(\mathbf{R})$ – освещенность, создаваемая лазерным пучком, падающим на поверхность S от источника (без учета затенений); $E_{\text{п}}(\mathbf{R})$ – освещенность, создаваемая на поверхности S фиктивным (с параметрами приемника) источником (без учета затенений) [8]; $E_{\text{н}0}(\mathbf{R})$, $E_{\text{п}0}(\mathbf{R})$ – освещенности в плоскостях, перпендикулярных оптическим осям источника и приемника соответственно; $\theta_{\text{н}}$, $\theta_{\text{п}}$ – углы между нормалью к плоскости $Z = 0$ и оптическими осями источника и приемника; $\mathbf{m}_{\text{н}}$, $\mathbf{m}_{\text{п}}$ – единичные

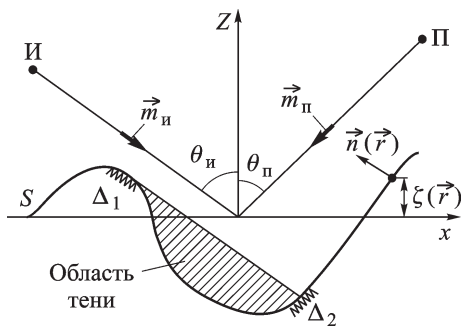


Рис. 1. Геометрия локации

$\gamma = \{\gamma_x, \gamma_y\}$ — вектор случайных наклонов неровной поверхности S ; $\zeta(\mathbf{R}_0)$ — высота неровной поверхности S в точке \mathbf{R}_0 .

Геометрические параметры, входящие в формулу (1), поясняет рис. 1.

Величина $E_p(\mathbf{R})$ — безразмерная, если ее умножить на $1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, то она приобретет смысл освещенности, создаваемой на элементе поверхности S излучением, падающим от фиктивного источника мощностью 1 Вт [8].

При отсутствии затенений формула (1) совпадает с выражением для мощности P , полученным в работах [2, 4] для случайно-неровной локально-ламбертовской поверхности.

Формула (1) представляет собой интеграл от произведения функций и функционалов, сложным образом зависящих от высот и наклонов случайно-неровной поверхности. В принципе существуют процедуры, позволяющие представить среднее значение произведения двух (и более) функционалов как произведение средних значений самих функционалов [9]. Однако они требуют определения действия на произведение средних значений функционалов сложных операторов (включая вариационные производные сложного вида). Поэтому для вычисления средней принимаемой мощности \bar{P} (черта сверху обозначает усреднение по ансамблю неровных поверхностей) упростим формулу (1), заменив функционалы $Y(\mathbf{m}_n, \mathbf{r})$, $Y(\mathbf{m}_p, \mathbf{r})$ на ступенчатые функции $\eta(\mathbf{m}_{n,p}, \mathbf{r})$, определяемые следующим образом [10]: $\eta(\mathbf{m}_{n,p}, \mathbf{r}) = 1$ — если точка поверхности $z = \zeta(\mathbf{r})$ освещена падающим от источника излучением \mathbf{m}_n (наблюдается со стороны приемника с направления \mathbf{m}_p); $\eta(\mathbf{m}_{n,p}, \mathbf{r}) = 0$ — в противном случае. Неточность, которая допускается при замене функций $Y(\mathbf{m}_p, \mathbf{r})$, $Y(\mathbf{m}_n, \mathbf{r})$ на ступенчатые функции $\eta(\mathbf{m}_{n,p}, \mathbf{r})$, заключается в замене областей полутени на резкую границу свет-тень [10] (см. рис. 1, где Δ_1 и Δ_2 — области полутени для освещения поверхности от источника \mathbf{m}_n).

векторы, характеризующие направление на источник излучения и приемник; $Y(\mathbf{m}_n, \mathbf{R})$, $Y(\mathbf{m}_p, \mathbf{R})$ — множители, учитывающие затенения со стороны источника излучения и приемника; $\mathbf{n} = \{n_x, n_y, n_z\}$ — вектор нормали к неровной поверхности S ; A — коэффициент отражения (альbedo) локального участка поверхности; $n_z = \frac{1}{\sqrt{1 + \gamma_x^2 + \gamma_y^2}}$;

Усредним выражение (1) по ансамблю неровных поверхностей аналогично работе [10]. Усреднение проведем по всем реализациям поверхности, которые в точке \mathbf{R}_0 имеют заданную высоту ζ и наклон γ . Эти действия затрагивают только множитель $\eta(\mathbf{m}_и, \mathbf{r})\eta(\mathbf{m}_п, \mathbf{r})$, в результате получаем [10]:

$$\overline{\eta(\mathbf{m}_и, \mathbf{r})\eta(\mathbf{m}_п, \mathbf{r})} = P_2(\zeta, \gamma_X | \theta_и, \theta_п), \quad (2)$$

где $P_2(\zeta, \gamma_X | \theta_и, \theta_п)$ – вероятность того, что точка поверхности, имеющая высоту ζ и тангенс угла наклона γ_X , не затеняется другими точками этой поверхности как со стороны направления облучения $\mathbf{m}_и$, так и со стороны направления наблюдения $\mathbf{m}_п$ [10].

В случае слабых затенений (определяемых условием [10] $\text{ctg } \theta_{и,п} \gg \gg (\bar{\gamma}_X^2)^{1/2}$, где $\bar{\gamma}_X^2$ – дисперсия случайных наклонов поверхности вдоль оси X), характерных для авиационных систем, величину $P_2(\zeta, \gamma_X | \theta_и, \theta_п)$ можно представить в виде [10]

$$P_2(\zeta, \gamma_X | \theta_и, \theta_п) = P_1(\zeta, \gamma_X | \theta_и)P_1(\zeta, \gamma_X | \theta_п) \quad (3)$$

(источник и приемник по разные стороны от оси Z) и

$$P_2(\zeta, \gamma_X | \theta_и, \theta_п) = P_1(\zeta, \gamma_X | \max\{\theta_и, \theta_п\}) \quad (4)$$

(источник и приемник по одну сторону от оси Z), где $P_1(\zeta, \gamma_X | \theta_{и,п})$ – вероятность выброса случайного поля высот, закрывающего видимость точки поверхности (ζ, γ_X) со стороны источника (приемника).

Физический смысл выражения (4) очевиден – если нижний луч не затенен, то верхний луч и подавно не пересекается с поверхностью.

С учетом самозатенений элементов поверхности для величины $P_2(\zeta, \gamma_X | \theta_и, \theta_п)$ имеем [10]

$$P_2(\zeta, \gamma_X | \theta_и, \theta_п) \cong \Theta(\gamma_X - \text{ctg } \theta_и)\Theta(\text{ctg } \theta_п - \gamma_X) \left[\int_{-\infty}^{\zeta} W(\zeta') d\zeta' \right]^{\Lambda(a_и) + \Lambda(a_п)} \quad (5)$$

(источник и приемник по разные стороны от оси Z) и

$$P_2(\zeta, \gamma_X | \theta_и, \theta_п) \cong \Theta(\gamma_X - \text{ctg } \theta) \left[\int_{-\infty}^{\zeta} W(\zeta') d\zeta' \right]^{\Lambda(a)} \quad (6)$$

(источник и приемник по одну сторону от оси Z), где $\Theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0; \\ 0, & x < 0, \end{cases}$

– ступенчатая функция;

$$\theta = \max(\theta_и, \theta_п); \quad a = \frac{\text{ctg } \theta}{(\bar{\gamma}_X^2)^{1/2}}; \quad a_и = \frac{\text{ctg } \theta_и}{(\bar{\gamma}_X^2)^{1/2}}; \quad a_п = \frac{\text{ctg } \theta_п}{(\bar{\gamma}_X^2)^{1/2}};$$

$\Lambda\left(\frac{\text{ctg } \theta}{(\bar{\gamma}_x^2)^{1/2}}\right) = \text{tg } \theta \int_{\text{ctg } \theta}^{\infty} (\gamma'_X - \text{ctg } \theta) W(\gamma'_X) d\gamma'_X$ – параметр, характери-

зующий степень затенений; $\Lambda(a) \approx \frac{1}{(2\pi)^{1/2} a^3} \exp(-0,5a^2)$, для слабых затенений $\Lambda \ll 1$; $W(\zeta)$, $W(\gamma_X)$ – функция распределения высот ζ и одномерная функция распределения наклонов γ_X поверхности.

Для действительного и фиктивного источников будем использовать модели гауссовых пучков [5, 8]. В рамках этих моделей для величин $E_{и0,п0}(\mathbf{R})$ имеем

$$E_{и0,п0}(\mathbf{R}) \cong \frac{a_{и,п}}{L_{и,п}^2} \exp\{-C_{и,п} R^2\}. \quad (7)$$

Величины $a_{и,п}$ и $C_{и,п}$, входящие в уравнение (7), зависят от параметров источника ($a_{и}$, $C_{и}$), приемника ($a_{п}$, $C_{п}$), наклонных расстояний от источника ($L_{и}$) и приемника ($L_{п}$) до поверхности и состояния земной атмосферы [5].

В общем случае величины $a_{и,п}$ и $C_{и,п}$ сложным образом зависят от указанных параметров. Однако в некоторых частных случаях для них можно использовать простые модели. Например, в случае отсутствия на трассе локации атмосферного аэрозоля и турбулентности атмосферы имеем [5]

$$a_{и} = \frac{P_0 T_{и}}{\pi \alpha_{и}^2}; \quad a_{п} = \pi r_{п}^2 T_{п}; \quad C_{и,п} = (\alpha_{и,п} L_{и,п})^{-2},$$

где P_0 – мощность, излучаемая лазерным источником; $T_{п}$, $T_{и}$ – коэффициенты пропускания приемной и передающей оптики лазерного локатора; $\alpha_{и,п}$ – угол расходимости излучения источника и угол поля зрения приемной оптической системы; $r_{п}$ – эффективный радиус приемного объектива.

Учтем, что основную роль при слабых затенениях играют самозатенения элементов поверхности [10], описываемые множителями $\Theta(\gamma_X - \text{ctg } \theta_{и})$ и $\Theta(\text{ctg } \theta_{п} - \gamma_X)$. Эффект самозатенений элементов поверхности поясняет рис. 2. Самозатенения элемента поверхности

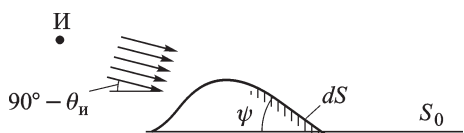


Рис. 2. Эффект самозатенений элементов поверхности

S возникают, когда угол наклона ψ элемента поверхности dS становится больше угла освещения $90^\circ - \theta_{и}$ со стороны источника, отсчитываемого от поверхности S_0 , или угла наблюдения $90^\circ - \theta_{п}$ со стороны приемника. Ступенчатые функции $\Theta(\gamma_X - \text{ctg } \theta_{и})$ и $\Theta(\text{ctg } \theta_{п} - \gamma_X)$ устраняют вклад

(которого в действительности нет) в принимаемый сигнал таких самозатененных участков поверхности.

Усредняя выражение (1) по всем возможным значениям ζ и γ в точке \mathbf{R}_0 (используя формулы (2)–(7)), получаем следующее выражение для \bar{P} (учитывая, что основную роль при слабых затенениях играют самозатенения элементов поверхности [10], описываемые множителями $\Theta(\gamma_X - \text{ctg } \theta_n)$, $\Theta(\text{ctg } \theta_n - \gamma_X)$):

$$\begin{aligned} \bar{P} \cong & \frac{A}{\pi} \frac{a_n a_n}{L_n^2 L_n^2} \int_{S_0} d\mathbf{R}_0 \exp\{-(C_n + C_n)R_{0Y}^2\} \int_{-\infty}^{\infty} d\zeta W(\zeta) \times \\ & \times \exp\{-C_n \sin^2 \theta_n [R_{0X} \text{ctg } \theta_n - \zeta]^2 - C_n \sin^2 \theta_n [R_{0X} \text{ctg } \theta_n - \zeta]^2\} \times \\ & \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\gamma_Y}{nz} \int_{-\infty}^{\infty} d\gamma_X W(\gamma_X, \gamma_Y) (m_n n) (m_n n) \Theta(\gamma_X - \text{ctg } \theta_n) \Theta(\text{ctg } \theta_n - \gamma_X). \end{aligned} \quad (8)$$

После интегрирования по пространственным координатам \mathbf{R}_0 и усреднения по случайным высотам поверхности ζ (считаем, что высоты поверхности распределены по нормальному закону) получаем:

$$\begin{aligned} \bar{P} \cong & \frac{A a_n a_n}{L_n^2 L_n^2} [C_n + C_n]^{-1/2} p^{-1/2} \Omega \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\gamma_Y}{nz} \times \\ & \times \int_{-\infty}^{\infty} d\gamma_X W(\gamma_X, \gamma_Y) (m_n n) (m_n n) \Theta(\gamma_X - \text{ctg } \theta_n) \Theta(\text{ctg } \theta_n - \gamma_X), \end{aligned} \quad (9)$$

где

$p = C_n \cos^2 \theta_n + C_n \cos^2 \theta_n$; $\Omega = [1 + 2\sigma_0^2 p^{-1} C_n C_n \sin^2(\theta_n - \theta_n)]^{-1/2}$;
 σ_0^2 – дисперсия случайных высот поверхности; $W(\gamma_X, \gamma_Y)$ – двумерная функция распределения наклонов $\gamma = \{\gamma_X, \gamma_Y\}$ поверхности.

Формулы (8) и (9) записаны для случая, когда источник и приемник расположены по разные стороны от оси Z .

В формуле (9) проведем усреднение по наклонам γ_X, γ_Y поверхности, считая распределение наклонов поверхности изотропным ($\bar{\gamma}_X^2 = \bar{\gamma}_Y^2 = \gamma_0^2$), закон распределения случайных наклонов поверхности гауссовским, среднее значение случайных наклонов равным нулю и используя соотношение, справедливое для случайных величин с гауссовским законом распределения и нулевым средним значением [9]:

$$\overline{zF(z)} = \sigma^2 \frac{dF(z)}{dz},$$

где $F(z)$ — некоторая функция случайной величины z ; σ^2 — дисперсия случайной величины z .

Формула для средней мощности \bar{P} , регистрируемой приемником при облучении узким лазерным пучком случайно-неровной локально-ламбертовской поверхности в условиях слабых затенений (с учетом самозатенений элементов поверхности и корреляции затенений элементов поверхности и их наклонов), имеет следующий вид (считаем земную поверхность плавно неровной — $\gamma_0^2 \ll 1$):

$$\bar{P} \cong \frac{A a_n a_p}{L_n^2 L_p^2} [C_n + C_p]^{-1/2} p^{-1/2} \Omega I(\theta_n, \theta_p, \gamma_0), \quad (10)$$

где

$$I(\theta_n, \theta_p, \gamma_0) \cong \cos \theta_n \cos \theta_p \left\{ \frac{1}{2} [\Phi(\mu_n) + \Phi(\mu_p)] [1 + \gamma_0^2 (\operatorname{tg} \theta_n \operatorname{tg} \theta_p - 1)] - \right. \\ \left. - \frac{\gamma_0}{\sqrt{2\pi}} \left(1 - \frac{\gamma_0^2}{2} \right) [\exp(-\mu_n^2) - \exp(-\mu_p^2)] [\operatorname{tg} \theta_n + \operatorname{tg} \theta_p] + \right. \\ \left. + \frac{\gamma_0}{\sqrt{2\pi}} [\exp(-\mu_n^2) \operatorname{ctg} \theta_n + \exp(-\mu_p^2) \operatorname{ctg} \theta_p] \left(\frac{1}{2} - \operatorname{tg} \theta_n \operatorname{tg} \theta_p \right) + \right. \\ \left. + \frac{\gamma_0^3}{2\sqrt{2\pi}} (\operatorname{tg} \theta_n + \operatorname{tg} \theta_p) [\exp(-\mu_n^2)(2 + 2\mu_n^2) - \exp(-\mu_p^2)(2 + 2\mu_p^2)] \right\} \quad (11)$$

(источник и приемник по разные стороны от оси Z) и

$$I(\theta_n, \theta_p, \gamma_0) \cong \cos \theta_n \cos \theta_p \left\{ \frac{1}{2} [1 + \Phi(\mu)] [1 - \gamma_0^2 (\operatorname{tg} \theta_n \operatorname{tg} \theta_p + 1)] - \right. \\ \left. - \frac{\gamma_0}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\mu^2) \left(1 - \frac{\gamma_0^2}{2} \right) (\operatorname{tg} \theta_n - \operatorname{tg} \theta_p) + \frac{\gamma_0}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\mu^2) \operatorname{ctg} \theta \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{1}{2} + \operatorname{tg} \theta_n \operatorname{tg} \theta_p \right) + \frac{\gamma_0^3}{2\sqrt{2\pi}} \exp(-\mu^2) (2 + 2\mu^2) (\operatorname{tg} \theta_n - \operatorname{tg} \theta_p) \right\} \quad (12)$$

(источник и приемник по одну сторону от оси Z);

$$\mu_n = \frac{\operatorname{ctg} \theta_n}{\sqrt{2\gamma_0}}; \quad \mu_p = \frac{\operatorname{ctg} \theta_p}{\sqrt{2\gamma_0}}; \quad \mu = \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\sqrt{2\gamma_0}};$$

γ_0^2 — дисперсия случайных наклонов поверхности; $\Phi(x)$ — интеграл вероятности.

При $\sigma_0, \gamma_0 \rightarrow 0$ формула (10) переходит в выражение для принимаемой мощности, регистрируемой от плоской ламбертовской поверхности [8]. Для случайно-неровной локально-ламбертовской поверхности и при отсутствии затенений (при $\frac{\operatorname{ctg}^2 \theta}{2\gamma_0^2} \rightarrow \infty$) формула (10) совпадает с результатами, приведенными в работе [7] при $\gamma_0^2 \ll 1$.

Расчеты по формуле (10) показывают, что при увеличении дисперсии высот поверхности σ_0^2 средняя принимаемая мощность \bar{P} всегда уменьшается. Исключение составляет только случай, когда источник и приемник совмещены ($\theta_{\text{и}} = \theta_{\text{п}}$). В этом случае \bar{P} не зависит от σ_0^2 (при условии, что высоты неровной поверхности много меньше расстояний от источника и приемника до поверхности). Физически это понятно: в этом случае оптические оси источника и приемника совмещены и приемник “видит” (при любом значении σ_0^2) только те участки поверхности, которые освещены.

Зависимость средней принимаемой мощности от дисперсии наклонов γ_0^2 сложнее и определяется взаимным расположением источника и приемника (находятся они по одну сторону от нормали к поверхности S_0 или по разные) и наличием затенений поверхности.

На рис. 3, а показана зависимость функции $I(\theta_{\text{и}}, \theta_{\text{п}}, \gamma_0)$ от дисперсии наклонов γ_0^2 в условиях слабых затенений, когда источник и приемник находятся по одну сторону от нормали к поверхности S_0 (остальные сомножители не зависят от γ_0^2). Расчеты проводились при $\theta_{\text{п}} = 55^\circ$ и $\theta_{\text{и}} = 55^\circ$. Кривая 1 — результаты расчетов функции без учета затенений — $I_{6.3}(\theta_{\text{и}}, \theta_{\text{п}}, \gamma_0)$, кривая 2 — результаты расчетов функции с учетом затенений поверхности — $I_3(\theta_{\text{и}}, \theta_{\text{п}}, \gamma_0)$. На рис. 3, б показана относительная ошибка $\text{Er}(\theta_{\text{и}}, \theta_{\text{п}}, \gamma_0)$, возникающая при неучете затенений ($\text{Er}(\theta_{\text{и}}, \theta_{\text{п}}, \gamma_0) = \frac{|I_{6.3}(\theta_{\text{и}}, \theta_{\text{п}}, \gamma_0) - I_3(\theta_{\text{и}}, \theta_{\text{п}}, \gamma_0)|}{I_{6.3}(\theta_{\text{и}}, \theta_{\text{п}}, \gamma_0)}$).

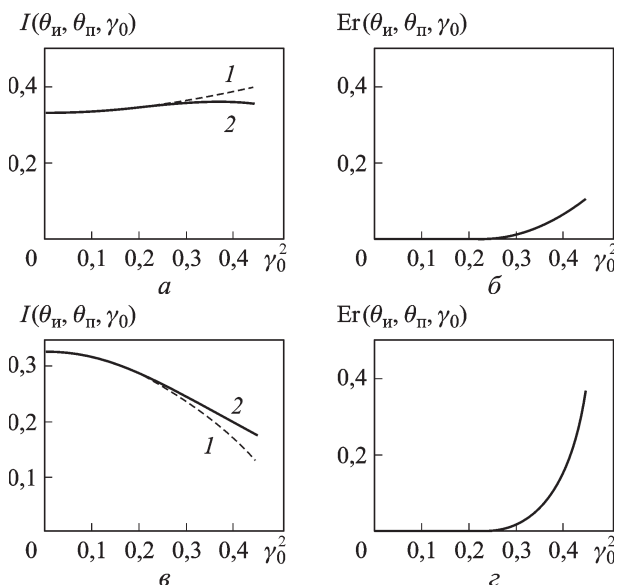


Рис. 3. Зависимость функции $I(\theta_{\text{и}}, \theta_{\text{п}}, \gamma_0)$ от дисперсии наклонов поверхности, когда источник и приемник находятся по одну (а, б) и по разные (в, г) стороны от нормали

Из рис. 3, *а*, *б* видно, что с увеличением γ_0^2 величина \bar{P} возрастает. Физически это объясняется уменьшением в среднем (по мере роста γ_0^2) угла между нормальными к отражающим площадкам на поверхности S (освещенным со стороны источника) и направлением на приемник (в случае, когда источник и приемник находятся по одну сторону от нормали к поверхности). Видно также, что учет затенений довольно слабо влияет на значение принимаемой мощности, уменьшая \bar{P} . Это объясняется следующим образом: когда источник и приемник находятся по одну сторону от нормали к поверхности, возможны три варианта взаимного соотношения углов $90^\circ - \theta_{\text{и}}$, $90^\circ - \theta_{\text{п}}$ и ψ .

1. $\psi < 90^\circ - \theta_{\text{и}}$, $90^\circ - \theta_{\text{п}}$ — в этом случае элемент поверхности освещается со стороны источника и наблюдается со стороны приемника; самозатенения элемента поверхности нет и учет затенений никак не влияет на мощность принимаемого сигнала.

2. $\psi > 90^\circ - \theta_{\text{и}}$, $\psi < 90^\circ - \theta_{\text{п}}$ (или $\psi < 90^\circ - \theta_{\text{и}}$, $\psi > 90^\circ - \theta_{\text{п}}$) — в этом случае (см. рис. 4, *а*) элемент поверхности не освещается со стороны источника, но наблюдается со стороны приемника (или освещается со стороны источника, но не наблюдается со стороны приемника). Если не учитывать самозатенения элемента поверхности, то косинус угла между нормалью n к элементу поверхности и направлением на источник $m_{\text{и}}$ (или косинус угла между нормалью n к элементу поверхности и направлением на приемник $m_{\text{п}}$) становится отрицательным и дает физически бессмысленный отрицательный вклад в принимаемый сигнал. Учет самозатенений устраняет этот физически бессмысленный результат и увеличивает принимаемый сигнал.

3. $\psi > 90^\circ - \theta_{\text{и}}$, $90^\circ - \theta_{\text{п}}$ — в этом случае (см. рис. 4, *б*) элемент поверхности не освещается со стороны источника и не наблюдается со стороны приемника. Если не учитывать самозатенения, то косинусы углов между нормалью n к элементу поверхности и направлениями на источник $m_{\text{и}}$ и приемник $m_{\text{п}}$ становятся оба отрицательными и дают положительный (поскольку в мощность принимаемого сигнала входит их произведение), хотя и физически неправильный результат. Учет самозатенений устраняет этот физически неправильный вклад в принимаемый сигнал и уменьшает принимаемый сигнал.

Совместное действие перечисленных в пунктах 2 и 3 факторов приводит к довольно слабому влиянию учета затенений поверхности.

Ситуация существенно меняется, когда источник и приемник находятся по разные стороны от нормали к поверхности S_0 .

На рис. 3, *в* показана зависимость функции $I(\theta_{\text{и}}, \theta_{\text{п}}, \gamma_0)$ от дисперсии γ_0^2 в условиях слабых затенений, когда источник и приемник находятся по разные стороны от нормали к поверхности S_0 . Расчеты проводились при $\theta_{\text{п}} = 55^\circ$; $\theta_{\text{и}} = -55^\circ$. Обозначения на рис. 3, *в*

те же, что и на рис. 3, *а*. На рис. 3, *з* показана относительная ошибка $\text{Er}(\theta_{\text{и}}, \theta_{\text{п}}, \gamma_0)$, возникающая при неучете затенений.

Из рис. 3, *в* видно, что с увеличением γ_0^2 величина \bar{P} существенно уменьшается. Физически это объясняется увеличением в среднем (по мере роста γ_0^2) угла между нормальными к отражающим площадкам на поверхности S , освещенным со стороны источника, и направлением на приемник (источник и приемник находятся по разные стороны от нормали к поверхности). Учет затенений значительно увеличивает величину \bar{P} . Это объясняется тем (см. рис. 4, *в*), что один и тот же элемент поверхности не может быть самозатенен как со стороны источника, так и со стороны приемника. Поэтому если не учитывать самозатенений поверхности, то они во всех случаях приводят к физически бессмысленному отрицательному вкладу в принимаемый сигнал (т.е. к уменьшению принимаемого сигнала). Учет самозатенений устраняет этот физически бессмысленный результат и увеличивает принимаемый сигнал.

Таким образом, в настоящей работе проведен расчет мощности принимаемого лазерного сигнала при локации случайно-неровной локально-ламбертовской поверхности в условиях слабых затенений. В общей схеме бистатической локации получены аналитические выражения для средней принимаемой мощности локационного сигнала для случаев, когда источник и приемник находятся по одну сторону и по разные стороны от нормали к поверхности. Показано, что влияние неровностей поверхности и самозатенений элементов поверхности на

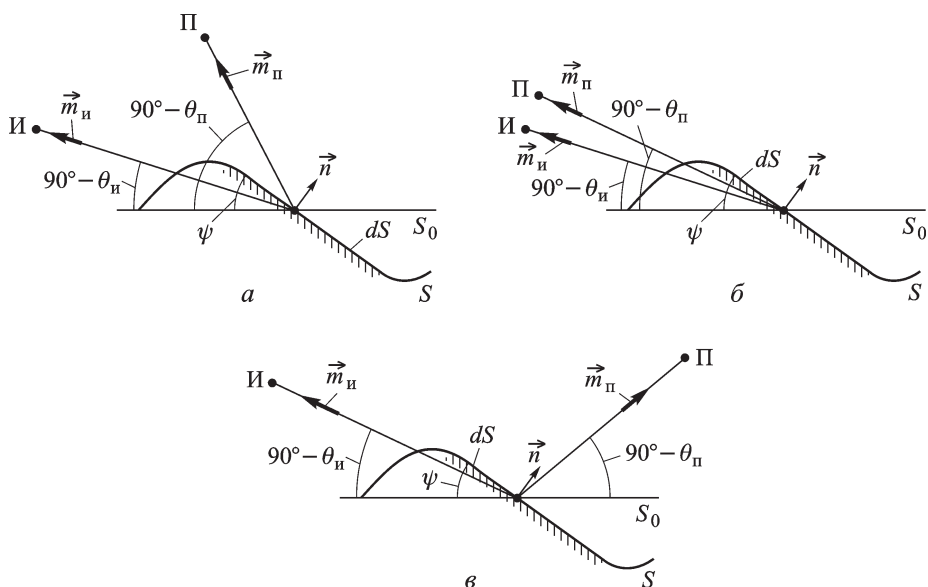


Рис. 4. Взаимное соотношение углов подсвета и приема излучения и угла наклона элемента поверхности, когда источник и приемник находятся по одну (*а*, *б*) и по разные (*в*) стороны от нормали

принимаемую мощность в наибольшей степени проявляется в случае, когда источник и приемник находятся по разные стороны от нормали к поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов М. Л., Городничев В. А., Козинцев В. И. Рассеяние узкого волнового пучка на случайно-неровной локально-диффузной поверхности при импульсном подсвете // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42, № 4. – С. 333–339.
2. Белов М. Л., Козинцев В. И., Стрелков Б. В. Мощность, регистрируемая приемником в сильно рассеивающей среде при облучении лазерным пучком неровной локально диффузной поверхности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2003. – № 3. – С. 12–19.
3. Белов М. Л., Козинцев В. И., Стрелков Б. В. Уравнение лазерной локации неровной поверхности с комбинированной локальной индикатрисой отражения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2003. – № 4. – С. 17–25.
4. 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.
5. Белов М. Л. Модели сигналов лазерных систем, предназначенных для локации земной поверхности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2005. – № 2. – С. 33–39.
6. Орлов В. М., Белов М. Л. Рассеяние узкого оптического пучка на случайно-неровной локально-ламбертовской поверхности в рассеивающей среде // Изв. вузов. Радиофизика. – 2006. – Т. 49, № 2. – С. 141–149.
7. Белов М. Л., Городничев В. А., Козинцев В. И., Стрелков Б. В. Мощность, регистрируемая приемником при облучении лазерным пучком неровной земной поверхности в условиях затенений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2007. – № 2. – С. 82–94.
8. Элементы теории светорассеяния и оптическая локация / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, Г.Г. Матвиенко и др. – Новосибирск: Наука, 1982. – 225 с.
9. Кляцкин В. И. Статистическое описание динамических систем с флуктуирующими параметрами. – М.: Наука, 1975. – 239 с.
10. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. – М.: Наука, 1972. – 424 с.

Статья поступила в редакцию 10.11.2009



Михаил Леонидович Белов родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Московский энергетический институт. Д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной локации и атмосферной оптики.

M.L. Belov (b. 1950) graduated from Moscow Energy Institute in 1973. D. Sc. (Eng.), head researcher of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser location and optics of atmosphere.

Виктор Александрович Городничев родился в 1952 г., окончил в 1976 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Д-р техн. наук, зав. кафедрой “Элементы приборных устройств” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной техники.



V.A. Gorodnichev (b. 1952) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1976. D. Sc. (Eng.), head of “Elements of Instrumental Devices” of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Валентин Иванович Козинцев родился в 1945 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, зам. директора НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной техники.

V.I. Kozintsev (b. 1945) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. D. Sc. (Eng.), Deputy director of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Борис Викторович Стрелков родился в 1947 г., окончил в 1971 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, руководитель НУК РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области лазерной и измерительной техники.



B.V. Strelkov (b.1947), graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. Ph. D. (Eng), chief of “Radioelectronics and Laser Technology” Scientific and Educational Complex of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications in the field of laser and measurement technology.

