

В. К. Х о х л о в, Р. В. Г у р к и н

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭХО-СИГНАЛА ОТ
ЛОЦИРУЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ
БЛИЖНЕЙ ЛОКАЦИИ**

Рассмотрены энергетическая и статистическая модели эхо-сигнала, отраженного от лоцируемой поверхности, применительно к условиям ближней лазерной локации. Лоцируемая поверхность принята ламбертовой, находится на расстояниях от 5 до 10 м, схема излучателя и приемника принята моностатической с эффективными углами приемной и передающей апертур от 1 до 3 градусов. Получены зависимости эхо-сигнала от параметров локатора и угла локации при произвольном расположении неоднородностей в пятне подсвета. Предложен способ формирования каналов для многоканальных адаптивных алгоритмов измерения дальности. Вычислены статистические характеристики амплитуд в каналах, характеризующих степень их взаимосвязи. Приведены зависимости коэффициента частной начальной регрессии амплитуд в каналах от параметров ортогональных стробов. Для конкретных параметров локатора приведены статистические характеристики амплитуд в каналах при случайном угле подхода. Полученные результаты могут быть использованы при синтезе оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов обработки импульсных сигналов.

В условиях ближней импульсной оптической локации поверхности на фоне помехи обратного рассеяния для измерения дальности необходимо использовать адаптивный алгоритм обработки импульсного сигнала, который в сложной помеховой обстановке (наличии случайной формы и пространственной ориентации отражающей поверхности) будет осуществлять измерение дальности. При всех перечисленных условиях использование стандартного метода корреляционной обработки, оперирующего централизованными оценками параметров, неприемлемо, так как сигнал имеет случайный характер. Для синтеза алгоритма измерения дальности необходимо располагать энергетической и статистической моделью сигнала наблюдаемого на выходе фотоприемного устройства.

При проектировании оптических локационных систем приходится сталкиваться с определением энергетических характеристик сигналов, отраженных от лоцируемой поверхности с учетом свойств трассы локации. В случае замутнения атмосферы явление рассеивания света существенно сказывается не только на мощности, но и на угловой и пространственной структуре светового пучка. При импульсной локации на параметры сигнала оказывают также влияние форма и пространственная ориентация отражающей поверхности. При синтезе оптимальных и

квазиоптимальных алгоритмов обнаружения сигнала и оценки параметров необходимо иметь единую статистическую модель сигнала. Таким образом, целью работы является получение модели сигнала на выходе фотоприемного устройства с учетом особенностей и допущений, свойственных системам ближней локации.

В работах [1, 2] исследуются характеристики отраженного оптического импульсного сигнала в схеме с разнесенными в пространстве источником и приемником при локации плоской неоднородной ламбертовой поверхности. При этом рассматривается случай присутствия одной неоднородности, расположенной в центре пятна подсвета. С учетом предложенного в [1] подхода для энергетической модели сигнала получены результаты в случае большого числа неоднородностей малых угловых размеров или одной крупной неоднородности, расположенных произвольным образом внутри пятна подсвета.

Рассмотрим распределение освещенности в плоскости изображения оптической системы при импульсном облучении плоской неоднородной ламбертовой поверхности.

Геометрия зондирования и система координат показаны на рис. 1.

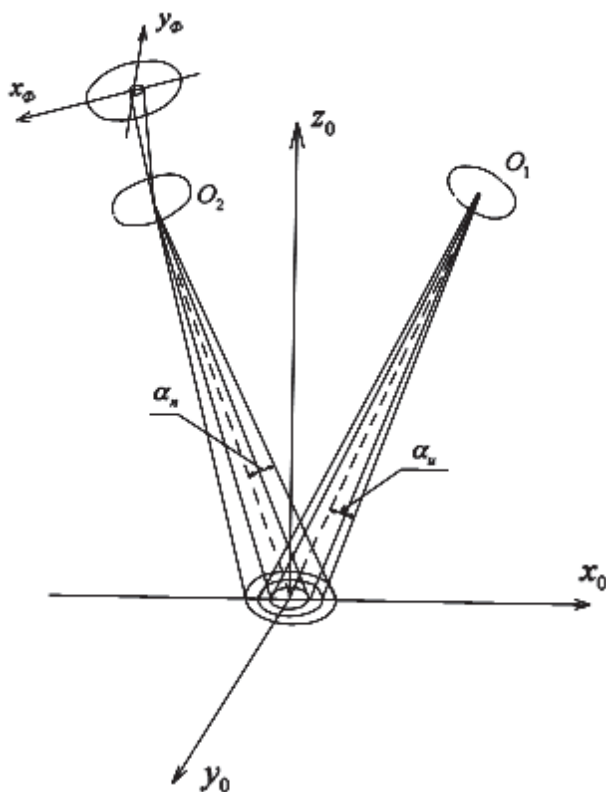


Рис. 1. Схема локации поверхности

Так как в датчике дальности обычно база прибора жестко лимитируется и существенно меньше рабочих дальностей до лоцируемой поверхности, то схема зондирования при расчетах сигнала, отраженного от поверхности земли, принята моностатической (т.е.излучатель и приемник совмещены в пространстве). Однако полученные ниже результаты легко обобщаются и на случай бистатической схемы локации. На рис. 1 источник и приемник расположены в точках O_1 и O_2 . В [1] показано, что в приближении малых углов структура освещенности фотоприемника в моностатической схеме локации определяется соотношением

$$E(\vec{r}_\phi, t) = \int \frac{\rho(\vec{r}_o)}{\pi} E_n(\vec{r}_o) E_n(\vec{r}'_\phi, \vec{r}_o) \delta\left(t - \frac{2R}{c}\right) d^2r_o,$$

где $\vec{r}_o = \{x_o, y_o\}$ и $\vec{r}_\phi = \{x_\phi, y_\phi\}$ — вектора на отражающей поверхности и в плоскости изображения соответственно; \vec{r}'_ϕ — проекция вектора $\vec{r}_\phi \frac{R}{F}$ на отражающую поверхность; R — текущее расстояние от точки отражения до источника или приемника; F — фокусное расстояние приемной оптики; $\rho(\vec{r}_o)$ — коэффициент яркости оптически неоднородной лоцируемой поверхности.

В [1] также указывается, что освещенности от действительного и “фиктивного” источников в плоскостях, перпендикулярных их оптическим осям, равны соответственно

$$E_n(\vec{r}_{1\perp}) = \int_{-\infty}^{\infty} B_n(\vec{r}_{1\perp} - \vec{n}_{1\perp}z, \vec{n}_{1\perp}) \exp\left(-\int_0^R \sigma(z)dz\right) d^2n_{1\perp}, \quad (1)$$

$$E_n\left(\vec{r}_\phi \frac{R}{F}, \vec{r}_{2\perp}\right) = \int_{-\infty}^{\infty} g_n(\vec{r}_{2\perp} - \vec{n}_{2\perp}z) S(\vec{r}_{2\perp} - \vec{n}_{2\perp}F) \exp\left(-\int_0^R \sigma(z)dz\right) d^2n_{1\perp} \quad (2)$$

и связаны с освещенностями $E_n(\vec{r}_o)$ и $E_n(\vec{r}'_\phi, \vec{r}_o)$ в плоскости лоцируемой поверхности только геометрическими соотношениями.

В выражениях (1) и (2) $\vec{r}_{1\perp}$ и $\vec{r}_{2\perp}$ вектора в плоскостях, параллельных приемной и передающей апертурам; $\vec{n}_{1\perp}$ и $\vec{n}_{2\perp}$ вектора, характеризующие направления распространения излучаемой и принимаемой энергии. Среда предполагается оптически неоднородной вдоль трассы локации R . Если, например, среда неоднородна в направлении оси z_0 и выполняется условие однородности горизонтальной стратификации, то

множители ослабления записываются в виде $\exp\left(-\int_0^{R \cos \theta} \sigma(z_0) \frac{dz_0}{\cos \theta}\right)$, где σ — коэффициент рассеяния.

Обозначим $B_{\text{и}}$ — яркость излучения на выходе источника; $g_{\text{п}}$ — прозрачность апертуры приемника; S — функцию размытия точки приемным объективом и аппроксимируем их функциями

$$B_{\text{и}}(\vec{r}_{1\perp}, \vec{n}_{1\perp}) = \frac{P_0}{\pi \alpha_{\text{и}}^2 r_{\text{и}}^2} \exp\left(-\frac{r_{1\perp}^2}{r_{\text{и}}^2} - \frac{n_{1\perp}^2}{\alpha_{\text{и}}^2}\right);$$

$$g_{\text{п}}(\vec{r}_{2\perp}) = \exp\left(-\frac{r_{2\perp}^2}{r_{\text{п}}^2}\right); \quad S(\vec{r}_{\phi}) = \frac{1}{\pi r_k^2} \exp\left(-\frac{r_{\phi}^2}{r_k^2}\right),$$

удовлетворяющими условиям нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} B_{\text{и}}(\vec{r}_{1\perp}, \vec{n}_{1\perp}) d^2 r_{1\perp} d^2 n_{1\perp} = P_0;$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} g_{\text{п}}(\vec{r}_{2\perp}) d^2 r_{2\perp} = \pi r_{\text{п}}^2; \quad \int_{-\infty}^{\infty} S(\vec{r}_{\phi}) d^2 r_{\phi} = 1,$$

где P_0 — мощность, излучаемая источником; $\alpha_{\text{и}}$ — эффективный угол расходимости светового излучения; $r_{\text{и}}$ и $r_{\text{п}}$ — эффективные радиусы апертур источника и приемника; r_k — эффективный радиус кружка размытия оптики. При этих аппроксимациях из выражений (1) и (2) получим соотношения для освещенности от действительного и “фиктивно-го” источников в плоскости лоцируемой поверхности

$$E_{\text{и}}(x_0, y_0) = \frac{P_0 \cos \theta \exp\left(-\int_0^R \sigma(z) dz\right)}{\pi \alpha_{\text{и}x} \alpha_{\text{и}y} R^2} \exp\left\{-\frac{x_0^2 \cos^2 \theta}{\alpha_{\text{и}x}^2 R^2} - \frac{y_0^2}{\alpha_{\text{и}y}^2 R^2}\right\}, \quad (3)$$

$$E_{\text{п}}(x_0, y_0) = \frac{r_{\text{п}}^2 \cos \theta \exp\left(-\int_0^R \sigma(z) dz\right)}{\pi \alpha_{\text{п}x} \alpha_{\text{п}y} R^2} \times$$

$$\times \exp\left\{-\frac{\left[x_{\phi} \frac{R}{F} - x_0 \cos \theta\right]^2}{\alpha_{\text{п}x}^2 F^2 R^2} - \frac{\left[y_{\phi} \frac{R}{F} - y_0\right]^2}{\alpha_{\text{п}y}^2 F^2 R^2}\right\}. \quad (4)$$

Здесь $\alpha_{ix}, \alpha_{iy}, \alpha_{ix}, \alpha_{iy}$ — эффективные углы расходимости светового излучения и поля зрения излучателя и приемника в плоскостях x_0Oz_0 и y_0Oz_0 .

При отражении излучения от произвольных точек внутри пятна подсвета возникает разность хода по сравнению с центральной точкой, определяемая приближенным соотношением

$$R'' \approx R + x_0 \sin \theta. \quad (5)$$

С использованием соотношений (3)–(5) получим

$$E(x_\phi, y_\phi, t') = \frac{P_0 r_n^2 \cos \theta \exp(-2\tau)}{\pi^2 \alpha_{ix} \alpha_{iy} r_k^2 R^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x_0, y_0) \times$$

$$\times \exp \left\{ -\frac{[x_0 R - x_0 F \cos \theta]^2}{\left(\frac{r_k}{F}\right)^2 F^2 R^2} - \frac{x_0^2 \cos^2 \theta}{\alpha_{ix}^2 R^2} - \frac{y_0^2}{\alpha_{iy}^2 R^2} - \frac{[y_\phi R - y_0 F]^2}{\left(\frac{r_k}{F}\right)^2 F^2 R^2} \right\} \times$$

$$\times \delta\left(t' - \frac{2x_0 \sin \theta}{c}\right) dx_0 dy_0, \quad (6)$$

где $t' = t - \frac{2R}{c}$ и $\tau = \exp\left(-\int_0^R \sigma(z) dz\right)$ — оптическая толщина на расстоянии R .

Для оценки влияния неоднородности атмосферы на структуру эхосигнала в плоскости изображения оптической системы представим коэффициент яркости поверхности в виде суммы однородной и неоднородной составляющих

$$\rho(x_0, y_0) = \rho_\phi + \Delta\rho \exp\left[-\frac{(x_0 - a)^2}{V_x^2 R^2} - \frac{(y_0 - b)^2}{V_y^2 R^2}\right], \quad (7)$$

где V_x, V_y — видимые из точки O_1 эффективные размеры неоднородности; $\Delta\rho = \rho_n - \rho_\phi$ — разность между коэффициентами яркости неоднородности ρ_n и окружающего фона ρ_ϕ ; a, b — линейные смещения центра неоднородности в системе координат (x_0, y_0, z_0) относительно начала координат. Соотношение (6) с учетом формулы (7) принимает вид

$$\begin{aligned}
E(x_\phi, y_\phi) &= \\
&= \frac{P_0 r_k^2 \cos \theta \exp(-2\tau)}{\pi^2 \alpha_{nx} \alpha_{ny} r_k^2 R^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \rho_\phi + \Delta \rho \exp \left[-\frac{(x_0 - a)^2}{V_x^2 R^2} - \frac{(y_0 - b)^2}{V_y^2 R^2} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{[x_\phi R - x_0 F \cos \theta]^2}{\left(\frac{r_k}{F}\right)^2 F^2 R^2} - \frac{x_0^2 \cos^2 \theta}{\alpha_{nx}^2 R^2} - \frac{y_0^2}{\alpha_{nx}^2 R^2} - \frac{[y_\phi R - y_0 F]^2}{\left(\frac{r_k}{F}\right)^2 F^2 R^2} \right] \right\} \times \\
&\quad \times \delta \left(t' - \frac{2x_0 \sin \theta}{c} \right) dx_0 dy_0. \quad (8)
\end{aligned}$$

Далее, используя фильтрующее свойство δ -функции и проводя интегрирование по y_0 , из соотношения (8) получим для неоднородной составляющей E_n следующее выражение:

$$\begin{aligned}
E_n(x_\phi, y_\phi, t') &= \\
&= \frac{P_0 c}{\sqrt{\pi}} E_n^h(x_\phi, y_\phi) \exp \left\{ -\frac{1}{\beta^2} \left[ct' - m \left(\frac{aF \left(\frac{r_k}{F}\right)^2}{V_x^2 R \cos \theta} + x_\phi \right) \right]^2 \right\}. \quad (9)
\end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned}
E_n^h(x_\phi, y_\phi) &= \\
&= \frac{\Delta \rho r_k^2 \cos \theta V_y V_x \exp(-2\tau)}{\pi R^2 [(\alpha_{ny}^2 + V_y^2)(\alpha_{nx}^2 + V_x^2 \cos^2 \theta)]^{\frac{1}{2}} \tilde{b}_x \tilde{b}_y F^2} \exp \left\{ -\frac{x_\phi^2}{\tilde{b}_x^2 F^2} - \frac{y_\phi^2}{\tilde{b}_y^2 F^2} \right. \\
&\quad - \frac{a^2 \cos^2 \theta \left[\left(\frac{r_k}{F}\right)^2 + \alpha_{nx}^2 \right]}{R^2 \tilde{b}_x^2 (\alpha_{nx}^2 + V_x^2 \cos^2 \theta)} + \frac{2a \cos \theta \alpha_{nx}^2 x_\phi}{(\alpha_{nx}^2 + V_x^2 \cos^2 \theta) \tilde{b}_x^2 F R} \\
&\quad \left. - \frac{b^2 \left[\left(\frac{r_k}{F}\right)^2 + \alpha_{ny}^2 \right]}{R^2 \tilde{b}_y^2 (\alpha_{ny}^2 + V_y^2 \cos^2 \theta)} + \frac{2b \alpha_{ny}^2 y_\phi}{(\alpha_{ny}^2 + V_y^2) \tilde{b}_y^2 F R} \right\}, \\
\tilde{b}_y &= \frac{r_k}{F} \left\{ 1 + \frac{V_y \alpha_{ny}^2 F^2}{(\alpha_{ny}^2 + V_y^2) r_k^2} \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad \tilde{b}_x = \frac{r_k}{F} \left\{ 1 + \frac{V_x \alpha_{nx}^2 \cos^2 \theta F^2}{(\alpha_{nx}^2 + V_x^2) r_k^2} \right\}^{\frac{1}{2}}; \\
\beta &= \frac{2 \sin \theta V_x R \alpha_{nx} r_k}{F \tilde{b}_x (\alpha_{nx}^2 + V_x^2 \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}}}; \quad m = \frac{\beta^2 \cos \theta F}{2R r_k^2 \sin \theta}.
\end{aligned}$$

Принятые ранее обозначения имеют определенный физический смысл. Так $E_{\text{н}}^{\text{н}}$ — распределение освещенности в плоскости фотоприемника, создаваемое световым потоком, отраженным от площадки углового размера $\nu = \{v_x, v_y\}$ при ее непрерывном облучении источником единичной мощности; \tilde{b}_x и \tilde{b}_y — эффективные размеры изображения неоднородности; β — эффективная длительность (протяженность) эхо-сигнала от неоднородности при локации поверхности δ -импульсом; m — коэффициент, учитывающий влияние параметров датчика дальности и неоднородности отражающей поверхности на мгновенный профиль освещенности.

Если зондирующий импульс имеет конечную длительность и аппроксимируется, например, гауссоидой $f^2(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{4t'^2}{\tau_{\text{эф}}^2}\right)$, нормированной условием $\int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt = \tau_{\text{эф}}$, где $\tau_{\text{эф}}$ — эффективная длительность зондирующего импульса конечной длительности, то путем использования операции свертки получим

$$E_{\text{н}}(x_{\phi}, y_{\phi}, t') = \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{н}}(x_{\phi}, y_{\phi}, \tau) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{4(t' - \tau)^2}{\tau_{\text{эф}}^2}\right) d\tau =$$

$$= \frac{2P_0 E_{\text{н}}^{\text{н}} c\tau_{\text{эф}}}{\sqrt{\pi} [(c\tau_{\text{эф}})^2 + (2\beta)^2]^{\frac{1}{2}}} \exp\left\{-\frac{4\left[ct' - m\left(\frac{aF\left(\frac{r_k}{F}\right)^2}{V_x^2 R \cos\theta} + x_{\phi}\right)\right]^2}{(c\tau_{\text{эф}})^2 + (2\beta)^2}\right\}. \quad (10)$$

Примем функцию распределения относительной чувствительности фотоприемника по координатам гауссовой

$$g(x_{\phi}, y_{\phi}) = \exp\left\{-\frac{x_{\phi}^2}{l_x^2} - \frac{y_{\phi}^2}{l_y^2}\right\}, \quad (11)$$

где l_x, l_y — эффективные размеры чувствительной площадки. Из выражения (10) с учетом формулы (11) после интегрирования нетрудно получить соотношение для расчета амплитуды и формы сигнала, отраженного от неоднородной поверхности в моностатической схеме локации:

$$P_{\text{н}}(t) = \frac{P_0 c\tau_{\text{эф}}}{\sqrt{\pi} \left[(c\tau_{\text{эф}})^2 + (2\beta)^2 + \left(2ml_x \frac{r_k}{F\alpha_{\text{пн}x}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \times$$

$$\begin{aligned}
& \times \frac{\Delta\rho \cos^2 \theta \exp(-2\tau) V_x V_y l_x l_y}{R^2 [(\alpha_{ny}^2 + V_y^2) (\alpha_{nx}^2 + V_x^2 \cos^2 \theta) (r_k^2 + l_x^2) (r_k^2 + l_y^2)]^{\frac{1}{2}}} \times \\
& \times \left[1 + \frac{V_y^2 \alpha_{ny}^2}{\alpha_{ny}^2 (\alpha_{ny}^2 + V_y^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{V_x^2 \cos^2 \theta \alpha_{ux}^2}{\alpha_{nx}^2 (\alpha_{ux}^2 + V_x^2 \cos^2 \theta)} \right]^{\frac{1}{2}} \times \\
& \times \exp \left\{ -\frac{b^2}{R^2 \tilde{b}_y^2 \tilde{b}_{y1}^2 (\alpha_{ny}^2 + V_y^2)} \left[(\alpha_{ny}^2 + \alpha_{py}^2) \tilde{b}_{y1}^2 - \left(\frac{l_y}{F}\right)^2 \right. \right. \\
& \quad \times \left. \left. \left(\tilde{b}_{y1} + \frac{\alpha_{uy}^4}{\alpha_{uy}^2 + V_y^2} \right) \right] - \frac{a^2 \cos^2 \theta}{R^2 \tilde{b}_x^2 \tilde{b}_{x1}^2 (\alpha_{nx}^2 + V_x^2 \cos^2 \theta)} \right. \\
& \quad \times \left. \left[(\alpha_{nx}^2 + \alpha_{px}^2) \tilde{b}_{x1}^2 \right] - \left(\frac{l_x}{F}\right)^2 \right. \times \\
& \quad \times \left. \left. \left(\tilde{b}_{x1}^2 + \frac{\alpha_{nx}^2 [(c\tau_{\text{эф}})^2 + (2\beta)^2]}{(\alpha_{nx}^2 + V_x^2 \cos^2 \theta) [(c\tau_{\text{эф}})^2 + (2\beta)^2 + \left(2ml_x \frac{r_k}{F \alpha_{px}}\right)^2]} \right) \right] \right\} \times \\
& \times \exp \left\{ -\frac{4(ct' - md)}{[(c\tau_{\text{эф}})^2 + (2\beta)^2 + \left(2ml_x \frac{r_k}{F \alpha_{px}}\right)^2]} \right. \times \\
& \times \left. \left[ct' - md \left(1 - \frac{8 \cos^2 \theta l_x^2 \alpha_{nx}^2 V_x^2}{\left(\frac{r_k}{F}\right)^2 (\alpha_{nx}^2 + V_x^2 \cos^2 \theta) \tilde{b}_{x1}^2 F^2} \right) \right] \right\}, \quad (12)
\end{aligned}$$

$$\tilde{b}_{y1} = \alpha_{ny} \left[1 + \frac{V_y^2 \alpha_{ny}^2}{\alpha_{ny}^2 (\alpha_{ny}^2 + V_y^2)} \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$\tilde{b}_{x1} = \alpha_{nx} \left[1 + \frac{V_x^2 \cos^2 \theta \alpha_{nx}^2}{\alpha_{nx}^2 (\alpha_{nx}^2 + V_x^2 \cos^2 \theta)} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Соотношение для однородной составляющей эхо-сигнала можно получить из формулы (12), положив $V_x, V_y \gg \alpha_{nx}, \alpha_{ny}$ и $\Delta\rho = \rho_\phi$, тогда

$$P_{\text{одн}}(t) = \frac{P_0 c \tau_{\text{эф}}}{\sqrt{\pi} \left[(c \tau_{\text{эф}})^2 + (2\beta_0)^2 + \left(2m_0 l_x \frac{r_k}{F \alpha_{\text{пх}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{\alpha_{\text{н}}^2}{\alpha_{\text{п}}^2} \right)} \times$$

$$\times \frac{\rho_{\phi} r_{\text{н}}^2 \cos \theta l_x l_y \exp(-2\tau)}{R^2 \sqrt{(r_k^2 + l_x^2) (r_k^2 + l_y^2)}} \times$$

$$\times \exp \left\{ - \frac{4(ct')}{\left[(c \tau_{\text{эф}})^2 + (2\beta_0)^2 + \left(2m_0 l_x \frac{\tilde{b}_x}{\tilde{b}_{x1}} \right)^2 \right]} \right\}. \quad (13)$$

В свою очередь мощность эхо-сигнала, отраженного от неоднородной поверхности, определяется суммой $P_{\text{н}}$ и $P_{\text{одн}}$.

С учетом искажений огибающей импульсного сигнала в процессе его преобразования в электрический и усиления в фотоприемном устройстве (ФПУ) получены соотношения для напряжения на выходе ФПУ, на основе чего проводилось математическое моделирование огибающих эхо-сигналов применительно к малогабаритным датчикам дальности НВУ при следующих параметрах сигнала и схемы зондирования: $x_{\delta} = (20 \dots 40)$ мм, $\alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{п}} = (1 \dots 3)$ град., $R_o = (5 \dots 10)$ м, $\tau_{\text{н}} = (10 \dots 100)$ нс при углах локации $\theta = (0 \dots 80)$ град., что соответствует углам подхода к поверхности (90... 10 град.). Результаты моделирования показывают, что даже при скользящих углах локации, максимальных значениях дальности до лоцируемой поверхности ламберта и минимальных значениях длительности зондирующего сигнала временная деформация эхо-сигнала вызывает незначительное падение амплитуды и растяжку отраженных импульсов, что не превышает (4...6) % от значений соответствующих параметров ожидаемых импульсов. Это дает возможность сделать вывод о том, что для рассмотренных моделей сигнала этими факторами можно пренебречь, что упрощает выражения временной структуры эхо-сигналов и позволяет описать их общим выражением

$$u(t) = \frac{P_0 K \rho_{\phi} r_{\text{н}}^2 \alpha_{\text{н}}^2 \cos \theta \exp(-2\tau)}{\sqrt{\pi} R^2 (a_{\text{н}}^2 + \alpha_{\text{п}}^2)} \times$$

$$\times \left\{ 1 + \chi_1 \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \rho_i V_x V_y \cos \theta}{\rho_{\phi} a_{\text{н}}^2} \frac{(a_{\text{н}}^2 + \alpha_{\text{п}}^2)}{\alpha_{\text{н}}^2} \times \right.$$

$$\left. \times \exp \left[- \frac{(\chi_2 \alpha_i^2 \cos^2 \theta + \chi_3 b_i^2) (a_{\text{н}}^2 + \alpha_{\text{п}}^2)}{R^2 \alpha_{\text{н}}^2 \alpha_{\text{п}}^2} \right] \right\} u_{\text{с1}}(t), \quad (14)$$

где $\chi_1 = 0$ для эхо-сигналов от плоской однородной поверхности; $\chi_1 = \chi_2 = \chi_3 = 1$ для эхо-сигналов от плоской неоднородной поверхности с расположенными на ней неоднородностями малых угловых размеров; для эхо-сигналов от плоской неоднородной поверхности с одной неоднородностью больших угловых размеров ($n = 1$)

$$\chi_1 = \frac{V_x V_y \alpha_n^2 \cos \theta}{\left\{ [\alpha_n^2 (\alpha_n^2 + V_y^2) + V_y^2 \alpha_n^2] [\alpha_n^2 (\alpha_n^2 + V_x^2 \cos^2 \theta) + V_x^2 \alpha_n^2 \cos^2 \theta] \right\}^{\frac{1}{2}}},$$

$$\chi_2 = \frac{\alpha_n^2 \alpha_n^2}{[\alpha_n^2 (\alpha_n^2 + V_y^2) + V_y^2 \alpha_n^2]}, \quad \chi_3 = \frac{\alpha_n^2 \alpha_n^2}{[\alpha_n^2 (\alpha_n^2 + V_x^2 \cos^2 \theta) + V_x^2 \alpha_n^2 \cos^2 \theta]}.$$

Функция $u_{c1}(t)$ определяется интегралом Дюамеля

$$u_{c1}(t) = \int_0^t g(\tau) u_{вх}(t - \tau) d\tau,$$

где $u_{вх}(t) = \exp\left(-\frac{4(ct - 2R)^2}{(c\tau_{эф})^2}\right)$, $g(t)$ — импульсная переходная характеристика ФПУ.

На рис. 2 приведены результаты моделирования сигнала, отраженного от однородной поверхности после преобразования ФПУ.

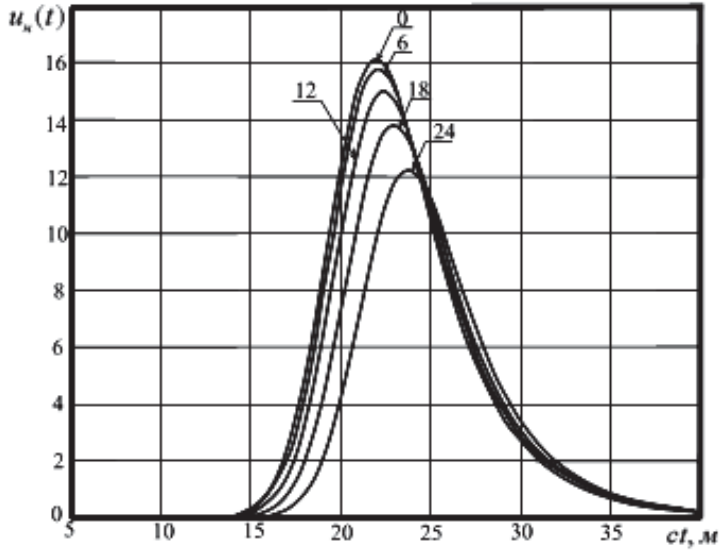


Рис. 2. Нормированная зависимость эхо-сигнала после приема и преобразования ФПУ при различных углах подхода (цифры на графике указаны в градусах): $R = 10 м$, $x_\delta = 2 см$, $\alpha_n = 1^\circ$, $\alpha_n = 1^\circ$

При выводе соотношения (12) были рассмотрены вопросы оценки временной структуры эхо-сигнала при вариациях средних значений параметров оптической среды, геометрии и сигнала зондирования. При

работе датчика дальности в реальной атмосфере в широком диапазоне изменения условий встречи и применения сигнал носит случайный характер.

На основе полученных результатов примем квазидетерминированную модель сигнала, подаваемую с ФПУ на блок вторичной обработки сигнала,

$$u(t) = \sum_i \sum_j x_i u_{cj}(t, \lambda_i), \quad (15)$$

где $x_i u_{cj}(t, \lambda_i)$ набор детерминированных функций со случайными параметрами x_i и λ_i .

Рассмотрим следующий способ формирования двух каналов. На интервале $T_1 \leq t \leq T_1 + \Delta_1$

$$\begin{aligned} y_1(t) &= X_1 u_{c1}(t), & T_1 \leq t \leq T_1 + \Delta_1; \\ y_1(t) &= 0, & t < T_1, \quad t > T_1 + \Delta_1. \end{aligned} \quad (16)$$

На интервале $T_2 \leq t \leq T_2 + \Delta_2$

$$\begin{aligned} y_2(t) &= X_2 u_{c2}(t), & T_2 \leq t \leq T_2 + \Delta_2; \\ y_2(t) &= 0, & t < T_2, \quad t > T_2 + \Delta_2, \end{aligned} \quad (17)$$

где $u_{c1}(t)$, $u_{c2}(t)$, T_1 , T_2 и Δ_1 , Δ_2 — единичные огибающие и временные параметры стробов.

Приближенные оценки для X_1 и X_2 вычисляются по формулам

$$\tilde{X}_1 = \frac{\int_{T_1}^{T_2} y_1(t) u_{c1}(t) dt}{\int_{T_1}^{T_2} u_{c1}^2(t) dt}; \quad \tilde{X}_2 = \frac{\int_{T_3}^{T_4} y_2(t) u_{c2}(t) dt}{\int_{T_3}^{T_4} u_{c2}^2(t) dt}. \quad (18)$$

Рассмотрим корреляцию значений \tilde{X}_1 и \tilde{X}_2 , сформированных предложенным выше способом, при стробах интегрирования, расположенных симметрично относительно истинной измеряемой дальности, и случайных углах подхода. В результате моделирования получено: угол подхода меняется в пределах от -24 до 24 град., коэффициент корреляции равен $0,9$, нормированная дисперсия первого канала равна $0,15$, второго — $0,2$.

В качестве еще одного параметра взаимосвязи между каналами рассмотрим частный коэффициент начальной регрессии амплитуд в каналах \tilde{X}_1 и \tilde{X}_2 [3]. Начальный коэффициент регрессии дает возможность

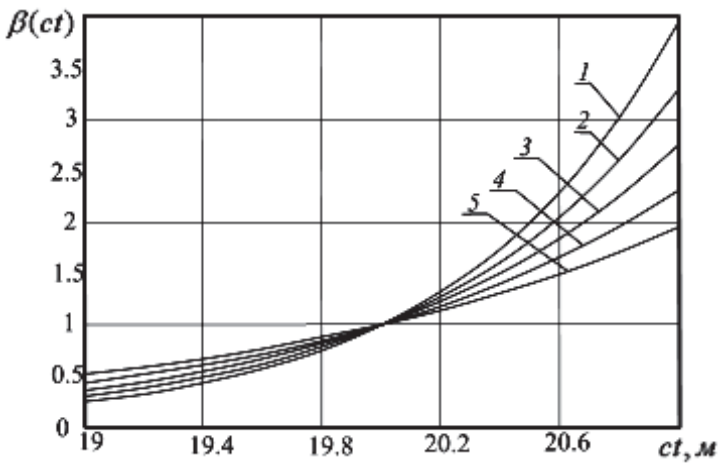


Рис. 3. Зависимость коэффициента регрессии от расстояния между стробами:
 1 — $ct = 2$ м, 2 — $ct = 1,5$ м, 3 — $ct = 1$ м, 4 — $ct = 0,5$ м, 5 — $ct = 0$

предсказания даже при отсутствии ковариации с учетом детерминированной составляющей, что, в частности, полезно использовать в системах ближней локации. Выражение для коэффициента частной начальной регрессии амплитуд в каналах можно представить в виде [3]

$$\beta_{12} = \frac{\sigma_1 \sigma_2 r + \mu_1 \mu_2}{\sigma_2^2 + \mu_2^2}. \quad (19)$$

На рис. 3 представлена зависимость частного начального коэффициента регрессии амплитуд от параметров стробов, формирующих каналы. Видно, что при увеличении длительности между стробами крутизна зависимости частного начального коэффициента регрессии \tilde{X}_1 и \tilde{X}_2 от расположения стробов растет.

На рис. 4 представлена зависимость частного начального коэффициента регрессии амплитуд от ширины стробов, формирующих каналы, из анализа которой можно сделать вывод, что при увеличении расстояния между стробами крутизна зависимости частного начального коэффициента регрессии величин \tilde{X}_1 и \tilde{X}_2 растет.

Выводы. 1. Предложенный способ формирования каналов и рассмотренная зависимость амплитуд в каналах являются основой для синтеза адаптивного алгоритма измерения дальности на фоне помехи обратного рассеяния с возможностью адаптации путем изменения коэффициента регрессии между каналами по информации, полученной на выходе канала, соответствующего наличию только помехи.

2. Предложенная модель для расчета энергетических характеристик эхо-сигналов от лоцируемой поверхности в аэрозольных образованиях учитывает особенности работы датчиков дальности в части неоднородного характера лоцируемой поверхности. Она допускает произвольность размеров неоднородностей и их положения относительно центра

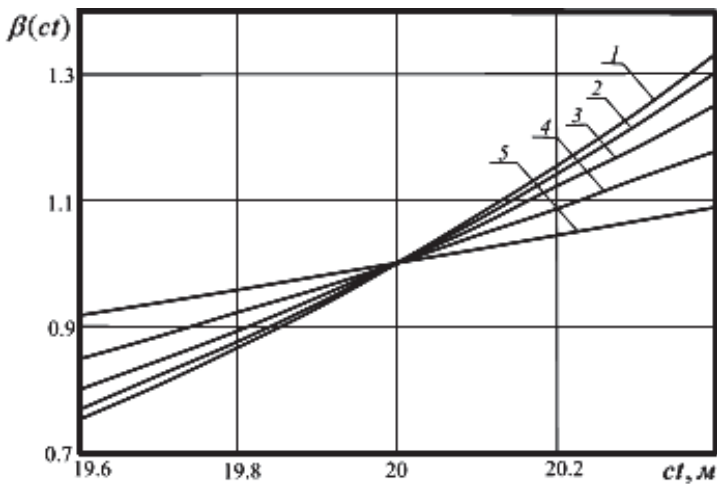


Рис. 4. Зависимость коэффициента регрессии от ширины стробов, формирующих каналы:

1 — $d = 1$ м, 2 — $d = 2$ м, 3 — $d = 3$ м, 4 — $d = 4$ м, 5 — $d = 5$ м

пятна подсвета и учитывает влияние характеристик приемной и передающей оптических систем. Энергетические характеристики в общем виде описываются соотношениями (12) и (13).

3. Получены модели сигналов, отраженных от лоцируемой поверхности, обобщенные для случая моностатической схемы ближней локации. Из результатов моделирования локации ламбертовой поверхности сделан вывод о высокой степени корреляции амплитуд в каналах ($\rho \geq 0,8$) при случайных углах подхода. Предложен способ формирования каналов для многоканального алгоритма измерения дальности. Рассмотрены зависимости коэффициента частной начальной регрессии от параметров стробов, формирующих каналы, а именно, от расположения стробов относительно истинной дальности до лоцируемой поверхности, от ширины стробов и от длительности стробов.

Полученные результаты могут быть использованы при синтезе квазиоптимальных адаптивных алгоритмов измерения дальности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Орлов В. М. Элементы теории светорассеяния и оптической локации / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, Г.Г. Матвиенко и др. Под ред. В.М. Орлова. – М.: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. – 225 с.
- Орлов В. М. Сигналы и помехи в лазерной локации / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, Г.М. Греков и др. Под. ред. Зуева В.М. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
- Мусьяков М. П., Хохлов В. К. Регрессионные системы обнаружения и распознавания случайных сигналов в ближней локации. М.: ЦНИИИТИК, 1988.

Статья поступила в редакцию 2.12.2004



Валерий Константинович Хохлов родился в 1941 г., окончил в 1964 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 150 научных работ в области обработки сигналов в автономных информационных и управляющих системах.

V.K. Khokhlov (b. 1941) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1964. D. Sc. (Eng.), professor, head of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 150 publications in the field of signal processing in autonomous information and control systems.

Роман Владимирович Гуркин родился в 1982 г., окончил в 2005 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Инженер кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области обработки сигналов в системах ближней локации и применения регрессионных и нейросетевых алгоритмов.

R.V. Gurkin (b. 1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2005. Engineer of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of signal processing in systems of near-zone location, applications of regression and neuro-net algorithms.

ЖУРНАЛ “ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА имени Н.Э. БАУМАНА”

В журнале публикуются наиболее значимые результаты фундаментальных и прикладных исследований и совместных разработок, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана и других научных и промышленных организациях.

Журнал “Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана” в соответствии с постановлением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации включен в перечень периодических и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Журнал издается в трех сериях: “Приборостроение”, “Машиностроение”, “Естественные науки”, — с периодичностью 12 номеров в год.

Подписка по каталогу “Газеты, журналы” агентства “Роспечать”

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	150	300
72783	“Приборостроение”	2	150	300
79982	“Естественные науки”	2	150	300

Подписывайтесь и публикуйтесь!

Адрес редакции журнала “Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана”: 105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Тел.: (095) 263-62-60; 263-60-45.

Факс: (095) 265-42-98; 263-67-07.

E-mail: markir@bmstu.ru, press@bmstu.ru