

РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 551.463:535.361

В.Л. Вебер, Л.С. Долин

О Контрасте изображений малоразмерных объектов, наблюдаемых через рассеивающую среду посредством системы с активной подсветкой

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Поступила в редакцию 04.01.99 г.

Принята к печати 04.02.99 г.

Выведены соотношения для расчета контраста изображения подводного объекта при наблюдении через гладкую морскую поверхность при непрерывной и импульсной подсветке. Помеха обратного рассеяния из толщи среды, расположенной ниже объекта, рассчитана с учетом экранирующего действия объекта. Исследована зависимость контраста изображения от характеристик объекта и параметров системы наблюдения. Отмечен эффект немонотонного поведения контраста в зависимости от глубины расположения объекта при малых значениях коэффициента отражения объекта.

Теория подводного видения является в настоящее время хорошо развитой областью оптики моря. Основные ее положения, выводы и рекомендации по оптимальному построению систем наблюдения (СН) сформулированы в [1, 2]. Известно, что качество изображения, характеризующееся такими параметрами, как контраст изображения и отношение сигнал-шум, в существенной степени зависит от соотношения между мощностью полезного сигнала, т.е. мощностью светового излучения, отраженного в направлении СН объектом, и мощностью помехи обратного рассеяния (ПОР), т.е. мощностью излучения, отраженного рассеивающей средой. Если роль помехи, идущей из толщи среды до объекта в процессе формирования его изображения, изучена достаточно полно, то этого нельзя сказать о помехе, идущей из водных слоев, расположенных за объектом. Очевидно, что роль этой составляющей ПОР должна оказаться более существенной при решении задачи обнаружения объекта как целого на фоне среды, нежели при решении более тонкой задачи различения деталей на нем. Сложность расчета мощности «экранированной» ПОР (название условное) заключается в необходимости учета затеняющего действия объекта на водные слои, находящиеся за ним. В данной работе эта задача решается на примере анализа изображения круглого малоразмерного объекта в море, наблюдаемого через гладкую поверхность раздела при непрерывной активной подсветке.

**1. Формула переноса изображения.** На рис. 1 приведена схема наблюдения. Система наблюдения, содержащая источник света яркостью  $B_0$  с апертурной функцией  $D_1(\mathbf{r}_1, \mathbf{\Omega}_1)$ , а также совмещенный с ним приемник изображения с апертурной функцией  $D_2(\mathbf{r}'_1, \mathbf{\Omega}'_1)$ , находящиеся на высоте  $H$  над поверхностью воды, освещает и визирует находящийся в однородной рассеивающей среде на глубине  $h_0$  плоский ограниченный ламбертов объект с распределением коэффициента отражения  $R_0(\mathbf{r}_3)$  (здесь и далее  $\mathbf{r}_i$  – координаты точек в плоскостях  $z_i$ ,  $\mathbf{\Omega}_i$  – проекции единичных векторов  $\mathbf{\Omega}_i^0$  на плоскость  $z = \text{const}$ ).

При ориентации СН на середину объекта мощность принимаемого отраженного сигнала складывается из трех составляющих:

$$P_i = P_{ob} + P_{bs}^0 + P_{bs}^e, \tag{1}$$

где  $P_{ob}$  – мощность излучения, отраженного поверхностью объекта;  $P_{bs}^0$  – мощность помехи обратного рассеяния из толщи среды, расположенной перед объектом;  $P_{bs}^e$  – мощность ПОР из толщи среды, расположенной за объектом (с учетом его экранирующего действия).



Рис. 1. Схема наблюдения

При ориентации СН на область среды вне объекта выражение для принимаемой мощности имеет вид

$$P_{bs} = P_{bs}^0 + P_{bs}^e, \tag{2}$$

где  $P_{bs}^e$  – мощность помехи обратного рассеяния из толщи среды, расположенной за глубиной  $h_0$ .

В работе [3] получено общее выражение для мощности принимаемого от объекта излучения:

$$P_{ob} = \frac{B_0}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} R_0(\mathbf{r}_3) E_1(\mathbf{r}_3) E_2(\mathbf{r}_3) d\mathbf{r}_3, \tag{3}$$

где  $E_{1,2}$  – распределения освещенности на глубине  $h_0$ , создаваемые источниками с апертурными функциями  $D_{1,2}$ :

$$E_{1,2}(\mathbf{r}_3) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{1,2}(\mathbf{r}_3, \mathbf{\Omega}_3, h_0) d\mathbf{\Omega}_3,$$

$$I_1(\bullet) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} D_1(\mathbf{r}_1, \mathbf{\Omega}_1) b_c(\mathbf{r}_2 \rightarrow \mathbf{r}_3, \mathbf{\Omega}_1 \rightarrow \mathbf{\Omega}_3, h_0) \times$$

$$\times \delta(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 - H\mathbf{\Omega}_1) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 d\mathbf{\Omega}_3;$$

функция рассеяния среды  $b_c$  описывает распределение яркости в рассеивающей среде в точке  $\mathbf{r}_3$  в направлении  $\mathbf{\Omega}_3$  при облучении ее точечным мононаправленным источником, находящимся в точке  $\mathbf{r}_2$  и излучающим в направлении  $\mathbf{\Omega}_1$  на расстоянии  $h_0$  от источника; в малоугловом приближении функция среды описывается выражением

$$b_c(\bullet) = b_c(\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2 - h_0\mathbf{\Omega}_1, \mathbf{\Omega}_3 - \mathbf{\Omega}_1, h_0)$$

(для простоты эффекты преломления на границе раздела воздух–вода не учитываются).

Запишем пространственно-угловой спектр распределения яркости  $I_1$ :

$$F_1^0(\mathbf{k}, \mathbf{p}, h_0) = F_1(\mathbf{k}, \mathbf{p} + \mathbf{k}L_0) F_b(\mathbf{k}, \mathbf{p}, h_0), \quad (4)$$

где  $F_1, F_b$  – Фурье-образы функций  $D_1, b_c$ ;  $L_0 = H + h_0$  (аналогичным образом описывается спектр распределения яркости  $I_2$  для приемника – с заменой индекса 1 на 2).

Выражение (3) можно записать в «частотной» форме:

$$P_{\text{об}} = \frac{B_0}{\pi} (2\pi)^{-4} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F_0(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2) \times$$

$$\times F_{E_1}(\mathbf{k}_1, h_0) F_{E_2}(\mathbf{k}_2, h_0) d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2, \quad (5)$$

где  $F_0, F_{E_1}, F_{E_2}$  – Фурье-образы функций  $R_0, E_1, E_2$ ,

$$F_{E_{1,2}}(\mathbf{k}, h_0) \equiv F_{1,2}^0(\mathbf{k}, 0, h_0) = F_{1,2}(\mathbf{k}, \mathbf{k}L_0) F_c(\mathbf{k}, h_0),$$

$$F_c(\mathbf{k}, h_0) = F_b(\mathbf{k}, 0, h_0),$$

функция  $F_c$  описывает частотно-контрастную характеристику (ЧКХ) водного слоя толщиной  $h_0$ .

Для проведения дальнейших расчетов необходимо конкретизировать вид входящих в (3)–(5) оптических передаточных функций среды, объекта, источника света и фотоприемника СН.

**2. Модели источника, приемника, среды и объекта.** В качестве оптических передаточных функций источника и приемника воспользуемся гауссовыми функциями

$$F_{1,2}(\mathbf{k}, \mathbf{p}) = \Sigma_{1,2} \Delta_{1,2} \exp[-(\Sigma_{1,2} k^2 + \Delta_{1,2} p^2)/4\pi], \quad (6)$$

где  $\Sigma_{1,2}$  – площадь апертуры источника (приемника);  $\Delta_{1,2}$  – телесный угол излучения (приема).

В качестве оптической передаточной функции рассеивающей толщи воды  $F_b$  воспользуемся Фурье-образом автоматического решения уравнения переноса излучения для распределения яркости в поперечном сечении узкого пучка света в среде с сильно анизотропным рассеянием [4]:

$$F_b(\mathbf{k}, \mathbf{p}, h_0) = A_0 \exp(-\kappa h_0) \exp[-(G_0 k^2 + 2B_0 \mathbf{k} \mathbf{p} + Q_0 p^2)/4\pi], \quad (7)$$

где

$$A_0 = 1/\text{ch}\zeta_0; \quad G_0 = 4\pi(\zeta_0 - \text{th}\zeta_0)/\kappa^2 \Omega_\infty;$$

$$B_0 = 2\pi(1 - A_0)/\kappa; \quad Q_0 = \pi\Omega_\infty \text{th}\zeta_0,$$

$$\zeta_0 = 0,5 \Omega_\infty \kappa h_0; \quad \Omega_\infty = \sqrt{2\sigma\bar{\gamma}^2/\kappa},$$

$\sigma$  – коэффициент рассеяния воды;  $\kappa$  – коэффициент поглощения;  $\bar{\gamma}^2$  – дисперсия индикатрисы рассеяния.

Аппроксимируя функцию распределения коэффициента отражения на объекте гауссовой формой, получим ее Фурье-образ в виде

$$F_0(\mathbf{k}) = R_0 \Sigma_0 \exp(-\Sigma_0 k^2/4\pi), \quad (8)$$

где  $R_0$  – коэффициент отражения;  $\Sigma_0$  – площадь объекта.

**3. Мощность сигнала от объекта.** Подставляя соотношения (6)–(8) в выражение (5), получим в результате несложных выкладок следующее выражение для мощности сигнала от объекта:

$$P_{\text{об}} = P_0 \Sigma_2 \frac{\Delta_2}{\pi} R_0 \exp(-2\kappa h_0) \frac{A_0 \Sigma_0}{S_0(S_1^0 + S_2^0)}, \quad (9)$$

где  $P_0 = B_0 \Sigma_1 \Delta_1$  – мощность излучения;

$$S_0 = \Sigma_0 + \frac{S_1^0 S_2^0}{S_1^0 + S_2^0}, \quad S_{1,2}^0 = \Sigma_{1,2} + \Delta_{1,2} L_0^2 + G_0.$$

**4. Мощность ПОР из толщи среды до объекта.** Выражение для  $P_{\text{бс}}^0$  нетрудно получить, исходя из формулы для  $P_{\text{об}}$ . Для этого в формуле (9) необходимо произвести замены:  $h_0 \rightarrow h$ ,  $R_0 \rightarrow \rho_b dh$ , где  $\rho_b = \sigma_\pi/4$  – коэффициент обратного рассеяния среды, затем использовать предельный переход  $\Sigma_0 \rightarrow \infty$  и провести интегрирование полученного выражения в пределах от 0 до  $h_0$ . В результате этих преобразований получим следующее выражение для мощности помехи из толщи среды до объекта:

$$P_{\text{бс}}^0 = P_0 \Sigma_2 \frac{\Delta_2}{\pi} \rho_b \int_0^{h_0} \exp(-2\kappa h) \frac{A^2}{S_1 + S_2} dh, \quad (10)$$

где параметры  $A, G, S_{1,2}$  описываются аналогичным (7), (9) образом с той лишь разницей, что здесь они зависят от «текущей» глубины  $h$ .

**5. Мощность ПОР из толщи среды за объектом.** Наметим основные пути нахождения мощности ПОР из слоев, расположенных за объектом с учетом его экранирующего действия на падающее световое поле. Для решения задачи необходимо пересчитать мощность излучения источника на плоскость, в которой расположен объект, затем умножить полученное распределение яркости на функцию пропускания объекта, определить освещенность от этого виртуального источника на произвольной глубине ниже объекта и проинтегрировать произведение освещенностей от источника и приемника по всему рассеивающему объему.

Выражение для пространственно-углового спектра распределения яркости, создаваемого источником на глубине  $h_0$ , определено (4). Пространственный спектр освещенности

шенности от виртуального источника  $F_1^0$  на расстоянии  $h$  от него с учетом экранирующего действия объекта описывается выражением

$$F_{E_1}(\mathbf{k}, h) = F_e(\mathbf{k}, h) (2\pi)^{-2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F_1(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{k}h + \boldsymbol{\omega}L_0) F_b(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{k}h, h_0) \times \\ \times F_{\text{об}}(\mathbf{k} - \boldsymbol{\omega}) d\boldsymbol{\omega}, \quad (11)$$

где пространственный спектр функции пропускания объекта

$$F_{\text{об}}(\mathbf{k}) = (2\pi)^{-2} \delta(\mathbf{k}) - \sum_0 \exp(-\sum_0 k^2/4\pi).$$

Аналогичным образом описывается спектр распределения освещенности, создаваемого приемником, с заменой индексов 1 на 2.

Выражение для мощности ПОР из толщи среды за объектом имеет следующий вид:

$$P_{\text{bs}}^e = \int_0^{\infty} p(h) dh, \quad (12)$$

где

$$p(h) = \frac{P_b}{\pi} (2\pi)^{-2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F_{E_1}(\mathbf{k}, h) F_{E_2}(\mathbf{k}, h) d\mathbf{k}. \quad (13)$$

Подставляя в (13) соотношения (6), (7), (11), получим в результате громоздких, но, по сути, несложных выкладок выражение для дифференциальной ПОР из толщи среды за объектом:

$$p(h) = P_0 \sum_2 \frac{\Delta_2}{\pi} \rho_b \exp[-2\kappa(h + h_0)] A^2 A_2^0 \Phi(h), \quad (14)$$

где

$$\Phi(h) = \frac{1}{\psi_1^0 + \psi_2^0} + \frac{\sum_0}{S_1 + \sum_0} \frac{\sum_0}{S_2 + \sum_0} \frac{1}{\psi_1 + \psi_2} - \frac{\sum_0}{S_1 + \sum_0} \frac{1}{\psi_1 + \psi_2^0} - \\ - \frac{\sum_0}{S_2 + \sum_0} \frac{1}{\psi_1 + \psi_2^0};$$

$$\psi_{1,2} = \Delta_{1,2} h^2 + Q_0 h^2 + \sum_0 - (\Delta_{1,2} L_0 h + B_0 h - \sum_0)^2 / (S_{1,2}^0 + \sum_0) + G,$$

$$\psi_{1,2}^0 = \sum_{1,2} + \Delta_{1,2} (L_0 + h)^2 + G_0 + 2B_0 h + Q_0 h^2 + G.$$

Отметим, что переменные  $A_0$ ,  $G_0$ ,  $B_0$ ,  $Q_0$  зависят от глубины расположения объекта  $h_0$ , а переменные  $A$ ,  $G$  – от «текущей» глубины  $h$ , отсчитываемой от объекта.

Выражение для мощности ПОР  $P_{\text{bs}}^e$  из толщи среды, расположенной за глубиной расположения объекта (в отсутствие последнего), получается из (11), (13) путем приравнивания площади объекта  $\sum_0$  нулю.

**6. Контраст изображения объекта.** Формула для определения контраста изображения объекта на фоне среды записывается следующим образом:

$$K = \frac{P_i - P_{\text{bs}}}{P_i + P_{\text{bs}}}.$$

Это выражение можно записать в преобразованной форме:

$$K = K_i / (1 + P_{\text{bs}}^0 / \bar{P}), \quad (15)$$

где  $K_i = \Delta P / \bar{P}$ ;  $\Delta P = 0,5(P_{\text{об}} + P_{\text{bs}}^e - P_{\text{bs}}^0)$ ;  $\bar{P} = 0,5(P_{\text{об}} + P_{\text{bs}}^e + P_{\text{bs}}^0)$ . Отсюда видно, что величина  $K_i$  определяет контраст изображения объекта без учета помехи  $P_{\text{bs}}^0$  из толщи среды до объекта.

Для более ясного понимания физического содержания полученных ниже результатов выразим контраст изображения не через мощности излучения, а через некоторые эффективные коэффициенты отражения, для чего предварительно введем мощность сигнала  $P_{\text{об}}^e$ , полученного от безграничного объекта с коэффициентом отражения 1, находящегося на глубине  $h_0$ , и пронормируем на него все полученные выше составляющие. Из соотношения (9) следует:

$$P_{\text{об}}^e = P_0 \sum_2 \frac{\Delta_2}{\pi} \exp(-2\kappa h_0) \frac{A_0^2}{S_1^0 + S_2^0}. \quad (16)$$

Нормируя соотношения (9), (10), (14) на (16), получим выражения для эффективных коэффициентов отражения в виде

$$R_{\text{об}} = R_0 \sum_0 / S_0, \quad (17)$$

$$R_{\text{bs}}^0 = \rho_b \int_0^{h_0} \exp[2\kappa(h_0 - h)] \left(\frac{A}{A_0}\right)^2 \frac{S_1^0 + S_2^0}{S_1 + S_2} dh,$$

$$R_{\text{bs}}^e = \rho_b (S_1^0 + S_2^0) \int_0^{\infty} \exp(-2\kappa h) A^2 \Phi(h) dh,$$

$$R_{\text{bs}}^{\infty} = \rho_b (S_1^0 + S_2^0) \int_0^{\infty} \exp(-2\kappa h) A^2 \Phi_0(h) dh,$$

где

$$\Phi_0(h) = \Phi(h) \Big|_{\sum_0 \rightarrow 0} = (\psi_1^0 + \psi_2^0)^{-1}.$$

Выражение для контраста изображения объекта на фоне среды можно записать, исходя из (15), в виде зависимости от эффективных коэффициентов отражения объекта и среды:

$$K = K_i / (1 + R_{\text{bs}}^0 / \bar{R}), \quad (18)$$

где

$$K_i = \Delta R / \bar{R},$$

$$\Delta R = 0,5(R_{\text{об}} + R_{\text{bs}}^e - R_{\text{bs}}^0), \quad \bar{R} = 0,5(R_{\text{об}} + R_{\text{bs}}^e + R_{\text{bs}}^0).$$

Формулы (15), (18) описывают общую ситуацию – систему наблюдения с произвольными диаграммами направленности источника света (ДНИ) и фотоприемника (ДНП). Как следствие, из них могут быть получены соотношения для расчета контраста изображения в системе наблюдения с одинаковыми ДНИ и ДНП (условно – система «У–У») и узкой ДНИ и широкой ДНП (условно – система «У–Ш»).

Для системы наблюдения «У–У» ( $\sum_1 = \sum_2$ ,  $\Omega_1 = \Omega_2$ ) из (17) получим

$$R_{\text{об}} = R_0 \sum_0 / (\sum_0 + S_1/2), \quad (19)$$

$$R_{bs}^0 = \rho_b \int_0^{h_0} \exp[2\kappa(h_0 - h)] \left(\frac{A}{A_0}\right)^2 \frac{S_1^0}{S_1} dh,$$

$$R_{bs}^e = \rho_b S_1^0 \int_0^{\infty} \exp(-2\kappa h) A^2 \Phi'(h) dh,$$

$$\Phi'(h) = \frac{1}{\psi_1^0} + \left(\frac{\Sigma_0}{S_1 + \Sigma_0}\right)^2 \frac{1}{\psi_1} - \frac{\Sigma_0}{S_1 + \Sigma_0} \frac{2}{\psi_1 + \psi_1^0},$$

$$R_{bs}^\infty = \rho_b S_1^0 \int_0^{\infty} \exp(-2\kappa h) A^2 / \psi_1^0 dh.$$

Для системы наблюдения «У-Ш» ( $\Delta_2 \rightarrow \infty$ ) из (17) следует:

$$R_{ob} = R_0 \Sigma_0 / (S_1 + \Sigma_0), \quad (20)$$

$$R_{bs}^0 = \rho_b \int_0^{h_0} \exp[2\kappa(h_0 - h)] \left(\frac{A}{A_0}\right)^2 \left(\frac{L_0}{H+h}\right)^2 dh,$$

$$R_{bs}^e = \rho_b \int_0^{\infty} \exp(-2\kappa h) A^2 \Phi''(h) dh;$$

$$\Phi''(h) = \frac{S_1}{S_1 + \Sigma_0} \left(\frac{L_0}{L_0 + h_0}\right)^2 + \frac{\Sigma_0}{S_1 + \Sigma_0} \frac{\Sigma_0}{\psi_1 + \psi_0} - \frac{\Sigma_0}{\psi_1^0 + \psi_0};$$

$$\psi_0 = \Sigma_0(1 + h/L_0)^2 + (h/L_0)^2 (\Sigma_2 + G_0 - 2B_0 L_0 + Q_0 L_0^2);$$

$$R_{bs}^\infty = \rho_b \int_0^{\infty} \exp(-2\kappa h) \left(\frac{AL_0}{L_0 + h}\right)^2 dh.$$

**7. «Дифференциальный» контраст изображения.** Все изложенное в предыдущей части статьи относится к системе наблюдения с непрерывной подсветкой. Однако полученные результаты легко модифицируются для расчета структуры изображения объекта в системе наблюдения с импульсной подсветкой и временным стробированием фотоприемника.

Допустим, что источник СН излучает световой импульс длительностью  $\tau_1$ , а фотоприемник обладает временным разрешением  $\tau_2$ . При этом световой сигнал, формирующий изображение, поступает в СН из толщи среды, ограниченной глубинами  $h_s, h_s + \Delta h$ , где  $h_s$  – глубина стробирования;  $\Delta h = c(\tau_1 + \tau_2)/2$  ( $c$  – скорость света в воде).

В зависимости от соотношения между  $h_s, \Delta h$  и  $h_0$  необходимо использовать различные формулы для расчета контраста изображения:

– при  $h_0 - \Delta h \geq h_s \geq 0$  контраст

$$K \equiv 0, \quad (21a)$$

– при  $h_0 \geq h_s \geq h_0 - \Delta h$

$$K = (R_{ob} + R_{bs}^e - R_{bs}^\infty) / (R_{ob} + R_{bs}^e + R_{bs}^\infty + 2R_{bs}^0). \quad (21b)$$

Здесь эффективные коэффициенты отражения описываются формулами (17) с измененными пределами интегрирования – для  $R_{bs}^0$ :  $h_s, h_0$ ; для  $R_{bs}^e, R_{bs}^\infty$ :  $0, h_s + \Delta h - h_0$ ;

– при  $\infty > h_s > h_0$

$$K = (R_{bs}^e - R_{bs}^\infty) / (R_{bs}^e + R_{bs}^\infty). \quad (21b)$$

Здесь пределы интегрирования для  $R_{bs}^e$  и  $R_{bs}^\infty$ :  $h_s - h_0, h_s + \Delta h - h_0$ .

**8. Результаты численного анализа.** Полученные соотношения позволяют провести анализ зависимости контраста от всех физических факторов задачи, т.е. от параметров объекта, системы наблюдения и характеристик среды. Ниже излагаются результаты численных расчетов контраста изображения для следующих значений параметров СН, объекта и среды:  $H = 300$  м, диаметр объекта  $d_0 = 1$  м, коэффициент рассеяния среды  $\sigma = 0,3$  м<sup>-1</sup>, коэффициент поглощения  $\kappa = 0,04$  м<sup>-1</sup>, коэффициент обратного рассеяния  $\sigma_\pi = 0,015$  м<sup>-1</sup>, дисперсия индикатрисы рассеяния  $\bar{\gamma} = 0,04$ .

Перейдем к обсуждению полученных результатов. Расчеты для системы наблюдения типа «У-У» показывают, что зависимость контраста изображения от глубины при значениях коэффициента отражения объекта  $1 \geq R_0 \geq 0,1$  имеет монотонно спадающий характер – это относится и к зависимости  $K_i(h_0)$ , и к  $K(h_0)$ . Однако при значениях  $R_0$ , близких коэффициенту яркости моря  $\sigma_\pi/8\kappa$ , поведение контраста становится более сложным. На рис. 2 приведены рассчитанные по (18), (19) зависимости  $K_i$  от глубины расположения объекта при  $R_0 = 0,03$ . Эти зависимости показывают, что контраст является немонотонной и знакопеременной функцией  $h_0$ , причем характер поведения  $K_i$  существенно зависит от ширины диаграммы направленности  $\Theta_1$  и размера объекта  $d_0$ .

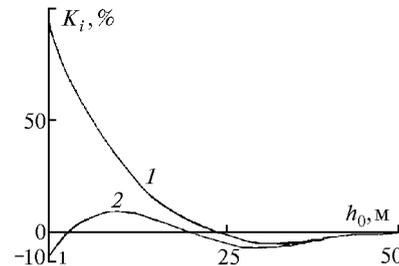


Рис. 2. Зависимость контраста изображения от глубины размещения объекта ( $d_0 = 5$  м,  $R_0 = 0,03$ ): 1 –  $\Theta_1 = 0,01^\circ$ ; 2 –  $\Theta_1 = 1^\circ$

Для объяснения такого «странного» поведения контраста обратимся к рис. 3, на котором приведены зависимости эффективных коэффициентов отражения объекта и среды от глубины. Зависимость  $R_{ob}(h_0)$  является монотонно спадающей, а зависимости  $R_{bs}^e$  и  $R_{bs}^\infty$  от  $h_0$  в общем случае ведут себя немонотонно. Точки пересечения графиков  $R_{ob}(h_0)$  и  $\Delta R_{bs}(h_0)$ , где  $\Delta R_{bs} = R_{bs}^\infty - R_{bs}^e$ , отмеченные на рис. 3 кружками, соответствуют глубинам смены знака контраста изображения (на этих глубинах объект становится невидимым на фоне среды). Нетрудно убедиться в том, что в зависимости от соотношения между величинами  $R_{ob}, R_{bs}^e$  и  $R_{bs}^\infty$  контраст может быть положительным, отрицательным и знакопеременным. Отдельного внимания заслуживает зависимость эффективного коэффициента отражения полубесконечной среды  $R_{bs}^\infty$  от глубины для СН типа «У-У» (рис. 4). Из кривых рис. 4 следует, что поведение  $R_{bs}^\infty$  в существенной степени определяется значением ширины диаграммы направленности СН  $\Theta_1$ , но в общем случае зависимость  $R_{bs}^\infty(h_0)$  – немонотонная.

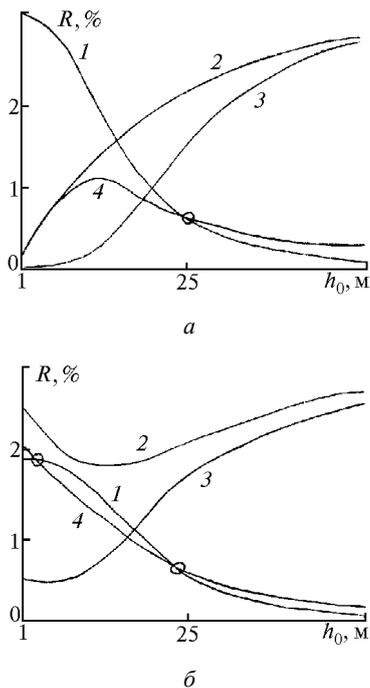


Рис. 3. Зависимость эффективных коэффициентов отражения объекта и среды от глубины:  $a - \Theta_1 = 0,01^\circ$ ;  $b - \Theta_1 = 1^\circ$ ; кривые 1 -  $R_{ob}$ ; 2 -  $R_{bs}^\infty$ ; 3 -  $R_{bs}^c$ ; 4 -  $\Delta R_{bs}^c$

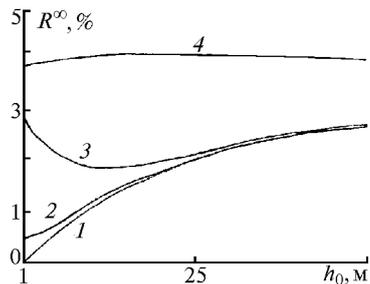


Рис. 4. Зависимость эффективного коэффициента отражения полубесконечной среды от глубины: кривые 1 -  $\Theta_1 = 0,01^\circ$ ; 2 -  $\Theta_1 = 0,1^\circ$ ; 3 -  $\Theta_1 = 1^\circ$ ; 4 -  $\Theta_1 = 10^\circ$

Отметим, что эти особенности поведения контраста отсутствуют для СН типа «У-Ш». Вследствие того, что в этом случае  $R_{bs}^\infty = \text{const}$ , зависимость контраста от глубины является монотонно спадающей и знакопостоянной. Аналогичные результаты получены в работе [5], посвященной задаче оптического наблюдения локальных неоднородно-

стей в биологических тканях. На рис. 5 приведены зависимости «дифференциального» контраста изображения объекта на фоне среды в системе наблюдения типа «У-У» с импульсной подсветкой от глубины стробирования  $h_s$  (данные рассчитаны по формулам (21)).

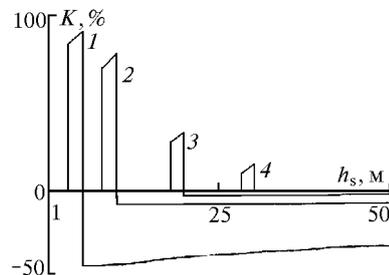


Рис. 5. Зависимость «дифференциального» контраста изображения от глубины стробирования ( $\Theta_1 = 0,1^\circ$ ,  $R_0 = 0,5$ ,  $\Delta h = 2$  м,  $D_0 = 1$  м); кривые 1 -  $h_0 = 5$  м; 2 -  $h_0 = 10$  м; 3 -  $h_0 = 20$  м, 4 -  $h_0 = 30$  м

Контраст положителен на глубинах, соответствующих попаданию строба на объект, и отрицателен на глубинах, больших глубины объекта. Замечательно то обстоятельство, что в последнем случае величина контраста не зависит от отражательных характеристик объекта, что позволяет обнаруживать даже «невидимый» на фоне среды объект по его «тени» [6]. Из общих тенденций поведения контраста можно отметить следующие: контраст как в положительной, так и в отрицательной части растет с увеличением размеров объекта, уменьшается с ростом глубины расположения объекта и ухудшается при увеличении длительности строба  $\Delta h$ . Аналогичные тенденции отмечаются и для системы наблюдения типа «У-Ш».

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 99-05-64798, 98-02-17021).

1. Долин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 230 с.
2. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 327 с.
3. Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С., Левин И.М., Лучинин А.Г. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТТ. 1972. Вып. 3. С. 35-46.
4. Долин Л.С. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1983. Т. 19. N 4. С. 400-405.
5. Вебер В.Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 1997. Т. 40. N 8. С. 980-990.
6. Кацев И.Л., Зега Э.П., Прихач А.С. // III Межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана» (Тезисы докл.). Томск: Изд. ИОА СО РАН, 1996. С. 56.

*W.L. Weber, L.S. Dolin. About Contrast of the Small Size Object Images Observed Through a Scattering Medium by Means of an Active Illumination Systems.*

Relations for account of contrast of the underwater object image when observing through a smooth sea surface in conditions of continuous and impulse illumination are derived. The backscattering signal from the medium located behind the object is calculated taking into account the object screening action. Dependence of the image contrast on the characteristics of the object and vision system parameters is investigated. Effect of nonmonotonous behaviour of contrast depending on the object depth at small values of the object reflection coefficient is marked.