

В.В. Барун

О возможном улучшении видимости объекта по мере его погружения в мутную среду

Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ, г. Минск, Беларусь

Поступила в редакцию 20.07.2000 г.

На основе малоуглового приближения теории переноса излучения решена задача наблюдения непрозрачного объекта через слой рассеивающей среды, ограниченной подстилающей поверхностью, с учетом образования области тени. Оказалось, что контраст изображения объекта может иметь экстремум внутри слоя среды, где локально реализуются условия наилучшей его видимости. Показано также, что видимость объекта может монотонно возрастать по мере его погружения в мутную среду. Количественно оценены условия, при которых происходит это улучшение, а также возникает указанный экстремум контраста.

Можно ли видеть объект в глубине мутной среды лучше, чем на ее поверхности? Наверное, первый ответ будет отрицательным. Просто повседневная практика приучила нас, что чем больше вуалирующая пелена, например тумана перед глазами, тем хуже видимость. Однако уже элементарный пример показывает, что это не всегда так. Пусть слой рассеивающей среды *PC* (рис. 1) освещен широким источником *И*, а узкоугольный приемник *П* регистрирует отраженное излучение. *PC* ограничена снизу ламбертовской подстилающей поверхностью или дном *Д* с альбедо *A_b*. Пусть ламбертовский непрозрачный объект *O* с альбедо *A_o* находится на верхней границе слоя в положении *I*. Процесс наблюдения *O* или видения заключается в сравнении приемником оптических сигналов, приходящих

из двух соседних точек поля зрения, т.е. сигналов при ориентации *П* в направлениях *1* (на объект) и *2* (на фон). Будем считать для простоты, что *A_b* = 0. Пусть коэффициенты яркости *O* и *PC* одинаковы. Тогда естественно, что объект в положении *I* не будет виден, так как оптические сигналы от *O* (в направлении *1*) и от *PC* (*2*) совпадают или контраст изображения *O* (см. ниже) близок к 0. Переместим теперь тот же объект в положение *II*. В этом случае сигналы от среды при ориентациях *1* и *2* приемника практически одинаковы и, если толщина *z_b* *PC* не очень большая, объект может быть виден достаточно четко. Таким образом, рассмотренный простой пример качественно показывает, что при определенных условиях через слой мутной среды можно видеть лучше.

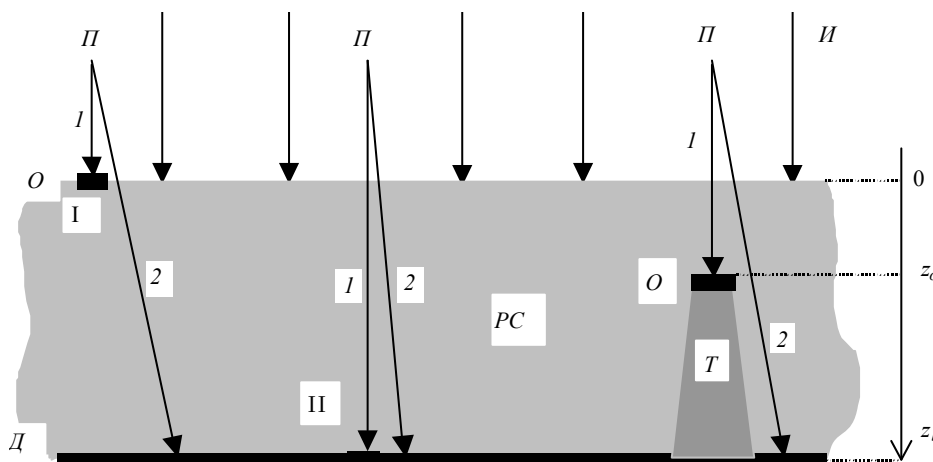


Рис. 1. Геометрическая схема задачи: *И* – источник подсветки; *П* – приемник; *O* – объект наблюдения; *PC* – рассеивающая среда; *Д* – дно (подстилающая поверхность); *T* – область тени объекта

Рассмотрим данную задачу количественно. Пусть в активной системе видения, содержащей широкий источник подсветки и узкоугольный приемник, осуществляется наблюдение объекта, занимающего произвольное положение *z_o* в слое рассеивающей среды (правая часть рис. 1). В *PC* за непрозрачным *O* образуется область тени *T*. Обычным образом [1, 2] введем локационный контраст *k* изображения *O*:

$$k = W_{vs}/W_2 = (W_1 - W_2)/W_2, \tag{1}$$

где *W_{vs}*, *W₁* и *W₂* – мощность соответственно полезного сигнала, сигнала от объекта и от фона. Как следует из (1), под полезным сигналом здесь понимается разность между значениями мощности излучения, пришедшего на *П* при его ориентации на *O* (в направлении *1*) и на фон (*2*). Условие видения объекта

$$|k| \geq k_{th}, \quad (2)$$

где k_{th} – пороговый контраст. Обычно при визуальном наблюдении его полагают равным 0,02. Мы используем одно условие (2) и не рассматриваем отношение сигнал-шум, полагая, что световая мощность I достаточна для превышения порогового значения последнего [3].

Будем считать, что индикатриса рассеяния среды сильно вытянута в направлении «вперед» (например, наблюдение через облако, слой тумана или воды), и используем для решения приближение квазиднократного рассеяния [2], т.е. учтем многократно рассеянный свет при распространении до точки рассеяния, однократное рассеяние на большие углы и снова многократное на обратном пути до приемника. Подобная задача решена в [4] при $A_b = 0$ или для слоя PC с черным дном. Здесь рассмотрим более общий случай $A_b \geq 0$. Тогда в указанном приближении определение контраста (1) принимает вид

$$k = \frac{[W_o(\tau_o) + W'_{bs}(\tau_o, \tau_b) + W'_b(\tau_o, \tau_b)] - W_{bs}(\tau_b) + W_b(\tau_b)}{W_{bs}(\tau_b) + W_b(\tau_b)}, \quad (3)$$

где $W_{o, bs, b}$ – значения мощности сигнала, приходящего на приемник соответственно от O , PC и D ; величины со штрихом относятся к сигналам с учетом области тени; τ_o и τ_b – оптическая глубина до объекта и всего слоя PC ($\tau = \varepsilon z$, ε – показатель ослабления).

Запишем величины в правой части (3) в малоугловом приближении [2, 5] аналогично [4]. Это можно сделать в аналитическом виде при условии малости объекта. Критерий малости для данного случая приведен в [4]. Итак, с точностью до нормировочных множителей, одинаковых для числителя и знаменателя (3), имеем

$$W_o(\tau_o) = \frac{A_o}{\pi} \exp[\tau_o(\Lambda - 2)]; \quad (4)$$

$$W_{bs}(\tau_b) = \frac{a_w}{\pi} \{1 - \exp[2\tau_b(\Lambda - 1)]\}; \quad (5)$$

$$W'_{bs}(\tau_o, \tau_b) = W_{bs}(\tau_b) - \frac{a_w}{\pi} \exp(-\Lambda\tau_o) \{ \exp[2\tau_o(\Lambda - 1)] - \exp[2\tau_b(\Lambda - 1)] \}; \quad (6)$$

$$W_b(\tau_b) = \frac{A_b}{\pi} \exp[2\tau_b(\Lambda - 1)]; \quad (7)$$

$$W'_b(\tau_o, \tau_b) = \frac{A_b}{\pi} \exp[2\tau_b(\Lambda - 1)] [1 - \exp(-\Lambda\tau_o)], \quad (8)$$

где $a_w = \Lambda P_\pi / [8(1 - \Lambda)]$ – коэффициент яркости полубесконечного слоя PC при нормальном освещении и наблюдении; P_π – среднее значение индикатрисы в направлении «назад»; $\Lambda = \sigma/\varepsilon$ – вероятность выживания фотона в среде; σ – показатель рассеяния. Подставляя (4)–(8) в (3), получим

$$k = \frac{(A' - a') \exp[\tau_o(\Lambda - 2)] + a' \exp(-\Lambda\tau_o) \exp[2\tau_b(\Lambda - 1)]}{a' \{1 - \exp[2\tau_b(\Lambda - 1)]\} + A_b}, \quad (9)$$

где $A' = A_o - A_b$; $a' = a_w - A_b$. Для сравнения приведем здесь же соответствующую формулу для контраста при $A_b = 0$, полученную в [4], которая, очевидно, следует и из (9):

$$k = \frac{(A_o - a_w) \exp[\tau_o(\Lambda - 2)] + a_w \exp(-\Lambda\tau_o) \exp[2\tau_b(\Lambda - 1)]}{a_w \{1 - \exp[2\tau_b(\Lambda - 1)]\}} \quad (10)$$

Видно, что выражения (9) и (10) очень похожи. Таким образом, многие соотношения [4] можно прямо применять к рассматриваемому здесь случаю $A_b > 0$ путем замены $A_o \rightarrow A'$ и $a_w \rightarrow a'$. Единственным существенным различием между (9) и (10) является знак множителя перед вторым слагаемым в числителе. В (10) всегда $a_w > 0$, тогда как a' в (9) может быть и положительным, и отрицательным в зависимости от соотношения между a_w и A_b . Путем анализа на экстремум контраста как функции τ_o в [4] получено, что зависимость $k(\tau_o)$ может иметь максимум. Поступая точно так же с соотношением (9), можно показать, что при определенных условиях, зависящих от альbedo объекта и оптических свойств рассеивающей среды, контраст может иметь максимум (при $a' > 0$), будучи положительным в этом максимуме, или минимум (при $a' < 0$), будучи здесь отрицательным, при некотором значении τ_o^* :

$$\tau_o^* = \tau_b + \frac{1}{2(1 - \Lambda)} \ln \left[\frac{2 - \Lambda}{\Lambda} (1 - A' / a') \right], \quad (11)$$

т.е. в положении τ_o^* внутри слоя PC объект будет виден лучше, чем на других глубинах, и выглядеть соответственно светлее или темнее фона. Исходя из условия $0 < \tau_o^* < \tau_b$ (т.е. указанный экстремум лежит внутри слоя PC), можно найти диапазон альbedo объекта, при котором внутри мутной среды имеет место максимум модуля k . Действительно, необходимым и достаточным условием выполнения приведенного выше неравенства (при минимуме контраста внутри PC или при $k(\tau_o^*) < 0$) является

$$A_2^* + A_b < A_o < A_1^* + A_b, \quad (12)$$

где $A_1^* = 2a'(1 - \Lambda) / (2 - \Lambda)$, $A_2^* = a' \{1 - [\Lambda / (2 - \Lambda)] \times \exp[-2\tau_b(1 - \Lambda)]\}$. Если $A_o < A_2^* + A_b$ и $a' < 0$, то контраст ведет себя обычным образом, т.е. возрастает, оставаясь отрицательным по мере погружения объекта, и видимость O ухудшается с увеличением τ_o . Когда $A_o > A_1^* + A_b$ и $a' < 0$, контраст монотонно убывает с ростом τ_o , причем на верхней границе ($\tau_o = 0$) $k > 0$. Однако при $A_3^* + A_b > A_o > A_1^* + A_b$, где $A_3^* = a' \{1 - \exp[-2\tau_b(1 - \Lambda)]\}$, функция $k(\tau_o)$ принимает нулевое значение при $\tau_o = \tau_1$. В этом случае при увеличении τ_o происходит следующее: видимость объекта ухудшается, но вблизи верхней границы PC он светлее фона, затем около $\tau_o = \tau_1$ O исчезает или становится невидим из-за малости контраста по сравнению с пороговым k_{th} , а при дальнейшем погружении в среду объект становится темнее фона и видимость его улучшается (увеличивается модуль контраста $|k|$) вплоть до нижней границы PC . Оптическую глубину τ_1 , где O исчезает, можно оценить аналитически, как и в [4]. Кроме того, подставляя (11) в (9), легко найти максимальный модуль контраста и исследовать другие условия наблюдения объекта аналогично [4].

На рис. 2 показаны зависимости $k(\tau_o)$ при различных альbedo A_o и постоянной оптической толщине слоя PC $\tau_b = 2$, графически иллюстрирующие отмеченные выше особенности поведения контраста (изображения объекта).

Рис. 2, *a* относится к случаю наблюдения через облако (модель Cloud C-1 [6]) при $A_b = 0$ [4], и рис. 2, *б* – через слой воды на фоне дна с $A_b = 0,25$. Оптические свойства воды брались для расчетов в соответствии с корреляционной моделью [7]. Для рис. 2, *a* $a' > 0$, и особенности поведения контраста – исчезновение объекта (кривая 1) вблизи $\tau_o \approx 1,5$, максимум $k(\tau_o)$ (кривые 2 и 3) внутри *PC* – детально проанализированы в [4].

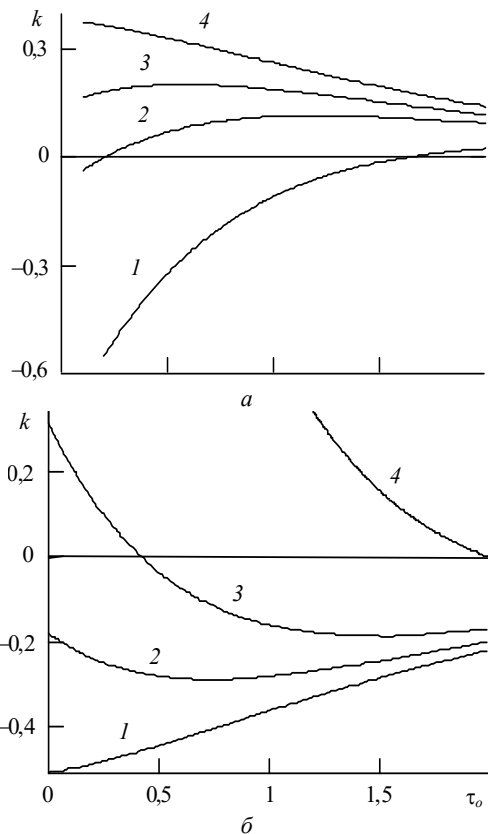


Рис. 2. Зависимость контраста изображения объекта от τ_o при наблюдении через облачный слой с $\tau_b = 2$, $A_b = 0$ (*a*) и слой воды с $\tau_b = 2$, $A_b = 0,25$ (*б*): *a* – $A_o = 0,05$ (кривая 1), 0,2 (2), 0,25 (3), 0,3 (4); *б* – $A_o = 0,02$ (1), 0,04 (2), 0,08 (3), 0,25 (4)

Рассмотрим более подробно рис. 2, *б*. При низком альбедо A_o (кривая 1) контраст возрастает, имея отрицательные значения, и видимость объекта ухудшается по мере его погружения в *PC*, как это и следует из анализа неравенства (12). Когда (12) выполняется, зависимость $k(\tau_o)$ имеет минимум внутри среды (кривые 2 и 3), хотя он вы-

ражен не очень заметно. При изменении A_o в пределах, задаваемых неравенством (12), положение минимума смещается от нижней до верхней границы *PC*. Интересное поведение контраста иллюстрирует кривая 3. На верхней границе ($\tau_o = 0$) объект светлее фона ($k > 0$). По мере погружения контраст падает и видимость *O* ухудшается. На глубине $\tau_o \approx 0,4$ объект не виден из-за малости k . При дальнейшем увеличении τ_o видимость объекта улучшается (растет $|k|$), но *O* уже выглядит темнее фона, $k < 0$. Затем на глубине τ_o^* , определяемой по (11), $|k|$ имеет локальный максимум, и далее видимость объекта несколько снижается. Если при оптических свойствах *PC*, соответствующих рис. 2, *б*, построить зависимости $k(\tau_o)$ для других значений определяющих параметров A_o и (или) τ_b , то может иметь место, например, монотонное увеличение $|k|$ с ростом τ_o , т.е. монотонное улучшение видимости объекта по мере его погружения до дна водоема. Отметим, что все эти особенности следуют из анализа простого аналитического соотношения (9) и поэтому рассматривать их не будем.

Таким образом, если возвратиться к вопросу, поставленному в начале работы, то на него следует ответить утвердительно. Да, могут иметь место ситуации, когда видимость объекта будет улучшаться по мере его погружения в мутную среду.

В данной статье на основе малоуглового приближения теории переноса излучения дано количественное описание такого увеличения модуля контраста с глубиной для различных оптических свойств среды и альбедо объекта. Отмечено, в частности, что условия наилучшей видимости могут реализовываться на некоторой глубине внутри среды, дана оценка этой глубины, и показано, что экстремальное значение контраста может быть положительным или отрицательным в зависимости от соотношения между коэффициентом яркости полубесконечного слоя среды и альбедо объекта.

1. Долин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 230 с.
2. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 328 с.
3. Кацев И.Л., Зега Э.П. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1989. Т. 25. № 7. С. 732–740.
4. Барун В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 3. С. 264–272.
5. Долин Л.С. // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1964. Т. 7. № 2. С. 380–382.
6. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 176 с.
7. Дорожин А.Н., Копелевич О.В., Левин И.М., Фейгельс В.И. // X Пленум «Оптика океана»: Тезисы докл. Л.: Изд. ГОИ, 1988. С. 136–137.

V.V. Barun. On possible improving of visibility of an object as it submerges into a turbid medium.

The problem on observation of an opaque object through a light-scattering layer of a medium bounded by underlying surface is solved on the base of the small-angle approximation of the radiative transfer theory with taking into account the medium shadowing. It is shown that the contrast of the object image can have an extremum within the medium layer, where its visibility locally enhances. The visibility of an object is also shown can enhance monotonically as the object submerges into a turbid medium. The conditions for the visibility improving and the extremum appearance are quantitatively estimated.