

Э.П. Зеге, И.Л. Кацев, А.С. Прихач

ДАЛЬНОСТЬ ВИДЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Излагается новая концепция определения дальности видения объектов в рассеивающих средах, основанная на представлениях об оптимальной обработке изображения. Описывается практическая реализация этой концепции в программе расчета предельных дальностей обнаружения и распознавания подводных объектов (в том числе через границу раздела вода – воздух) с помощью пассивных телевизионных и активных лазерно-телевизионных систем наблюдения. Дается описание особенностей программы, предназначенной для персональных вычислительных комплексов, а также специально разработанных и использованных в программе удобных малопараметрических моделей оптических характеристик воды, поверхности и атмосферы. Приводятся конкретные примеры расчетов предельной дальности видения.

Общность концепции и модульный принцип построения программы позволяют при необходимости существенно расширять ее возможности.

Введение

Одной из основных практических задач теории видения в рассеивающих средах является априорная оценка потенциальных возможностей систем инструментального наблюдения, и, в частности, оценка предельных дальностей обнаружения и распознавания объектов. Данная статья посвящена краткому изложению развитой концепции оптимального обнаружения и ее конкретной реализации в методике расчета предельных дальностей обнаружения и распознавания объектов в рассеивающей среде, в том числе под водой.

Концепция оптимального обнаружения, а также ряд вопросов, касающихся связи шумовых характеристик среды (в том числе взволнованной поверхности океана) и системы видения с предельно разрешимым контрастом были рассмотрены нами в [1]. В дальнейшем эти результаты были использованы в качестве базы для создания инженерных методик расчета и реализующего их пакета программ для персональных компьютеров, позволяющих в эффективном интерактивном режиме рассчитывать предельные дальности обнаружения и распознавания объектов в зависимости от параметров видеосистемы и оптических характеристик воды и атмосферы.

В данной статье мы решили дать цельное последовательное изложение проблемы, а именно:

– на основе концепции оптимального обнаружения дать математическую формулировку проблемы нахождения предельных дальностей телевизионного обнаружения и распознавания объектов в рассеивающей среде:

– описать простую модель системы «океан – атмосфера», удовлетворяющую условиям компромисса между числом входных параметров системы и наиболее точным описанием условий распространения излучения в различных погодных условиях и в разнообразных зонах морей и океанов;

– привести основные формулы для расчета сигналов, фонов и помех, позволяющие достичь в процедурах вычислений компромисса между точностью и временем вычислений.

Кроме того, мы приведем примеры решения с помощью такого подхода как некоторых классических задач видения, так и новых задач, связанных, в частности, с наблюдением через взволнованную поверхность моря.

1. ОБНАРУЖЕНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ В РАССЕИВАЮЩЕЙ СРЕДЕ

1.1. Визуальное восприятие реальных объектов

Критерий Джонсона

Современная теория видения [1, 2], опирающаяся на теорию переноса излучения и теорию линейных систем, позволяет с той или иной точностью находить практически любые характеристики светового поля на фотоприемнике и характеристики качества изображения, в частности, рассчитывать частотно-контрастную характеристику системы наблюдения, а также энергетику полезного сигнала и помех на фотоприемнике. Она позволяет даже рассчитывать структуру изображения любого заданного реального объекта. Однако для априорной оценки возможностей системы наблюдения, в том числе для оценки предельной дальности обнаружения реальных объектов в рассеивающей среде этого недостаточно. Ввиду многообразия реальных объектов и специфики их восприятия, связанной с рядом индивидуальных особенностей наблюдателя, необходимо иметь связь между характеристиками видеосистем при наблюдении стандартных тест-объектов и качеством видения в реальных условиях. Разумеется, такая связь может носить лишь статистический характер. Для одного класса объектов она

была установлена Джонсоном [3, 1]. На примере военных транспортных средств Джонсон провел сравнение способности наблюдателя разрешать изображение миры с его способностью обнаруживать, различать и опознавать реальные объекты. В результате каждому уровню видения он поставил в соответствие число разрешаемых полу периодов эквивалентной штриховой миры в пределах минимального (критического) размера объекта (табл. 1).

Таблица 1

Критерии Джонсона, определяющие качество видения

Уровень видения	Число разрешаемых полупериодов штриховой миры на минимальном размере наблюдаемого объекта
Обнаружение	$2 \pm 0,5$
Определение ориентации	$2,8 \pm 0,8$
Различение (распознавание)	$8 \pm 1,6$
Опознавание	$12,8 \pm 3$

Под эквивалентной штриховой мирой понимается мира прямоугольной формы, полная ширина которой равна критическому размеру объекта, а длина соответствует размеру объекта в направлении, перпендикулярном критическому. Из таблицы следует, что объект обнаруживается (т.е. устанавливается факт появления его в поле зрения), если на минимальном размере объекта разрешаются два полупериода (один период) штриховой миры. Различение (распознавание) объекта (т. е. классификация его, например, как дом, автомобиль, человек и т.д.) возможно, если на минимальном размере объекта разрешаются 8 полупериодов штриховой миры.

Таким образом, критерии Джонсона позволяют связать качество визуального восприятия реальных объектов в данной видеосистеме с теоретически оцениваемыми характеристиками качества изображения тест-объектов. В частности, задача обнаружения реальных объектов сводится к задаче обнаружения тест-объекта прямоугольной формы. При этом ширина тест-объекта в два раза меньше размера реального объекта, альbedo тест-объекта равно среднему альbedo реального объекта, а альbedo фона — среднему альbedo реального фона [3, 4]. Именно такой тест-объект рассматривается ниже в задаче оценки предельной дальности обнаружения объекта. Еще раз подчеркнем, что под «обнаружением» здесь понимается лишь установление факта появления объекта в поле зрения (возможно в виде некоторого размытого пятна). В этом смысле этот термин не вполне соответствует понятию «обнаружение» в коммерческом (бытовом) телевидении, под которым обычно понимают уровень видения более высокого качества (по-видимому, он ближе к нашему термину «распознавание»).

1.2. Отношение сигнал/шум. Критерий обнаружения

Основной характеристикой качества изображения является отношение сигнал/шум [1, 2, 5]

$$\delta = \Delta N / \sqrt{\sigma_N^2} . \quad (1.1)$$

Здесь ΔN — разность между числом фотонов, попадающих за время наблюдения на тестовый элемент изображения, и средним числом $\langle N \rangle$ фотонов, попадающих на окружающие его площадки того же размера; σ_N — дисперсия флуктуаций числа фотонов N относительно среднего значения $\langle N \rangle$. Здесь N , $\langle N \rangle$ и ΔN являются числами использованных фотонов, т.е. связаны с соответствующими числами попавших на фотоприемник фотонов через квантовую эффективность фотоприемника.

Без учета темновых шумов фотоприемника (для телевизионных систем в видимом диапазоне ими практически всегда можно пренебречь)

$$\sigma_N^2 = \langle N \rangle + \alpha \langle N \rangle^2 , \quad (1.2)$$

где первый член описывает дробовые шумы фотоприемника, второй — внутренние шумы приемной системы (флуктуации коэффициента усиления и т.д.). Во второй член, в принципе, могут быть включены также шумы, возникающие вследствие нестабильности мощности источника излучения и неравномерности чувствительности фотоприемника, вследствие флуктуаций оптических характеристик среды в канале передачи изображения [6, 7] и т.д. Так, например, в случае наблюдения через среду с флуктуирующими оптическими параметрами [8]

$$\sigma_N^2 = \langle N \rangle + [\alpha + 2K_\phi (1 - B_\phi(r_0))] \langle N \rangle^2 , \quad (1.3)$$

где K_ϕ – коэффициент вариации флуктуационных шумов среды; $B_\phi(r_0)$ – пространственная корреляционная функция шумов; r_0 – расстояние между сравниваемыми элементами изображения. При этом $B_\phi(r_0 = 0) = 1$. При $r_0 \rightarrow \infty$ величина $B_\phi(r_0) \rightarrow 0$ и

$$\sigma_N^2 = \langle N \rangle + (\alpha + 2K_\phi) \langle N \rangle^2. \quad (1.4)$$

Если расстояние r_0 между сравниваемыми элементами много меньше радиуса корреляции шумов среды, то $B_\phi(r_0) = 1$ и

$$\sigma_N^2 = \langle N \rangle + (\alpha + 2K_\phi) \langle N \rangle^2. \quad (1.5)$$

т.е. в этом случае дисперсия шумов σ_N^2 , а следовательно, и отношение сигнал/шум не зависят от флуктуаций оптических параметров среды. Такая ситуация может иметь место, например, при наблюдении через взволнованную поверхность моря, когда длиннопериодные волны зыби, масштаб которых сравним или превышает размер кадра, практически не портят изображение объекта, вызывая лишь его медленное качание.

Параметр α является параметром самой видеосистемы и, как видно из (1.1), (1.2), в отсутствие флуктуаций характеристик среды в канале передачи изображения связывает пороговую величину отношения сигнал/шум δ_n с пороговым контрастом κ_n системы при оптимальном, т.е. достаточно большом уровне освещенности ($\alpha \langle N \rangle \gg 1$) [4]. Действительно, в этом случае

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \frac{\Delta N}{\langle N \rangle} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \kappa, \quad \kappa = \frac{\Delta N}{\langle N \rangle} \quad (1.6)$$

и

$$\delta_n = \kappa_n / \sqrt{\alpha}, \quad \kappa_n = \delta_n \sqrt{\alpha}. \quad (1.7)$$

Соотношение (1.7), определяющее κ_n через δ_n , можно рассматривать также как выражение для параметра α через пороговые величины δ_n и κ_n .

Пороговая величина δ_n , вообще говоря, не является некоторой фиксированной характеристикой видеосистемы, а зависит от требований, предъявляемых к системе при решении той или иной конкретной задачи. Как известно, она определяется через допустимые значения вероятности ложной тревоги $P_{л.т}$ и вероятности обнаружения $P_{обн}$. При $\Delta N \ll \langle N \rangle$ величина $\delta_n = \delta^*$ является решением системы уравнений [9, 10]

$$\begin{cases} P_{л.т} = (1/2) \operatorname{erfc} y / \sqrt{2}, \\ P_{обн} = (1/2) \operatorname{erfc}(y - \delta^*) / \sqrt{2}, \end{cases} \quad (1.8)$$

где

$$\operatorname{erfc} z = 1 - (2/\sqrt{\pi}) \int_0^z \exp(-t^2) dt.$$

Можно показать, что при произвольном соотношении между ΔN и $\langle N \rangle$ выражение для порогового отношения сигнал/шум имеет вид

$$\delta_n = \delta^* + (\delta^* - y) \left[\frac{\sqrt{\sigma_{N+\Delta N}^2}}{\sqrt{\sigma_N^2 - 1}} \right]. \quad (1.9)$$

При $\Delta N \ll \langle N \rangle$ это соотношение переходит в (1.8). Таким образом, единственным критерием видения объекта является условие

$$\delta \geq \delta_n,$$

где δ_n определяется формулой (1.8). Необходимо отметить, что при выполнении этого условия автоматически выполняется и условие $\kappa \geq \kappa_n$ и требование к минимальной энергии сигнала на входе фотоприемника, связанное с пороговой чувствительностью фотоприемника.

1.3. Оптимальный обнаружитель. Дальность обнаружения

В задаче телевизионного или визуального наблюдения объекта в рассеивающей среде сравниваются энергии сигналов, поступающих на два элемента изображения, (например, в задаче обнаружения объекта один из них соответствует центру объекта, а другой определяет уровень фона). Поэтому в формулах (1.1), (1.2)

$$\Delta N = CW_{п.с.}, \quad \langle N \rangle = CW_{\phi}, \quad (1.10)$$

где $W_{п.с.}$ — энергия полезного сигнала, т. е. разность энергий, поступающих на два сравниваемых элемента изображения; W_{ϕ} — энергия фона, приходящаяся на элемент изображения за время записи кадра. Коэффициент пропорциональности C определяется квантовой эффективностью фотоприемника. Квантовая эффективность фотоприемника $\eta = C\omega_0$, где $\omega_0 = h\nu$ — энергия одного фотона. Если для системы известна величина η , то соответственно $C = \eta/\omega_0$.

Подставляя (1.10) в (1.1) с учетом (1.2), имеем

$$\delta = \frac{W_{п.с.}}{\sqrt{W_{\phi}/C + \alpha W_{\phi}^2}}. \quad (1.11)$$

Формула (1.11) позволяет рассчитывать отношение сигнал/шум при заданных условиях наблюдения и параметрах системы. Одним из таких параметров, от которых зависит величина δ , является площадь $\Sigma_{эл}$ элемента изображения, по которой производится пространственное интегрирование сигнала.

Минимально возможный элемент $\Sigma_{эл}$ определяется параметрами системы наблюдения (полем зрения телевизионного кадра и числом элементов в нем, площадью рецептора зрительной системы и т.д.). Однако пространственным интегрированием уже сформированного изображения размер элемента может быть увеличен. Поэтому при оценке предельной дальности обнаружения объектов необходимо решать задачу на оптимум, т.е. иметь в виду такой способ обработки изображения, при котором величина δ и, соответственно, дальность обнаружения максимальны.

При малых $\Sigma_{эл}$, очевидно, $W_{п.с.} \sim \Sigma_{эл}$, $W_{\phi} \sim \Sigma_{эл}$ и $\delta \sim \sqrt{\Sigma_{эл}}$. Когда площадь элемента достаточно велика и сравнима с площадью изображения объекта, с увеличением $\Sigma_{эл}$ величина $W_{п.с.}$ достигает насыщения, а величина δ уменьшается. Поэтому можно утверждать, что отношение сигнал/шум δ достигает максимума при некотором оптимальном значении $\Sigma_{эл} = \Sigma_{эл}^{opt}$. При таком выборе величины $\Sigma_{эл}$, очевидно, достигается наибольшая достоверность принятия решения о наличии объекта в среде. Такая обработка аналогична построению оптимального фильтра, т. е. близка по сути к оптимальной обработке по известным критериям Неймана — Пирсона и Зигерта — Котельникова [11]. Такую обработку изображения, т.е. выбор оптимального элемента $\Sigma_{эл}^{opt}$ и соответствующее интегрирование сигнала, осуществляет зрительная система человека (глаз + мозг) как в обычных условиях визуального наблюдения, так и при рассмотрении телевизионного изображения. Экспериментальным подтверждением этого положения служат результаты работы [12].

При наблюдении в рассеивающей среде величина $\Sigma_{эл}^{opt}$ зависит от расстояния L до объекта. Поэтому задача нахождения предельной дальности обнаружения $L_{обн}$ состоит в отыскании условия, при которых одновременно $\Sigma_{эл} = \Sigma_{эл}^{opt}$, $\delta = \delta_{п}$, т. е. сводится к решению системы уравнений

$$\begin{cases} d\delta(L, \Sigma_{эл})/d\Sigma_{эл} = 0, \\ \delta(L, \Sigma_{эл}) = \delta_{п}. \end{cases} \quad (1.12)$$

Энергия фона W_{ϕ} на элементе изображения в общем случае может складываться из энергии помехи обратного рассеяния $W_{пор}$ и энергии внешних (солнечных) засветок $W_{зас}$. Формулы для расчета этих величин приведены в разделе 4.1. Здесь для нас важно подчеркнуть, что $W_{\phi} = W'_{\phi}\Sigma_{эл}$ или для тест-объекта Джонсона прямоугольной формы

$$W_{\phi} = W'_{\phi} d_{xэл} d_{yэл}, \quad (1.13)$$

где W'_{ϕ} — плотность энергии фона в расчете на единицу площади объекта, не зависящая от $d_{xэл}$, $d_{yэл}$. Величины $d_{xэл}$ и $d_{yэл}$, приведенные здесь и ниже к плоскости объекта, есть линейные размеры элемента пространственного интегрирования вдоль оси x (направление критического размера объекта) и вдоль перпендикулярной ей оси y .

Энергию полезного сигнала $W_{п.с.}$ можно записать в виде

$$W_{п.с.} = W\eta_{п.с.} |A_{об} - A_{\phi}| \Psi_1, \quad (1.14)$$

где W — энергия источника излучения за время записи кадра; $\eta_{п.с}$ — коэффициент передачи полезного сигнала при наблюдении однородной поверхности с альбедо $A(\mathbf{r}) = 1$ (\mathbf{r} — координата в плоскости объекта); $A_{об}$ — среднее альбедо объекта. Разность $A_{об} - A_{ф}$ учитывает затенение части среды, расположенной за объектом; $A_{ф}$ — альбедо слоя среды за объектом. Функция Ψ_1 (см. раздел 4.2) учитывает зависимость энергии $W_{п.с}$ от размера и формы объекта и от размеров элемента интегрирования $d_{x\text{эл}}, d_{y\text{эл}}$.

Коэффициент передачи $\eta_{п.с}$ можно записать в виде

$$\eta_{п.с} = \eta'_{п.с} d_{x\text{эл}} d_{y\text{эл}}, \quad (1.15)$$

где $\eta'_{п.с}$ зависит от $d_{x\text{эл}}, d_{y\text{эл}}$. Подставляя (1.13) — (1.15) в (1.11) и (1.12), получаем систему трех уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln \delta(L, d_{x\text{эл}}, d_{y\text{эл}})}{\partial d_{x\text{эл}}} &= \frac{\partial \ln \Psi_1}{\partial d_{x\text{эл}}} + \frac{1}{2d_{x\text{эл}}} \cdot \frac{1}{1 + 2CW_{ф}} = 0, \\ \frac{\partial \ln \delta(L, d_{x\text{эл}}, d_{y\text{эл}})}{\partial d_{y\text{эл}}} &= \frac{\partial \ln \Psi_1}{\partial d_{y\text{эл}}} + \frac{1}{2d_{y\text{эл}}} \cdot \frac{1}{1 + 2CW_{ф}} = 0, \end{aligned} \quad (1.16)$$

$$\delta(L, d_{x\text{эл}}, d_{y\text{эл}}) = \delta_{п}.$$

Решение этой системы с учетом (1.11) определяет размеры $d_{x\text{эл}}^{\text{опт}}$ и $d_{y\text{эл}}^{\text{опт}}$ оптимального элемента пространственного интегрирования по двум осям и предельную дальность обнаружения объекта $L_{обн}^*$.

1.4. Распознавание объекта

В этом случае в соответствии с критериями Джонсона на критическом размере объекта (условно будем считать, что критическое направление совпадает с осью x , а критический размер объекта равен $d_{xоб}$) необходимо разрешать 8 полупериодов штриховой меры. Это очевидным образом ограничивает размер элемента интегрирования изображения вдоль оси x условием $d_{x\text{эл}} \leq d_{xоб}/8$. Однако как показывают оценки и численные расчеты, практически во всех представляющих интерес ситуациях в задаче обнаружения объекта $d_{x\text{эл}}^{\text{опт}} > d_{xоб}/8$. Поэтому ниже при расчете предельной дальности распознавания объекта величина принимается фиксированной и равной

$$\Sigma_{\text{эл}} = d_{x\text{эл}} d_{y\text{эл}} \quad (1.17)$$

при

$$d_{x\text{эл}} = d_{xоб}/8, \quad d_{y\text{эл}} = \min\{d_{yоб}, d_{к}\},$$

где $d_{yоб}$ — размер объекта по оси y ; $d_{к}$ — размер кадра.

Таким образом, нахождение предельной дальности распознавания $L_{рас}^*$ объекта приближенно сводится к решению уравнения

$$\delta(L, d_{x\text{эл}}^{\text{опт}}, d_{y\text{эл}}^{\text{опт}}) = \delta_{п} \quad (1.18)$$

с учетом (1.11) и (1.17).

2. ОПТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ «ОКЕАН — АТМОСФЕРА»

Рассматривается следующая модель системы «океан—атмосфера»: плоскопараллельный слой сравнительно небольшой толщины (атмосфера), прилегающий к полубесконечной среде (океан) с преломляющей и отражающей границей (коэффициент преломления на границе $n = 1,34$). Влияние поверхности (преломление, отражение и пропускание) учитывается на основании формул Френеля.

2.1. Океан

Ограничимся моделью однородного слоя морской воды, оптические свойства которой задаются показателем ослабления ϵ , вероятностью выживания фотона Λ и индикатрисой рассеяния $x(\beta)$ (β — угол рассеяния). Считается, что функция $x(\beta)$ нормирована соотношением

$$\frac{1}{2} \int x(\beta) \sin \beta \, d\beta = 1. \quad (2.1)$$

Введем также показатели поглощения κ и рассеяния σ , причем $\varepsilon = \kappa + \sigma$, $\Lambda = \sigma/\varepsilon$. Для прогнозных и методических исследований полезно иметь некоторую малопараметрическую модель оптических свойств океана с аналитическим заданием индикатрисы рассеяния. Такую задачу можно решить, опираясь на известную, описанную в [13, 14] модель морской воды как совокупности крупной органической и мелкой терригенной фракций взвеси, чистой воды и растворенного желтого вещества.

Индикатриса рассеяния

Нормированная согласно (2.1) индикатриса рассеяния для каждой компоненты морской воды

$$x_i(\beta) = \sigma_i(\beta)/\sigma_i, \quad (2.2)$$

где $\sigma_i(\beta)$ — показатель направленного светорассеяния для i -й компоненты, а

$$\sigma_i = (1/2) \int \sigma_i(\beta) \sin\beta \, d\beta. \quad (2.3)$$

Если концентрации крупной и мелкой фракций взвеси в данном регионе равны соответственно C_K и C_M , то показатель рассеяния воды и индикатриса рассеяния могут быть рассчитаны по формулам

$$\sigma = \sigma_B + C_K \sigma_K^0 + C_M \sigma_M^0, \quad (2.4)$$

$$x(\beta) = \frac{\sigma_B x_B(\beta) + C_K \sigma_K^0 x_K(\beta) + C_M \sigma_M^0 x_M(\beta)}{\sigma}, \quad (2.5)$$

где индекс «В» относится к чистой воде, индексы «К» и «М» — к крупной и мелкой фракциям, σ_K^0 и σ_M^0 — показатели рассеяния крупной и мелкой фракций в расчете на единичную концентрацию. Характерно, что при $\beta < 2^\circ$ индикатриса рассеяния морской воды практически полностью определяется крупной фракцией, при $\beta > 15^\circ$ — мелкой, рассеяние водой вносит заметный вклад только при $\beta > 90^\circ$. В углах $\beta > 90^\circ$ индикатриса рассеяния изменяется очень слабо и в дальнейшем будем считать ее изотропной. Тогда индикатрису рассеяния морской воды можно задать функцией

$$x(\beta) = \begin{cases} F[ax_K(\beta) + (1-a)x_M(\beta)] & 0 \leq \beta \leq \pi/2 \\ 2(1-F) & \pi/2 \leq \beta \leq \pi \end{cases} \quad (2.6)$$

где F — доля света, рассеянного «вперед», т.е.

$$F = (1/2) \int_0^{\pi/2} x(\beta) \sin\beta \, d\beta, \quad (2.7)$$

a — доля света, рассеянного крупной фракцией:

$$a = \frac{C_K \sigma_K^0}{C_K \sigma_K^0 + C_M \sigma_M^0} = \frac{\sigma_K^0 C_K / C_M}{\sigma_K^0 C_K / C_M + \sigma_M^0}. \quad (2.8)$$

Одним из важнейших интегральных параметров индикатрисы является средний квадрат угла отклонения в акте рассеяния на интервале $0 \leq \beta \leq \pi/2$, т.е. величина

$$\beta_2 = \int_0^{\pi} x(\beta) \beta^2 \sin\beta \, d\beta / \int_0^{\pi} x(\beta) \sin\beta \, d\beta. \quad (2.9)$$

На основании данных, приведенных в [13], для индикатрис крупной ($x_K(\beta)$) и мелкой ($x_M(\beta)$) взвесей имеем

$$\beta_{2K} \approx 3,45 \cdot 10^{-3}, \quad \beta_{2M} \approx 0,27. \quad (2.10)$$

Соответственно параметр β_2 для индикатрисы (2.6) равен

$$\beta_2 = a\beta_{2K} + (1-a)\beta_{2M}. \quad (2.11)$$

Обработка большой выборки экспериментально измеренных индикатрис рассеяния морских и океанских вод показала, что между параметрами β_2 и F имеет место следующая корреляционная связь:

$$1 - F \approx \beta_2 / 3 . \quad (2.12)$$

Точность соотношения (2.12) иллюстрирует рис. 1, построенный по данным численной обработки индикатрис.

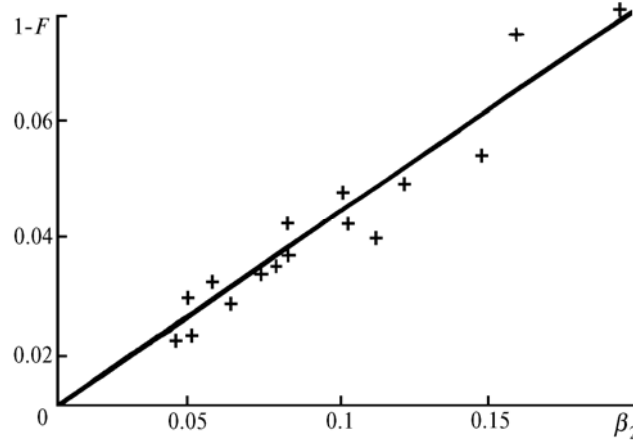


Рис. 1. Зависимость величины $1 - F$ от параметра β_2

Таким образом, мы получили однопараметрическую модель для описания индикатрисы рассеяния в море. В ней единственный параметр — величина a , т.е. доля света, рассеянного крупной фракцией. Она может быть определена, например, заданием C_R/C_M . Через параметр a определяются по (2.11) и (2.12) интегральные параметры индикатрисы β_2 и F . Изменение a , т.е. изменение соотношения между концентрациями фракций взвеси C_R/C_M , позволяет в основных чертах описать изменчивость индикатрис рассеяния в различных регионах Мирового океана.

Более того, можно использовать полностью аналитическое однопараметрическое описание всей индикатрисы. Функции $x_K(\beta)$ и $x_M(\beta)$ в интервале $[0, \pi/2]$ допускают достаточно точную и простую аппроксимацию:

$$x_K(\beta) = 2 b_K^2 \exp(-b_K \beta), \quad x_M(\beta) = 2 b_M^2 \exp(-b_M \beta) \quad (2.13)$$

при

$$b_K = 41,7 \text{ rad}^{-1}, \quad b_M = 4,6 \text{ rad}^{-1}. \quad (2.14)$$

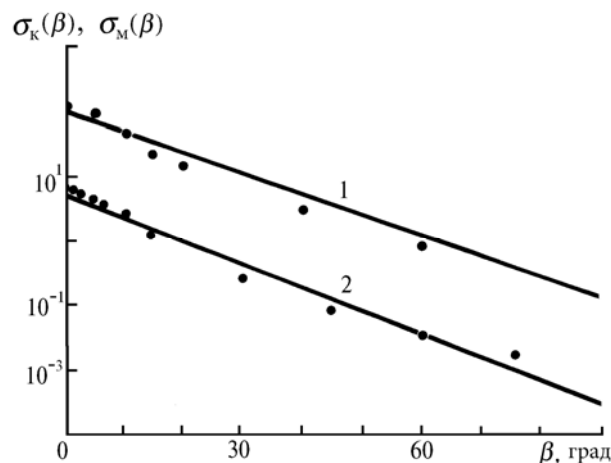


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния крупной $\sigma_K(\beta) = \sigma_K^0 x_K(\beta)$ (кривая 1, масштаб над осью абсцисс) и мелкой $\sigma_M(\beta) = \sigma_M^0 x_M(\beta)$ (2) фракции гидрозоля по данным [13] (точки) и аппроксимация по формулам (2.13), (2.14) (прямые)

Сопоставление исходных [13] и аппроксимационных данных показано на рис. 2. Заметим, что если $x_i(\beta) = 2b_i^2 \exp(-b_i \beta)$, то $\beta_{2i} = 6 / b_i^2$.

С учетом (2.13) формула (2.6) принимает вид

$$x(\beta) = \begin{cases} 2F[ab_K^2 \exp(-b_K \beta) + (1-a)b_M^2 \exp(-b_M \beta)], & 0 \leq \beta \leq \pi/2, \\ 2(1-F), & \pi/2 \leq \beta \leq \pi. \end{cases} \quad (2.15)$$

По некоторым данным можно ожидать значимой корреляции параметра a с показателем ослабления ϵ . Это дало бы возможность сопоставить каждое значение ϵ с индикатрисой рассеяния. Однако, судя по экспериментальным данным [13, 14], такие корреляции носят региональный характер.

Анализ имеющегося массива экспериментальных данных для индикатрис рассеяния различных акваторий Мирового океана приводит к заключению, что характерные индикатрисы чистых океанских вод сравнительно мало изменчивы. Аналогичная ситуация имеет место и для более мутных морских вод. Наиболее типичным случаям соответствуют значения $a = 0,69$ для океанских вод и $a = 0,62$ для морских. Поэтому для прогнозных и методических расчетов можно использовать некоторые типичные модели индикатрис «морская» и «океанская», параметры которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры модельных индикатрис				
Типы вод	Параметры			Примечание
	a	β_2	$1-F$	
Океанская	0.69	0.086	0.029	$\beta_{21} = 3,45 \cdot 10^{-3}$
Морская	0.62	0.105	0.035	$\beta_{22} = 0.27$

Вероятность выживания фотона

Измерение вероятности выживания фотона Λ является методически и технически одной из наиболее сложных задач. Поэтому особенно ценно, что из физической модели оптических свойств морской воды следует простая связь между Λ и ϵ .

Показатель ослабления света в море формируется как сумма показателей ослабления всех оптически активных компонент морской воды:

$$\epsilon = \epsilon_{взв} + \kappa_{ж} + \epsilon_{в}, \quad (2.16)$$

где $\epsilon_{взв}$, $\epsilon_{в}$ — показатели ослабления взвеси и воды; $\kappa_{ж}$ — показатель поглощения растворенного желтого вещества. В окне прозрачности ($\lambda \approx 550$ нм) можно пренебречь поглощением взвеси ($\sigma_{взв} = \epsilon_{взв}$). Тогда, учитывая, что $\epsilon_{в} = \kappa_{в} + \sigma_{в}$ и $\sigma = \sigma_{взв} + \sigma_{в}$, имеем

$$\epsilon = \sigma + \kappa_{ж} + \kappa_{в}. \quad (2.17)$$

При $\lambda = 550$ нм поглощение желтого вещества очень мало. Согласно [14] для различных акваторий Мирового океана $\kappa_{ж}/\epsilon \approx 0,02-0,07$. Введем малую поправку на поглощение желтым веществом, используя среднее значение $\kappa_{ж}/\epsilon = 0,045$. Тогда, учитывая, что $\kappa_{в} \approx 0,035 \text{ м}^{-1}$, для величины $1 - \Lambda = \kappa/\epsilon$ имеем

$$1 - \Lambda = 0,045 + 0,035/\epsilon, \quad (2.18)$$

т.е. окончательно получим

$$\Lambda = 0,955 - 0,035/\epsilon. \quad (2.19)$$

Соотношение (2.19) было получено в [15], где показана его высокая точность в интервале $0,1 \text{ м}^{-1} < \epsilon < 0,5 \text{ м}^{-1}$ для различных акваторий Мирового океана (см. рис. 3).

Таким образом, для расчетов можно использовать следующую малопараметрическую корреляционную модель. Задается тип вод и значение ϵ . Тип вод (морская, океанская) определяет индикатрису рассеяния (см. табл. 2, формулу (2.15)), а значение ϵ определяет Λ согласно соотношению (2.19).

В созданной программе предусмотрена и другая возможность — задание величин ϵ , Λ и характеристик индикатрисы (a , β_1 , β_2) по усмотрению пользователя. Это может быть полезно, например, если известны более точные региональные характеристики морской воды (особенно в случае их аномалии), а также при анализе чувствительности дальности видения к вариации (или точности задания) гидрооптических характеристик.

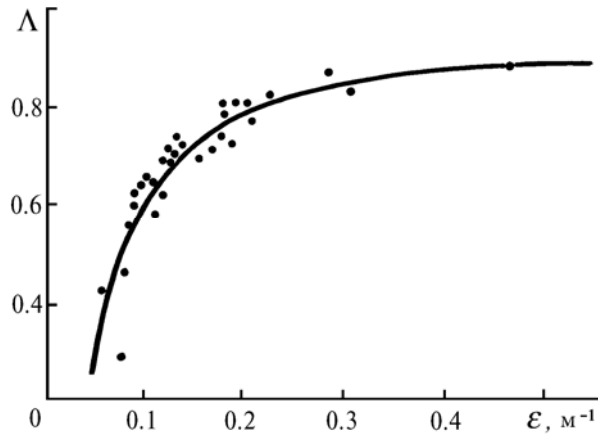


Рис. 3. Корреляция параметров Λ и ϵ . Кривая построена по формуле (2.19), точки — экспериментальные результаты для различных регионов Мирового океана по данным [13–16]

Заметим, что для вариации вытянутости индикатрисы достаточно изменять только величину a . При задании параметров «экспериментальной» индикатрисы следует иметь в виду, что β_{21} — средний квадрат угла рассеяния по некоторой малоугловой части индикатрисы, β_{22} — по оставшейся в интервале $[0, \pi/2]$, a — доля рассеянного света, приходящегося на малоугловую часть. Разбиение индикатрисы на две части, вообще говоря, произвольно. В качестве рекомендации можно указать, что целесообразно разбиение, при котором $a \approx 0,4–0,7$. Кроме того, опыт обработки морских индикатрис показывает, что в интервале $[0, \pi/2]$ они достаточно хорошо аппроксимируются суммой двух экспонент

$$x(\beta) = B_1 \exp(-b_1 \beta) + B_2 \exp(-b_2 \beta). \quad (2.20)$$

В этом случае

$$\beta_{21} = 6/b_1^2, \quad \beta_{22} = 6/b_2^2, \quad a = B_1/2b_2^2.$$

Взволнованная поверхность моря

Будем рассматривать типичные ситуации состояния поверхности моря — ветровое волнение, зыбь и смешанное волнение, в котором максимумы пространственных энергетических спектров ветровых волн $A_1^2(\mathbf{v})$ и зыби $A_2^2(\mathbf{v})$ достаточно разнесены. В этом случае пространственный спектр поверхности можно представить в виде [17]:

$$A_0^2(\mathbf{v}) = A_1^2(\mathbf{v}) + A_2^2(\mathbf{v}). \quad (2.21)$$

Для простоты полагаем, что обе системы волн распространяются в одном направлении (в направлении критического размера объекта), описываются одномерными спектрами и, кроме того, выполняется дисперсионное соотношение для гравитационных поверхностных волн.

Спектр ветрового волнения зададим в форме Пирсона—Московитца с модификацией, предложенной в [18, 19]:

$$A_1^2(\mathbf{v}) = \frac{a_1}{v^4} \exp\left(-\frac{z_1}{v} - \beta_1 v^2\right) \delta(\varphi - \varphi_0), \quad (2.22)$$

где a_1 — константа спектра Пирсона—Московитца ($a_1 = 0,00405$); $z_1 = 0,74g^2/V^4$, g — ускорение свободного падения; V — скорость ветра; φ — азимутальный угол в плоскости поверхности раздела; φ_0 — направление распространения волн; $\beta_1 = \beta_1(V)$ — параметр, выбираемый так, чтобы зависимость дисперсии ветровых волн от скорости ветра соответствовала данным Кокса—Манка [20].

Спектр волн зыби выберем из следующих соображений. Известно, что после прекращения действия ветра в спектре волнения остается лишь область основного максимума, для описания которой вполне приемлемы соотношения линейной гидродинамической модели поверхности моря. С учетом этого факта и дисперсионного соотношения из [17] для зыби можно записать

$$A_2^2(\mathbf{v}) = \frac{a_2}{v^4} \exp\left(-\frac{z_2}{v} - \beta_2 v^2\right) \delta(\varphi - \varphi_0), \quad (2.23)$$

где $a_2 = 217h_3^2 / (g\tau_3^2)^2$, h_3 и τ_3 – средняя высота и средний период волн зыби (параметры, обычно определяемые при наблюдении волн зыби), $z_2 = 683 / (g\tau_3^2)^2$. Здесь введен параметр $\beta_2 = 1 / v_n^2$, обеспечивающий убывание спектральной плотности вне области основного максимума; v_n – нижняя граница переходного интервала спектра ($v_n \approx 91 / (g\tau_3^2)$).

2.2. Атмосфера

Модель атмосферы основывается на модели «стандартной радиационной атмосферы», принятой международной комиссией по радиации [21, 22]. В соответствии с [21, 22] задаются молекулярная атмосфера, а также типы, оптические постоянные, микроструктура и распределение аэрозолей по стратам. Нижние слои атмосферы подвержены наибольшей изменчивости и играют основную роль в ослаблении и рассеянии излучения. Поэтому в модели атмосферы слои, расположенные выше 6 км, рассматриваются как один слой со средними оптическими характеристиками. Индикатрисы рассеяния и показатели ослабления атмосферных аэрозолей рассчитывались по формулам Ми на основе данных микроструктуры и оптических постоянных, приведенных в [21, 22]. Характеристики моделей атмосферы иллюстрируются табл. 3. Здесь τ^m – оптическая толщина соответствующего слоя атмосферы за счет молекулярного рассеяния с рэлеевской индикатрисой $x(\beta) = 0,75(1 + \cos^2\beta)$ при $\lambda = 550$ нм, β – угол рассеяния; τ^a – аэрозольная оптическая толщина страты также при $\lambda = 550$ нм, определяемая составом и концентрацией аэрозоля. В нижнем, приводном слое атмосферы согласно [23] считается, что концентрация аэрозолей экспоненциально убывает с высотой, т. е. аэрозольный показатель ослабления на высоте H при $H < 2$ км равен

$$\epsilon_a = 3,55/S_m \exp(-\alpha H), \quad (2.24)$$

где $\alpha = 0,92$ (получено на основании [24]); S_m – метеорологическая дальность видимости (МДВ, км) – характеризует оптическое состояние атмосферы в приводном слое в момент наблюдения объекта.

Таблица 3

Модель атмосферы

Высота над уровнем моря H , км	Номер слоя	Тип аэрозоля	τ^m	τ^a
0 – 2	1	Морской	0,021	$\frac{3,246}{S_m}$
2 – 6	2	Континентальный	0,031	0,02
$H > 6$	3	Континентальный $H < 20$ км Стратосферный $H > 20$ км	0,046	0,019

Таким образом, единственный варьируемый параметр в модели атмосферы – величина МДВ. При этом оптическая аэрозольная толщина нижнего приводного двухкилометрового слоя атмосферы при $\lambda = 550$ нм

$$\tau_1^a = 3,246/S_m. \quad (2.25)$$

Индикатрисы рассеяния света аэрозолями атмосферы аппроксимируются следующим образом:

$$x_a(\beta) = \sum_{i=1}^2 B_i \exp(-b_i\beta) + \tilde{x}_a(\beta), \quad (2.26)$$

где экспоненциальные слагаемые описывают ореольную часть индикатрисы рассеяния; $\tilde{x}_a(\beta)$ – сравнительно слабо изменяющаяся функция. Доля света F_β^a , связанная с ореольной частью индикатрисы и рассеянная в интервал углов $[0, \beta]$, определяется по формуле

$$F_\beta^a = \sum_i \frac{B_i}{2b_i} [1 - (b_i\beta + 1) \exp(-b_i\beta)]. \quad (2.27)$$

В табл. 4 приведены необходимые для расчетов параметры индикатрис рассеяния двумя основными типами аэрозолей атмосферы – морским и континентальным. Кроме B_i , b_i и F_β^a ($\beta = 20$) в таблице

приведены значения аэрозольных индикатрис при угле $\beta = \pi/2$. Стратосферный аэрозоль практически не влияет на рассчитываемые величины, и его параметры не приводятся.

Таблица 4

Параметры индикатрис рассеяния атмосферных аэрозолей

Тип аэрозоля	Параметры				$x_s(\beta)$		F_s^a	
	B_1	B_2	b_1	b_2	$\beta = \pi/2$	$\beta = \pi$	$\beta = 20^\circ$	$\beta = 90^\circ$
Maritime	630	30,0	40	5,3	0,16	0,60	0,427	0,895
Continental	602	16,7	90	3,3	0,30	0,37	0,281	0,885

Заметим, что описанная модель атмосферы является одной из простейших. Она особенно полезна в прогнозных исследованиях. В случае необходимости в программе могут быть использованы региональные и специальные локальные оптические модели, сформированные на основе банков данных и процедур пакета ATMOTOOLS [25].

3. ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Рассмотрим основные параметры системы, от которых зависит дальность видения. Для удобства все параметры разделим на 8 блоков с условными названиями: система, геометрия, источник, приемник, среда, объект, засветка, ПОР.

Система

Описываемая методика предназначена для оценки предельных возможностей пассивных (при солнечном освещении объекта) и активных лазерно-телевизионных систем наблюдения. При этом считается, что активная система может работать как в ночных, так и в дневных условиях.

Надежность обнаружения (распознавания) задается через вероятность ложной тревоги $P_{лт}$ и вероятность обнаружения $P_{обн}$, которые в соответствии с системой уравнений (1.8) и соотношением (1.9) определяют пороговое отношение сигнал/шум.

Геометрия

Предполагается, что телевизионная система расположена под водой, либо установлена на летательном аппарате, находящемся на высоте H над уровнем моря, направление наблюдения составляет угол $\theta_0 = \arccos \mu_0$ с вертикалью, что соответствует углу $\theta'_0 = \arccos \mu'_0$ после преломления в воде. Случай $H = 0$ соответствует подводной телевизионной системе.

Источник

Считается, что в активной системе используется лазерный источник (импульсный или непрерывного действия) с расходимостью $2\gamma_{ист}$, определяющей размер освещенного пятна на поверхности океана $R_{ист} = 2\gamma_{ист}H/\mu_0$. При этом как в случае $H > 0$, так и в случае $H = 0$ (подводный вариант) считается, что расходимость излучения в воде $2\gamma'_{ист} = 2\gamma_{ист}/n$ (в подводном варианте излучение попадает в воду через иллюминатор).

В случае импульсного источника с энергией W_0 в одном импульсе и числом импульсов $N_{имп}$ за время записи кадра полная энергия источника $W = W_0N_{имп}$. В случае стационарного источника под величиной $W = W_0N_{имп}$ следует понимать энергию источника излучения за время записи кадра.

Приемник

Считается, что приемником излучения является телевизионная трубка с числом строк M и пороговым контрастом $\kappa_{п}$. Измеряемая на практике величина $\kappa_{п}$ задает через соотношение (1.7) параметр внутренних шумов видеосистемы α . Характеристикой фотоприемника является также константа

$$C = S_\lambda T_{опт} A/e (1 + B),$$

где S_λ — спектральная чувствительность фотокатода; $T_{опт}$ — пропускание оптической системы; e — заряд электрона; B — коэффициент увеличения флуктуационных шумов, обусловленный вторичной эмиссией; A — некоторый коэффициент (для суперорбиткона $A \approx 0,3$ [24, 26]).

При $S_\lambda = 0,05$ А/Вт, $T_{опт} = 0,5$, $B = 1$ и $A = 0,3$ величина $C = 2,34 \cdot 10^{16}$ Дж⁻¹. Константа C , как уже отмечалось, связана с квантовой эффективностью фотоприемника η . При $\lambda = 500$ нм

$C = 2,34 \cdot 10^{16} \text{ Дж}^{-1}$ соответствует $\eta \approx 0,01$.

Диаметр входного зрачка приемника равен $D_{\text{пр}}$. Апертурный угол поля зрения приемника $2\gamma_{\text{пр}}$, определяет размер кадра. Размер кадра на поверхности океана равен $2\gamma_{\text{пр}}H/\mu_0$. Считается, что система наблюдения относится к типу «широкий—узкий», т. е. засвечивается весь кадр ($2\gamma_{\text{пст}} \geq 2\gamma_{\text{пр}}$).

Среда

Принятые модели моря и атмосферы описаны в разделе 2. При этом в программной реализации алгоритма предусмотрены следующие возможности. Параметры типичной «океанской» и типичной «морской» индикатрис, приведенные в разделе 2.1, занесены в программу. Пользователю достаточно указать только тип вод. Для экспериментальной индикатрисы следует задать параметры a , β_{21} и β_{22} . Кроме того, задается значение показателя ослабления ϵ . Величина Λ может либо задаваться корреляционной $\Lambda_{\text{кор}}$ (в этом случае она рассчитывается по формуле (2.19), либо некоторым экспериментальным значением.

Таким образом, для определения модели моря при использовании $\Lambda_{\text{кор}}$ достаточно указать тип вод и задать величину ϵ .

Возможен другой крайний вариант: независимо задаются ϵ , Λ и характеристики индикатрисы (индикатриса экспериментальная). Могут быть реализованы также смешанные варианты (например, $\Lambda_{\text{кор}}$, а индикатриса экспериментальная; либо задан тип вод, величина ϵ и экспериментальное Λ).

Для характеристики состояния поверхности раздела «атмосфера—вода» выбирается тип поверхности (гладкая или взволнованная). Для взволнованной поверхности указывается скорость ветра V , средняя высота h_3 и средний период τ_3 волн зыби.

Модель и параметры атмосферы приведены в разделе 2.2. Здесь единственный переменный задаваемый параметр модели — метеорологическая дальность видимости S_M (в км) на уровне моря.

Объект

Рассматриваемый объект находится на глубине L и характеризуется наименьшим (критическим) размером $d_{x,об}$ и размером $d_{y,об}$ в перпендикулярном направлении. Предполагается, что объект отражает по закону Ламберта с альбедо $A_{об}$.

Засветка

При оценке пассивных и активных систем, работающих в дневных условиях, учитывается фоновая засветка, создаваемая излучением Солнца при отражении и рассеянии его небом, морем и границей раздела. Положение Солнца над горизонтом определяется углом $\theta_c = 90^\circ - \arccos \mu_c$. Мощность засветки пропорциональна времени записи кадра t_k и спектральной ширине фильтра $\Delta\lambda$ на приемнике.

Помеха обратного рассеяния

Для оценки активных систем видения необходимо рассчитывать мощность помехи обратного рассеяния (ПОР). Учитываются два источника ПОР: первый связан с обратным рассеянием лазерного излучения в воде, второй — с обратным рассеянием в атмосфере.

Мощность ПОР на фотоприемнике зависит от следующих параметров системы: L_1 — начало пространственного стробирования ПОР по глубине (величина L_1 отсчитывается от объекта), и $\Delta t_{\text{стр}}$ — длительность временного строба.

4. РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Для расчета предельных дальностей обнаружения и распознавания объекта в рассеивающей среде необходимо решить уравнения (1.16) и (1.18) с учетом (1.11). При этом необходимо задать расчетные формулы для функции Ψ_1 , а также для энергий полезного сигнала $W_{\text{п.с}}$ и фона $W_{\text{ф}}$. Для краткости ограничимся, в основном, структурными формулами с расшифровкой лишь их главных членов.

4.1. Энергия фона

Часть фона, вызванную рассеянием и отражением солнечного излучения, будем называть засветкой. Учет засветок необходим при расчете дальности видения в пассивных системах и в активных системах, работающих в дневных условиях. Другая часть фона — помеха обратного рассеяния (ПОР) — образуется при рассеянии в среде (в воде и в атмосфере) излучения от источника подсветки. Не расчет необходим при оценке возможностей активных систем.

Засветка

Энергия солнечной засветки на входе фотоприемника равна

$$W_{\text{зас}} = W'_{\text{зас}} d_{x,эл}^{\text{опт}} d_{y,эл}^{\text{опт}}, \quad (4.1)$$

где $d_{x\text{эл}}^{\text{опт}}$, $d_{y\text{эл}}^{\text{опт}}$ определяются решением системы (1.16) в задаче обнаружения объекта и соотношением (1.17) в случае его распознавания. Плотность энергии засветок в расчете на единицу площади объекта.

$$W'_{\text{зас}} = I \sum_{\text{пр}} t_{\text{к}} \Delta\lambda / z^2, \quad (4.2)$$

где I — интенсивность солнечных засветок на входе фотоприемника; $\Sigma_{\text{пр}} = \pi D_{\text{пр}}^2 / 4$ — площадь входного зрачка приемника; $D_{\text{пр}}$ — диаметр входного зрачка; $t_{\text{к}}$ — время записи кадра (для активной системы наблюдения $t_{\text{к}} = \Delta t_{\text{стр}} N_{\text{имп}}$), $\Delta\lambda$ — спектральная ширина фильтра, величина

$$z = H/\mu_0 + L/n\mu'_0 \quad (4.3)$$

определяет телесный угол приёма, равный $d_{x\text{эл}}^{\text{опт}} d_{y\text{эл}}^{\text{опт}} / z^2$,

$$\mu'_0 = \sqrt{(\mu_0^2 + n^2 - 1)/n^2} - \quad (4.4)$$

косинус угла наблюдения в воде с учетом преломления. В (4.3) учтено изменение телесного угла при переходе через границу раздела «воздух—вода».

Интенсивность солнечных засветок на входе фотоприемника складывается из четырех основных компонент:

$$I = (E_c \mu_s / \pi) [\rho_a(H) + \rho_{\text{в.н}} + \rho_{\text{диф}}^{\text{м}} + \rho_{\text{диф}}^{\text{пов}}], \quad (4.5)$$

где $E_c = 2 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{нм} \cdot \text{с}$ — солнечная постоянная, т.е. освещенность, создаваемая Солнцем на нормально ориентированной площадке на верхней границе атмосферы в единичном спектральном интервале при длине волны $\lambda = 550 \text{ нм}$; $\rho_a(H)$ — коэффициент яркости (КЯ) света, отраженного приводным слоем атмосферы толщиной H с учетом ослабления солнечного излучения вышележащим слоем атмосферы H^* ; $\rho_{\text{в.н}}$ — КЯ света, отраженного морской водой при освещении ее направленным светом (прямой солнечной радиацией и ореольной частью рассеяния в атмосфере) с учетом ослабления в атмосфере как падающего, так и рассеянного морем света; $\rho_{\text{диф}}^{\text{м}}$ и $\rho_{\text{диф}}^{\text{пов}}$ — КЯ света, отраженного морской водой и поверхностью при освещении моря рассеянным светом неба с учетом его ослабления на пути к приемнику излучения.

Зеркальное отражение направленного излучения поверхностью моря здесь не учитывается, т. к. предполагается, что осуществлена отстройка от солнечного блика.

Входящие в формулу (4.5) коэффициенты яркости можно рассчитать в квазиоднократном приближении. В частности,

$$\rho_a(H) = \frac{x_a(\cos\beta)}{4(1 - F_H)(\mu_s + \mu_0)} \left\{ 1 - \exp\left[-\tau_H(1 - F_H)\left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu}\right)\right] \right\} \exp\left[-\tau_H^*(1 - F_H^*)/\mu_s\right], \quad (4.6)$$

где τ_H и F_H — оптическая толщина и доля света, рассеянного вперед в элементарном объеме, применительно к атмосферному слою $(0, H)$; τ_0^* и F_H^* — оптическая толщина всей атмосферы без нижнего слоя толщины H и доля света, рассеянного вперед для этой части атмосферы;

$$\rho_{\text{в.н}} = \frac{\Lambda(1 - F)}{2n(1 - \Lambda F)(\mu'_0 + \mu'_c)} T_{\text{атм}}^{\text{нас}} T_{\text{пов}}(\mu_0) T_{\text{пов}}(\mu_c), \quad (4.7)$$

n — показатель преломления воды; $T_{\text{пов}}(\mu)$ — пропускание границы раздела «вода—воздух», $T_{\text{атм}}^{\text{нас}}$ — пропускание нерассеянного и ореольной части рассеянного атмосферой света.

Помеха обратного рассеяния

Аналогично (4.1) запишем энергию ПОР в виде

$$W_{\text{пор}} = W'_{\text{пор}} d_{x\text{эл}}^{\text{опт}} d_{y\text{эл}}^{\text{опт}}. \quad (4.8)$$

ПОР формируется за счет рассеяния излучения в воде ($W'_{\text{пор.в}}$) и в атмосфере ($W'_{\text{пор.а}}$), т.е.

$$W'_{\text{пор}} = W'_{\text{пор.в}} + W'_{\text{пор.а}}. \quad (4.9)$$

Предполагается, что при использовании импульсного лазерного источника может быть осуществлена частичная временная отсечка ПОР. При этом строб длительностью $\Delta t_{\text{стр}}$ включает приемник излучения в момент, когда приходит сигнал от точки, расположенной на расстоянии L_1 от объекта. Таким образом,

приемник принимает излучение, рассеянное «назад» слоем среды от $L-L_1$ до $L-L_1+c\Delta t_{\text{стр}}/2n$ (c/n – скорость света в среде). Тогда

$$W'_{\text{пор.в}} = \frac{W_0 N_{\text{имп}}}{\pi n} \frac{\Sigma_{\text{пр}}}{(2\gamma_{\text{ист}})^2 z^2} \rho_{\text{W}}(L_1, \Delta t_{\text{стр}}) T_{\text{пов}}^2(\mu_0), \quad (4.10)$$

где $W_0 N_{\text{имп}}$ – полная энергия источника за время записи кадра t_k , величина z определена формулой (4.3), $\rho_{\text{W}}(L_1, \Delta t_{\text{стр}})$ – коэффициент яркости в направлении «назад» слоя морской воды, от которого приходит ПОР.

Мощность $W'_{\text{пор.а}}$ формируется следующим образом. Луч лазера отражается от поверхности моря, рассеивается в атмосфере «назад», вновь отражается зеркально от поверхности и попадает в приемник, т. е.

$$W'_{\text{пор.а}} = \frac{W_0 N_{\text{имп}}}{\pi} \frac{\Sigma_{\text{пр}}}{(2\gamma_{\text{ист}})^2 z^2 z_1^2} \rho_{\text{a}}(L_1, \Delta t_{\text{стр}}) R_{\text{пов}}^2(\mu_0). \quad (4.11)$$

Здесь $R_{\text{пов}}(\mu_0)$ – коэффициент зеркального отражения морской поверхностью при падении на нее света под углом $\arccos \mu_0$, $z_1 = H / \mu_0 + L_1 n / \mu'_0$, $\rho_{\text{a}}(L_1, \Delta t_{\text{стр}})$ – коэффициент яркости приводного слоя атмосферы толщиной $c\Delta t_{\text{стр}}/2$ в направлении „назад”.

4.2. Энергия полезного сигнала и функция Ψ_1

Обнаружение

Выражение для энергии полезного сигнала $W_{\text{п.с}}$ в соответствии с (1.14), (1.15) имеет вид

$$W_{\text{п.с}} = W \eta_{\text{п.с}} |A_{\text{об}} - A_{\text{ф}}| \Psi_1, \quad (4.12)$$

$$\eta_{\text{п.с}} = \eta'_{\text{п.с}} d_{\text{x эл}}^{\text{опт}} d_{\text{y эл}}^{\text{опт}}. \quad (4.13)$$

Для системы пассивного наблюдения (при солнечном освещении) следует положить

$$W = E_c t_k \Delta \lambda, \quad (4.14)$$

$$\eta'_{\text{п.с}} = \frac{\mu_c}{\pi n} \frac{\Sigma_{\text{пр}}}{z^2} T_{\text{атм}}^{\text{пас}} \exp\left\{- (1 - \Lambda F) \varepsilon L \left(\frac{1}{\mu'_c} + \frac{1}{\mu'_0}\right)\right\}, \quad (4.15)$$

$$A_{\text{ф}} = \frac{\Lambda(1 - F)}{4(1 - \Lambda F)}. \quad (4.16)$$

Для активной системы наблюдения

$$W = W_0 N_{\text{имп}}, \quad (4.17)$$

$$\eta'_{\text{п.с}} = \frac{1}{\pi n} \frac{\Sigma_{\text{пр}}}{(2\gamma_{\text{ист}})^2 z^2} T_{\text{атм}}^{\text{акт}} \exp[- 2(1 - F) \varepsilon L / \mu'_0], \quad (4.18)$$

где

$$T_{\text{атм}}^{\text{акт}} = \exp[- 2(1 - F_H) \tau_H / \mu'_0], \quad (4.19)$$

$$A_{\text{ф}} = \frac{\Lambda(1 - F)}{4(1 - \Lambda F)} \left\{ 1 - \exp\left[- (1 - \Lambda F) e\left(\frac{c\Delta t_{\text{стр}}}{n} - \frac{2L_1}{\mu'_0}\right)\right] \right\}. \quad (4.20)$$

Выражение для функции Ψ_1 в общем случае имеет вид [4]

$$\Psi_1 = \frac{1}{4\pi \Sigma_{\text{эл}} \langle A_{\text{об}} \rangle} \int_{-\infty}^{\infty} \int A_{\text{об}}(\mathbf{v}) T(\mathbf{v}) U(\mathbf{v}, \Sigma_{\text{эл}}) d\mathbf{v}. \quad (4.21)$$

Здесь $A_{\text{об}}(\mathbf{v})$ и $U(\mathbf{v}, \Sigma_{\text{эл}})$ – Фурье спектры (\mathbf{v} – пространственная частота) соответственно пространственного распределения альбедо объекта $A_{\text{об}}(\mathbf{r})$ и функции

$$U(\mathbf{r}, \Sigma_{эл}) = \begin{cases} 1, & \text{при } \mathbf{r} \in \Sigma_{эл} \\ 0, & \text{при } \mathbf{r} \notin \Sigma_{эл} \end{cases},$$

$T(\mathbf{v})$ – частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) среды, учитывающая размытие изображения вследствие рассеяния света в среде на трассе наблюдения, $\langle A_{об} \rangle$ – среднее альbedo объекта. Для однородного объекта прямоугольной формы

$$\Psi_1 = \Psi(d_{x об}/2, d_{y об}, d_{x эл}, d_{y эл}), \quad (4.22)$$

где

$$\Psi(d_{x об}, d_{y об}, d_{x эл}, d_{y эл}) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(v_x d_{x об}/2) \sin(v_y d_{y об}/2)}{v_x/2 v_y/2} T\left(\sqrt{v_x^2 + v_y^2}\right) \frac{\sin(v_x d_{x эл}/2) \sin(v_y d_{y эл}/2)}{v_x d_{x эл}/2 v_y d_{y эл}/2} dv_x dv_y. \quad (4.23)$$

Подчеркнем, что в формуле (4.22) $d_{x об}$ и $d_{y об}$ – размеры реального объекта вдоль критической оси x и оси y . В записи (4.22) учтено, что в задаче об обнаружении объекта размер тест-объекта Джонсона вдоль оси x в два раза меньше размера реального объекта.

Для расчета ЧКХ слоя воды можно воспользоваться малоугловым приближением теории переноса. Используя аппроксимацию индикатрисы рассеяния суммой двух экспонент, имеем [1]

$$T(\mathbf{v}) = \exp \left\{ -\frac{\Lambda \varepsilon L}{\mu'_0} \left[1 - a \left[1 + \frac{\beta_{21}}{6} \left(\frac{vL}{\mu'_0} \right)^2 \right]^{-1/2} - (1-a) \left[1 + \frac{\beta_{22}}{6} \left(\frac{vL}{\mu'_0} \right)^2 \right]^{-1/2} \right] \right\}. \quad (4.24)$$

Соотношения (4.21)–(4.24) определяют функцию Ψ_1 .

Распознавание

В задаче распознавания объекта в соответствии с критериями Джонсона необходимо на критическом размере объекта различать 8 полупериодов штриховой миры. Поэтому в формуле (1.11) для отношения сигнал/шум δ величина $W_{п.с}$ есть разность между энергией, поступающей на светлый элемент площади $\Sigma_{эл}^{опт}$ (см. формулу (1.17)), и средней энергией W_{ϕ} на такой же площадке в изображении объекта. Заменяя приближенно штриховую миру синусоидальной и учитывая способ, предложенным в [2], ограниченность объекта, имеем:

$$W_{п.с} = W_{\eta_{п.с}} \frac{|A_{об} - A_{\phi}|}{2} T(\mathbf{v}), \quad (4.25)$$

где $\eta_{п.с}$, $T(\mathbf{v})$ и A_{ϕ} определяются соответственно формулами (4.17) и (4.19), (4.15) и (4.24). При расчете $T(\mathbf{v})$ частота эквивалентной восьмиполупериодной миры равна

$$v = 8\pi/d_{x об}. \quad (4.26)$$

Выражение для средней энергии W_{ϕ} в изображении объекта в этом случае имеет вид

$$W_{\phi} = W'_{\phi} d_{x эл}^{опт} d_{y эл}^{опт}, \quad (4.27)$$

где

$$W'_{\phi} = W'_{зас} + W'_{пор} W_{\eta_{п.с}} \frac{|A_{об} - A_{\phi}|}{2} \Psi(d_{x об}, d_{y об}, d_{x эл}^{опт}, d_{y эл}^{опт}), \quad (4.28)$$

$d_{x эл}^{опт}$ и $d_{y эл}^{опт}$ определены формулами (1.17).

5. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

Развитая теория включает в себя как частные случаи известные результаты теории видения и, более того, дает их естественное обобщение. В качестве иллюстрации рассмотрим два классических примера: теорию Кошмидера горизонтальной видимости в атмосфере и глубину видимости диска Секки в морской воде.

Горизонтальная дальность видимости

При наблюдении в условиях солнечного освещения можно считать, что в (1.11) $\alpha C W_{\phi} \gg 1$. Тогда ограничение дальности видения обусловлено исчезновением контраста. Если объект достаточно

мал, а его альbedo $A_{об} = 0$, то, как показано в [4], изложенная методика приводит к известной формуле для дальности горизонтальной видимости объекта (МДВ)

$$S_M = -(\ln \kappa_{п})/\varepsilon. \quad (5.1)$$

При пороговом контрасте зрения $\kappa_{п} = 0,02$ величина $S_M = 3,91/\varepsilon$.

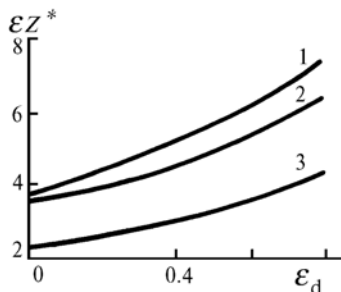


Рис. 4. Дальность видимости черного объекта ($A_{об} = 0$) в зависимости от его размера при значениях порогового контраста $\kappa_{п} = 0,02$ (кривая 1), $0,03$ (2), $0,1$ (3)

Однако возможности данной методики не ограничиваются получением соотношения (5.1). Она позволяет практически оценить используемое в теории Кошмидера условие малости объекта. На рис. 4 представлена зависимость εL^* (L^* — дальность видимости) от оптического размера ε_d квадратного объекта со стороной d и с альbedo $A_{об} = 0$. Она получена для облака с индикатрисой рассеяния Cloud C1 при разных значениях $\kappa_{п}$. При $d \rightarrow 0$ величина $L^* \rightarrow S_M$. Видно, что условие малости объекта практически выполняется при $d/L^* \leq 0,03 \div 0,05$, т.е. при видимом угловом размере объекта менее 2° .

Глубина видимости диска Секки

Вопрос о глубине видимости белого диска (диска Секки), опускаемого с борта судна, занимает в гидрооптике особое место. Это связано с принятой с давних пор в гидрооптической практике оценкой прозрачности морской воды по глубине z_d видимости диска. В ряде исследований отмечалось, что

$$Z_d = \beta/\varepsilon, \quad (5.2)$$

где β не зависит от оптических свойств воды. Однако в действительности величина β заметно различается для разных водных бассейнов, а глубина z_d зависит не только от ε .

С позиций теории обнаружения объекта величина z_d есть предельная дальность обнаружения объекта с заданными размерами и альbedo при солнечном освещении и наблюдении через границу раздела воздух—вода. На рис. 5 представлены зависимости $\beta = \varepsilon z_d$ от λ , а также глубины z_d от ε (для малопараметрической модели морской воды), полученные по описанной в данной статье методике. Расчеты проводились для стандартного диска Секки с $A = 0,8$ диаметром $0,3$ м при пороговом контрасте зрения $\kappa_{п} = 0,03$. Видно, что величина $\beta = \varepsilon z_d$ возрастает при увеличении λ . Данные расчета, выполненного в рамках развитой теории обнаружения, очень хорошо согласуются с результатами [27], в которой вопрос о видимости белого диска рассмотрен наиболее детально и тщательно. Штриховой линией на рис. 5, б показана зависимость $z_d = 5/\varepsilon$. Видно, что при $\beta = 5$ соотношение (5.2) достаточно хорошо описывает z_d в океанских водах, для которых применима малопараметрическая модель (см. раздел 2.1).

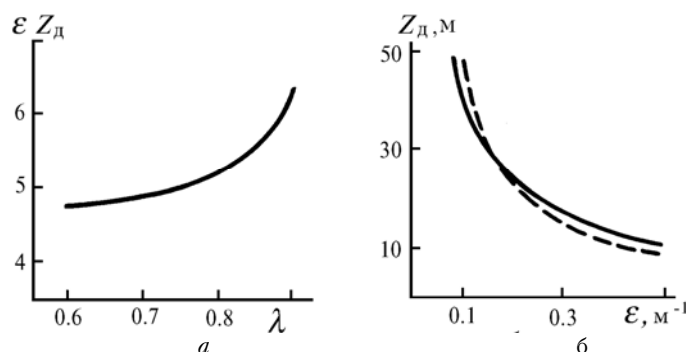


Рис. 5. Видимость диска Секки. Штриховая линия — $z_d = 5/\varepsilon$

Наблюдение объекта с помощью лазерно-телевизионной системы

Приведенные выше примеры относятся к системе пассивного визуального наблюдения. В качестве примера применения изложенной методики для оценки систем активного видения на рис. 6 приведены результаты расчета дальности обнаружения (сплошные линии) и распознавания (штриховые линии) объекта в океанской воде с помощью лазерно-телевизионной системы. Здесь считается, что объект имеет форму квадрата со стороной d , показатель ослабления воды $\epsilon = 0,1 \text{ м}^{-1}$, $\Lambda = 0,6$, энергия импульса $W_0 = 0,1 \text{ Дж}$, альbedo объекта $A_{об} = 0,8$ (кривые 1) и $0,2$ (кривые 2).

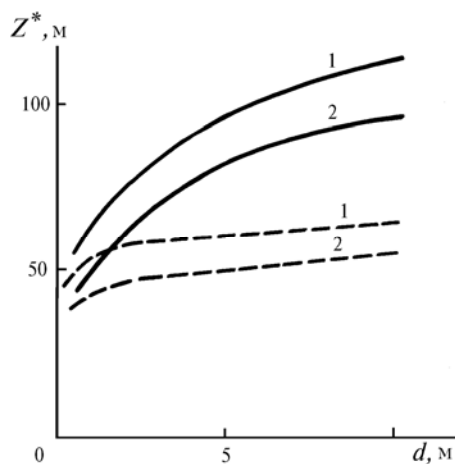


Рис. 6

Наблюдение через взволнованную поверхность моря

В качестве второго примера оценки систем активного видения рассмотрим предельную дальность видения объекта с помощью импульсной лазерно-телевизионной системы через взволнованную поверхность моря. На рис. 7 приведена глубина обнаружения объекта, имеющего форму квадрата со стороной 1 м, в зависимости от скорости ветра (рис. 7, а) и от периода волн зыби при высоте волны $h_3 = 1 \text{ м}$ (рис. 7, б). Видно, что для такого небольшого объекта с ростом скорости ветра до 3 м/с дальность обнаружения быстро убывает до некоторого значения, а затем остается практически постоянной. В некоторых случаях (кривая 2 при $\epsilon = 0,4 \text{ м}^{-1}$) величина $L_{обн}^*$ изменяется скачкообразно. Причина такого поведения заключается в следующем.

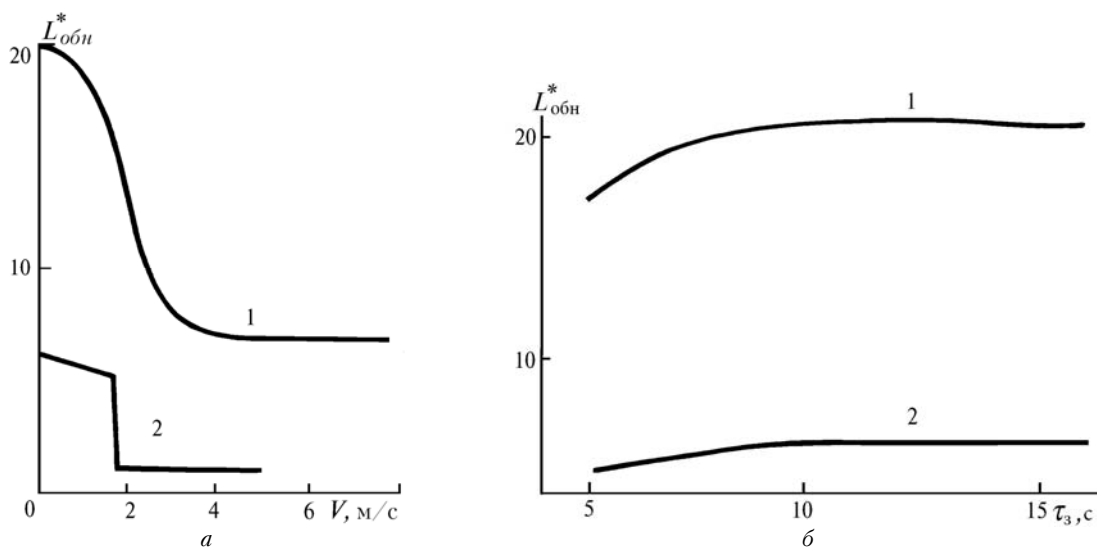


Рис. 7. Глубина обнаружения объекта $1 \times 1 \text{ м}^2$ через взволнованную поверхность моря в зависимости от скорости ветра (а) и от периода волн зыби (б) при $\epsilon = 0,1 \text{ м}^{-1}$ (кривая 1) и $0,4 \text{ м}^{-1}$ (кривая 2)

Для ветрового волнения зависимость величины K_{ϕ} , описывающей вклад шумов, обусловленных волнением, от глубины расположения слоя, создающего ПОР, имеет ярко выраженный максимум вблизи поверхности [18]. Поэтому зависимость отношения сигнал/шум от глубины расположения объекта под поверхностью, возмущенной ветровыми волнами, может оказаться немонотонной, а

именно иметь вид, показанный на рис. 8 (штриховыми линиями показана зависимость отношения сигнал/шум от глубины расположения объекта в случае наблюдения через гладкую границу раздела). Такая зависимость приводит к весьма любопытному последствию. В ситуации, обозначенной кривой 2, условие обнаружимости объекта $\delta > \delta^*$ выполняется в интервале глубин от поверхности до L_2^* и от L_2' до L_2^* . Это означает, что в указанных интервалах объект виден, а в диапазоне глубин от L_2^* до L_2' он не обнаруживается. Следует отметить, что в такой ситуации само понятие предельной глубины видения становится не вполне определенным. Мы будем называть предельной дальностью видения максимальную глубину L_2^* , несмотря на то, что при некоторых глубинах $L < L_2^*$ объект не виден. Ясно, что при переходе от ситуации 1 к ситуации 3 предельная глубина обнаружения может изменяться скачком.

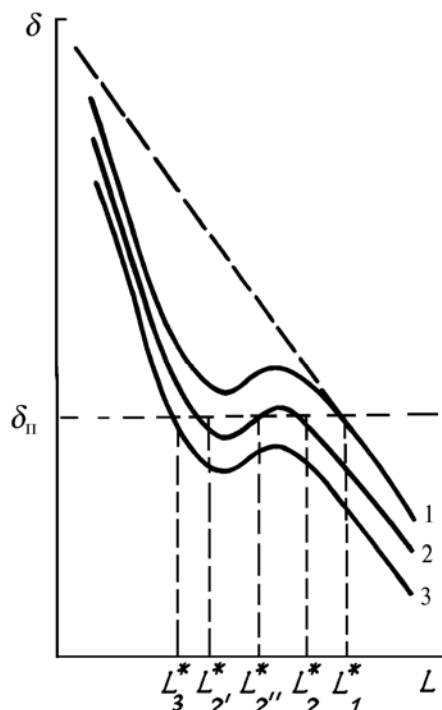


Рис. 8. Зависимость отношения сигнал/шум от глубины подводного объекта при наблюдении через взволнованную поверхность моря

Волны зыби сравнительно слабо влияют на обнаруживаемость подводного объекта. Причина этого заключается в коррелированности шумов, вызываемых этими волнами, в пределах изображения объекта (см. п. 1.2). Лишь в случае короткопериодных волн, масштаб которых сравним с размерами объекта, флуктуационные шумы поверхности уменьшают дальность обнаружения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитая концепция определения дальности видения объектов в рассеивающих средах, основанная на представлениях об оптимальной обработке изображения, и созданные на базе этой концепции программы для персональных компьютеров позволяют рассчитывать предельные дальности обнаружения и распознавания подводных объектов с помощью активных и пассивных телевизионных систем.

Критерий оптимальности обработки изображения по сути близок к известному критерию Неймана-Пирсона. Разделение уровней видения основано на критериях Джонсона. Надежность обнаружения и распознавания задается через вероятности ложной тревоги и обнаружения, которые определяют пороговое значение отношения сигнал/шум. Для описания оптических свойств системы «океан — атмосфера» используются малопараметрические модели.

Созданные программы работают в диалоговом режиме, обладают развитыми сервисными удобствами (минимальные требования к квалификации оператора, диагностика ошибок и др.). Оператор имеет возможность просто и оперативно задавать различную геометрию наблюдения (от случая, когда система наблюдения расположена на летательном аппарате, до варианта подводного наблюдения), варьировать параметры источника и приемника, характеристики устройств подавления помехи обратного рассеяния. Это позволяет моделировать работу практически любого возможного варианта телевизионной системы наблюдения и оценивать ее возможности.

Общность концепции и модульный принцип построения программы позволяют при необходимости существенно расширять ее возможности. Так, например, уже сегодня имеется реальная возмож-

ность учесть поляризационные характеристики сигналов и фонов в лазерно-телевизионных и лазерно-локационных системах и оценить эффективность поляризационной дискриминации фонов при наблюдении в различных условиях.

1. Zege E.P., Ivanov A.P., Katsev I.L. Image Transfer Through a Scattering Medium. Heidelberg, Springer-Verlag. 1991. 395 p.
2. Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С., Лучинин А.С., Левин И.М. // Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. С. 9–113.
3. Jonson J. Analysis of Image Forming Systems // Proceedings of the Image Intensifier Symposium. Fort Belvoir. 1958.
4. Кацев И.Л., Зеге Э.П. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1939. № 7. С. 732–740.
5. Роуз А. Зрение человека и электронное зрение. М.: Мир, 1977. 216 с.
6. Кацев И.Л. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 23. № 1. С. 84–90.
7. Кацев И.Л. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 23. № 1. С. 84–90.
8. Кацев И.Л., Прухач А.С. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1990. Т. 26. № 3. С. 315–318.
9. Леонов Ю.П. Теория статистических решений и психофизика. М.: Наука, 1977. 228 с.
10. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. М.: Машиностроение, 1983. 600 с.
11. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений. М.: Радио и связь. 1986. 184 с.
12. Васильковский А.А., Романов С.С. // Оптико-механическая промышленность. 1987. №9. С. 13–16.
13. Копелевич О.В. Оптические свойства океанской воды. (Докт. дис.). ИО АН СССР, М., 1981. 39 с.
14. Копелевич О.В. // Оптика океана Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. С. 150–163.
15. Дорогин А.П., Копелевич О.В., Левин И.М., Фейгельс В.И. // Тез. докл. X Пленума по оптике океана. Ростов н/Д. 1988. С. 136–137.
16. Phillips D.M., Kirk J.T.O. // Aust. J. Mar. Freshw. Res. 1984. V. 35. № 6. P. 635–644.
17. Давдан И.М., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 256 с.
18. Лучинин А.Г., Сергиевская И.А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1982. Т. 18. № 8. С. 850–853.
19. Лучинин А.Г., Сергиевская И.А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т. 22. № 7. С. 773–776.
20. Пирсон В.Д. // Ветровые волны. М.: ИЛ, 1962. С. 42–124.
21. Mc Clathrey R.A., Bolle H.J., Kondratjew K.Ja. Report of the IAMAP RCWG on a Standard Radiative Atmosphere // Seattle, Washington, USA. 29 August, 1977. Preprint.
22. Lenobie J., Brognier C.A. Comparison Review of Radiation Aerosol Models. // Beitr. Phys. Atmosph. V. 57. № 1. 1984. P. 1–20.
23. Elterman L. Relationships Between Vertical Attenuation and Surface Meteorological Range. // Appl. Optics. 1970. V. 9. № 18. P. 1804–1810.
24. Гуревич С.Б. Физические процессы в передающих телевизионных трубках. М.: Физматгиз, 1958.
25. Zege E.P., Prikhach A.S., Chaikovskaya L.I. Modeling of Visible and UV Radiative Transfer in the Ocean-Atmospheric System. Concepts, Models and Programs // Proceedings of the 5th International Colloquium – Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France. 14–18 January 1991 (ESA SP-319, May 1991) P. 13–18.
26. Левин И.М. // Оптика океана. Т. 2. Прикладная оптика океана. М.: Наука, 1983. С. 187–199.
27. Левин И.М. // Изв. АН СССР Сер. ФАО. 1980. Т. 10. № 9. С. 920–932.

Институт физики АНБ им. Б.И. Степанова,
Минск

Поступила в редакцию
20 апреля 1992 г.

E.P. Zege, I.L. Katsev, A.S. Prikhach. **Range of Vision in Ocean and Atmosphere.**

A new concept has been developed for calculating the range of vision in scattering media, it relies upon the idea of optimum image processing similar to that using the Neiman-Pierson criterion. A mathematical formulation is given of the problem on determination of limiting range of detection and discrimination of underwater objects using TV systems. Johnson criteria are used to subdivide the levels of vision. The reliability of detection and discrimination is given in terms of the false alarm and detection probabilities, which determine the threshold signal-to-noise ratio.

The PC programs written for this system allow the estimation of the feasibilities of passive and active TV systems for ocean and atmosphere, including the systems for observing underwater objects through the water air interface in the interactive mode to be done. They also provide for assessing image quality characteristics and limiting range of detection and discrimination of objects depending on the parameters of the vision systems and optical characteristics of water and atmosphere.