

Оценка эффективности подводных систем наблюдения

В.Я. Колочкин¹, Н.М. Костылёв¹, Ю.С. Гулина^{1,2}

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5;

² Физический институт им П.Н. Лебедева РАН, 119991, Россия, г. Москва, пр. Ленинский, д. 53

Аннотация

В статье изложена методика оценки эффективности систем наблюдения, предназначенных для подводных робототехнических комплексов с телеметрическим принципом управления. В методике, основанной на системном подходе, используются математические модели водной среды, в которой распространяется оптический сигнал, системы регистрации изображений подводных объектов, а также математическая модель зрительной системы человека, выполняющей функции оператора при наблюдении изображений. В качестве показателя эффективности системы наблюдения при таком подходе используются вероятности обнаружения и распознавания изображений подводных объектов при заданной дальности регистрации. Разработанная авторами математическая модель водной среды позволяет количественно оценить влияние помехи обратного рассеяния, возникающей при подсветке подводных объектов, на эффективность системы наблюдения. Приведённые в статье результаты численных экспериментов иллюстрируют возможность использования предложенной методики при оптимизации параметров системы регистрации изображений подводных объектов для достижения требуемых значений вероятностей обнаружения или распознавания на заданных дальностях.

Ключевые слова: подводные системы наблюдения, помеха обратного рассеяния, математическая модель, гидрооптические характеристики, зрительная система человека, вероятность обнаружения/распознавания.

Цитирование: Колочкин, В.Я. Оценка эффективности подводных систем наблюдения / В.Я. Колочкин, Н.М. Костылёв, Ю.С. Гулина // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 5. – С. 761-769. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1262.

Citation: Kolyuchkin VY, Kostylev MA, Gulina YS. Performance evaluation of underwater vision systems. Computer Optics 2023; 47(5): 761-769. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1262.

Введение

В настоящее время подводные робототехнические комплексы (РТК) с телеметрическим принципом управления используются для решения широкого круга задач [1]. Они могут использоваться при прокладке и мониторинге состояния подводных кабелей [2] или трубопроводов [3], а также для поиска полезных ископаемых на дне океана [4]. Независимо от решаемой задачи в состав подводных робототехнических комплексов с телеметрическим принципом управления должна входить система технического зрения (СТЗ). Она позволяет оператору получать изображения объектов и фрагментов донной поверхности, необходимые для управления РТК. Для обеспечения надёжного функционирования СТЗ, особенно на больших глубинах, где естественная облучённость ничтожно мала, в состав СТЗ входят устройства подсветки с лазерными или светодиодными источниками, излучающими в сине-зеленом диапазоне длин волн [5]. Возможность различения изображений объектов оператором существенно ограничивается эффектами поглощения и рассеяния оптического излучения в водной среде. Эти эффекты приводят к ослаблению излучения, отражённого от объектов, и увеличению яркости фона из-за возникновения так называемой помехи обратного рассеяния. В результа-

те снижается контраст регистрируемых изображений объектов. В настоящее время опубликованы результаты измерений показателя обратного рассеяния в различных областях мирового океана [6, 7], но отсутствует методика, позволяющая количественно оценить влияние этой помехи на обнаружение изображений объектов оператором.

Так как значительная доля информации об окружающем пространстве, используемой для управления подводным РТК, получается с помощью СТЗ, то актуальной задачей является повышение эффективности этих оптико-электронных приборов (ОЭП). В соответствии с существующей классификацией [8] СТЗ, предназначенные для наблюдения подводных объектов, относятся к информационным приборам, эффективность которых оценивается вероятностями обнаружения и распознавания объектов человеком, выполняющим функции оператора. Для достижения требуемых значений указанных вероятностных показателей при проектировании СТЗ предлагается использовать методику, которая основана на системном подходе. Методика должна учитывать особенности распространения оптического излучения в водной среде, характеристики и параметры системы регистрации изображений активного типа, а также свойства зрительной системы человека, выполняющей функции оператора при наблюдении изображений.

Существенные особенности каждой из перечисленных частей такой сложной системы наблюдения должны быть отражены в соответствующих математических моделях и связаны с показателями функциональной эффективности СТЗ. Полученные на основе методов математического моделирования зависимости между показателями эффективности и конструктивными параметрами СТЗ при заданных параметрах водной среды представляют собой целевую функцию, которая используется при выполнении проектных процедур анализа и параметрической оптимизации прибора.

Целью исследований, изложенных в настоящей статье, является разработка методики оценки эффективности СТЗ телевизионного типа, предназначенной для подводных РТК. Как отмечено выше, для достижения поставленной цели требуется принять модельное математическое описание рассеивающей водной среды, в которой распространяется оптический сигнал, модельное описание телевизионной системы, осуществляющей регистрацию подводных объектов, а также зрительной системы человека, выполняющей функции оператора при наблюдении регистрируемых изображений.

1. Математическая модель источника оптического сигнала

Принято, что подводные объекты наблюдаются на пространственно равномерном диффузном фоне, имеющем коэффициент отражения ρ_b . Объекты имеют конечные габаритные размеры $A_o = l_x \times l_y$, а их поверхность также является диффузной с пространственным коэффициентом отражения $\rho_o(x, y)$, $x, y \in A_o$. Распределение облучённости, создаваемое в пространстве предметов квазимонохроматическими источниками излучения, равномерно и оценивается значением E_0 . При таких допущениях распределение яркости в пространстве предметов описывается выражением

$$L(x, y) = L_b [1 + C_M \cdot L_n(x, y)], \quad (1)$$

где:

$L_b = E_0 \rho_b / \pi$ – яркость фона, $C_M = \Delta L_M / L_b$ – максимальное значение относительного приращения яркости поверхности объекта;

$\Delta L_M = \max \{ [\rho_o(x, y) - \rho_b] E_0 / \pi \}$ – максимальное значение приращения яркости поверхности объекта относительно фона;

$L_n(x, y) = [\rho_o(x, y) - \rho_b] E_0 / \pi \Delta L_M$ – нормированное распределение яркости поверхности объекта.

Как отмечено выше, при подсветке подводных объектов возникает помеха обратного рассеяния, которая оказывает существенное влияние на распределение фоновой облучённости в плоскости регистрации изображения ТВ-камеры. Ниже приведено описание математической модели водной среды, позволяющей количественно описать эту помеху.

2. Математическая модель рассеивающей водной среды

Известны работы, в которых представлены результаты математического моделирования подводных систем наблюдения. В том числе в [9, 10] изложена методика синтеза изображений, регистрируемых в системах наблюдения, с учетом свойств рассеивающей водной среды. В настоящей статье предложена альтернативная математическая модель, преимуществом которой являются минимальные требования к априорным данным о состоянии воды в акватории.

Для описания прохождения оптического излучения через рассеивающую водную среду необходимо и достаточно использовать первичные гидрооптические характеристики, к которым относятся [11]: показатель поглощения k_a , показатель рассеяния σ , а также индикатриса $\chi(\gamma)$ рассеяния водной среды.

Рассмотрим элементарный объем рассеивающей водной среды, через который от осветителя проходит поток излучения Φ_0 , сформированный в виде пучка лучей заданной расходимости (рис. 1). Для интегральной оценки потока Φ_b излучения, рассеянного в обратную полусферу, используют показатель обратного рассеяния σ_b , который характеризует потери излучения, проходящего через среду. Тогда

$$\Phi_b = \Phi_0 [1 - \exp(-\sigma_b dz)]. \quad (2)$$

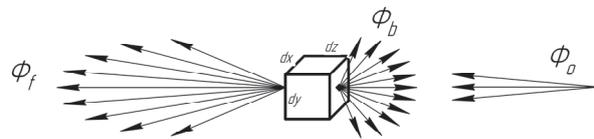


Рис. 1. Прохождение излучения через элементарный объем рассеивающей водной среды

Доля излучения, рассеянного в обратную полусферу, оценивается показателем $\varphi_0 = \sigma_b / \sigma$.

Для оценки доли излучения, прошедшего через слой среды, используют понятие эффективного показателя поглощения $k_1 = k_a + 2\sigma_b$ [12]. Поток излучения, прошедший через рассеивающую среду толщиной z , равен

$$\Phi_f(z) = \Phi_0 \exp(-k_1 z). \quad (3)$$

В водной среде рассеяние излучения происходит преимущественно на крупных частицах взвеси и планктона. Такое рассеяние описывается теорией Ми [13], а так называемая индикатриса рассеяния Ми в направлении распространения излучения определяется уравнением

$$\chi(\gamma) = \frac{2}{\mu^2} \exp\left(-\frac{\gamma}{\mu}\right). \quad (4)$$

Параметр μ характеризует вытянутость индикатрисы рассеяния, причём чем меньше значение μ , тем больше вытянутость индикатрисы рассеяния в направлении

распространения излучения. В направлении обратного рассеяния индикатриса практически не зависит от угла γ рассеяния и описывается выражением [14]

$$\chi_{\pi}(\gamma) = 0,33\sigma^{-0,31} = \chi_{\pi}. \tag{5}$$

Таким образом, для количественной оценки влияния рассеивающей водной среды на распространение оптического излучения необходимо знать значения таких показателей акватории, как k_a , σ , σ_b и μ . В настоящее время полноценных измерений гидрооптических характеристик для широкого круга акваторий не проводится в связи со сложностью их измерения. Однако имеется достаточное количество данных о прозрачности воды, измеряемой по диску Секки для акваторий по всему миру. В связи с этим целесообразно использовать методику расчета гидрооптических характеристик, предложенную в [15]. Например, для акваторий типа *Case 2* по классификации Мореля можно определить перечисленные гидрооптические характеристики, зная только глубину Z_D видимости диска Секки, по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 3,0213 \cdot Z_D^{-0,897} - \text{показатель ослабления;} \\ \sigma &= 0,944 \cdot \varepsilon - 0,048; \\ k_a &= \varepsilon - \sigma; \\ \sigma_b &= 0,018 \cdot \varepsilon; \\ \mu &= \sqrt{0,021 + 0,7656\varphi_0/6}. \end{aligned}$$

Чтобы вывести математические соотношения для расчёта фоновой облучённости, обусловленной рассеянием в обратном направлении, рассмотрим схему на рис. 2. На рисунке представлена схема регистрации изображений пространства предметов, в состав которой входит телевизионная (ТВ) камера и осветитель, взаимное положение которых характеризуется линейным параллаксом B . Визирные оси ТВ-камеры и осветителя пересекаются в плоскости объекта, находящейся на дистанции z_d . Области пространства, ограниченные в пределах угловых полей ТВ-камеры и осветителя, пересекаются, начиная с дистанции z_0 . Каждая точка данной области вследствие эффекта рассеяния является источником вторичного излучения, которое создает дополнительную фоновую облучённость в плоскости регистрации изображения ТВ-камерой и называется помехой обратного рассеяния.

Для количественной оценки этой дополнительной фоновой облучённости рассмотрим обратное рассеяние в тонком слое воды толщиной Δz , расположенном от СТЗ на расстоянии $z_0 + z_i$. Явление многократного рассеяния в рассеивающих средах описывается уравнением переноса излучения, которое к настоящему времени в общем виде не решено [16]. Поэтому примем допущение о том, что эффекты вторичного рассеяния в обратную полусферу не приводят к существенной погрешности оценки контраста изображения, регистрируемого ТВ-камерой.

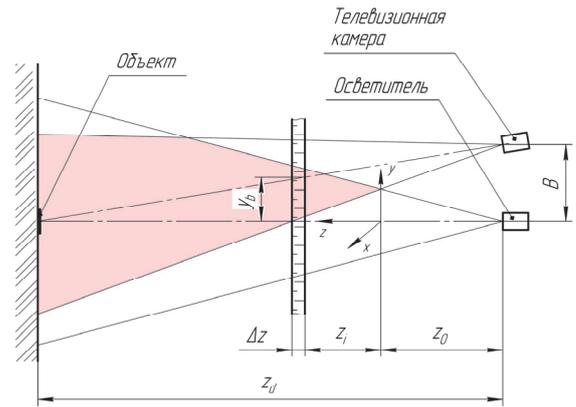


Рис. 2. Схема регистрации изображения объекта

Поток излучения, попадающий от осветителя на рассматриваемый слой водной среды, равен

$$\Phi_f(z_i) = \Phi_0 \tau(z_i), \tag{6}$$

где $\tau(z_i) = \exp[-k_1(z_0 + z_i)]$.

В соответствии с формулой (2) элементарный поток излучения, рассеянный тонким слоем воды толщиной Δz , можно рассчитать по формуле

$$\Delta\Phi_{bs}(z_i) = \Phi_f(z_i) [1 - \exp(-\sigma_b \Delta z)]. \tag{7}$$

Если допустить, что осветитель создаёт равномерное распределение облучённости в пределах углового поля $2W_0$ подсветки, то распределение яркости излучения, рассеянного в обратном направлении тонким слоем воды, находящимся в плоскости на расстоянии $z_0 + z_i$, можно рассчитать по формуле

$$\Delta L_{bs}(x, y; z_i) = \frac{\chi_{\pi} \Delta\Phi_{bs}(z_i)}{A_i} \text{circ} \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{(z_0 + z_i) \text{tg} W_0} \right), \tag{8}$$

где $A_i = \pi [(z_0 + z_i) \text{tg} W_0]^2$ – площадь сечения области подсветки на расстоянии $z_0 + z_i$; $\text{circ}(r)$ – круговая функция [17].

Так как в пределах круговой области подсветки яркость каждого рассеивающего слоя постоянна, то при оценке значения фоновой облучённости можно пренебречь возможной расфокусировкой изображения фона, которое формирует объектив ТВ-камеры. Тогда распределение фоновой облучённости в задней фокальной плоскости объектива ТВ-камеры от выделенного тонкого слоя воды, находящегося на расстоянии $z_0 + z_i$, определяется формулой

$$\begin{aligned} \Delta E_{bs}(x', y'; z_i) &= \tau(z_i) \tau_o \times \\ &\times \iint_{\Omega_i} \Delta L_{bs} \left(\frac{x'}{\beta_i}, \frac{y'}{\beta_i} - y_{bi}; z_i \right) \cos \gamma_i d\Omega_i, \end{aligned} \tag{9}$$

где:

Ω_i – телесный угол с центром в точке (x, y) плоскости z_i , опирающийся на входной зрачок объектива ТВ-камеры;

$y_{bi} = (z_d - z_0 - z_i)B/z_d$ – расстояние между визирными осями осветителя и ТВ-камеры в плоскости слоя рассеивающей среды, находящейся на расстоянии $z_0 + z_i$ (см. рис. 2);

$\beta = (z_0 + z_i)/f_o'$ – линейное увеличение объектива ТВ-камеры для плоскости, находящейся на расстоянии $z_0 + z_i$;

τ_o и f_o' – коэффициент пропускания и фокусное расстояние объектива ТВ-камеры соответственно.

Фоновую засветку создаёт весь слой рассеивающей водной среды в пределах от z_0 до z_d . Чтобы рассчитать результирующую фоновую облучённость $E_{bs}(x', y')$ от помехи обратного рассеяния в плоскости изображения объектива ТВ-камеры, нужно просуммировать облучённости от всех элементарных слоев с координатами в диапазоне дальностей от 0 до $(z_d - z_0)$. Поэтому результирующая фоновая облучённость от помехи обратного рассеяния рассчитывается по формуле

$$E_{bs}(x', y') = \sum_{i=0}^N \Delta E_{bs}(x', y'; z_i), \quad (10)$$

где $N = (z_d - z_0)/\Delta z$ – количество слоёв.

Используя формулу (1), распределение облучённости в плоскости изображения объектива ТВ-камеры при условии равномерной подсветки пространства предметов можно представить выражением

$$E(x', y') = E_{bs}(x', y') + \tau_d k_o L_b \left[1 + C_M L_n \left(\frac{x'}{\beta_o}, \frac{y'}{\beta_o} \right) \otimes H_{OS}(x', y') \right], \quad (11)$$

где:

$$k_o = \pi (D_o/2f_o')^2;$$

D_o – диаметр выходного зрачка объектива;

$H_{OS}(x', y')$ – функция рассеяния точки, характеризующая линейные искажения объектива ТВ-камеры;

$\tau_d = \exp(-k_1 z_d)$ – коэффициент пропускания водной среды от плоскости предметов до входного зрачка объектива.

Чтобы определить вид помехи обратного рассеяния, на основе изложенной выше математической модели водной среды выполнен расчёт распределения облучённости в плоскости изображения объектива ТВ-камеры. В расчётах использованы следующие исходные данные:

- объект квадратной формы с размерами $A_o = l_x \times l_y = 0,5 \times 0,5$ [м²];
- коэффициенты отражения объекта и фона соответственно равны $\rho_o = 1$ и $\rho_b = 0$, т.е. контраст объекта в пространстве предметов равен 1;
- угловое поле подсветки и регистрации изображения $2W_0 = 30^\circ$;
- линейный параллакс $B = 1$ м;
- относительное отверстие объектива ТВ-камеры $D_o/f_o' = 1/2$;

– фокусное расстояние объектива ТВ-камеры $f_o' = 25$ мм;

– поток излучения от осветителя $\Phi_0 = 1$ Вт.

На рис. 3 представлено изображение пространства предметов, рассчитанное для дальности 12 м от СТЗ при прозрачности воды в акватории, соответствующей глубине видимости диска Секки $Z_D = 10$ м. Из рис. 3 следует, что распределение облучённости, обусловленной помехой обратного рассеяния, имеет ярко выраженную неравномерность в сагиттальном сечении объектива ТВ-камеры.

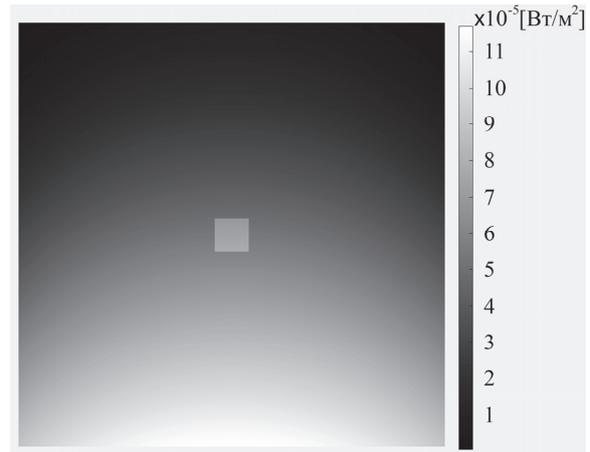


Рис. 3. Распределение облучённости в плоскости изображения объектива ТВ-камеры с учётом помехи обратного рассеяния

Контраст в изображении объекта зависит от положения объекта в угловом поле ТВ-камеры. При этом контраст уменьшается при смещении зоны анализа в направлении светильника. Поэтому при наблюдении с помощью СТЗ рабочей зоны, например, манипулятора [18] визирную ось ТВ-камеры целесообразно смещать к краю углового поля в направлении от светильника.

3. Математическая модель телевизионной системы

В состав телевизионной системы (ТВ-системы) входят ТВ-камера и дисплей, на экране которого формируются изображения пространства предметов. На основе принятых выше допущений распределение яркости в пространстве предметов описывается выражением (1). Если учесть эффекты ослабления и рассеяния оптического излучения в водной среде, то для окрестности изображения объекта распределение облучённости в плоскости приёмника излучения ТВ-камеры можно представить следующей зависимостью от угловых координат φ_x и φ_y .

$$E_1(\varphi_x, \varphi_y) = E_{b\Sigma} \times \left[1 + C_{M1} \cdot L_n(\varphi_x, \varphi_y) \otimes H_{OS}(\varphi_x, \varphi_y) \right], \quad (12)$$

где $E_{b\Sigma} = \tau_d k_o L_b + \bar{E}_{bs}(\varphi_{x0}, \varphi_{y0})$ – результирующая фоновая облучённость, равная сумме облучённости

$E_b = \tau_d k_0 L_b$ от фона в пространстве предметов, и среднего значения $\bar{E}_{bs}(\varphi_{x0}, \varphi_{y0})$ облучённости от помехи обратного рассеяния в окрестности изображения объекта, положение которого задано координатами φ_{x0} и φ_{y0} ;
 $C_{M1} = C_M(E_b/E_{b\Sigma})$ – максимальное относительное значение приращения облучённости в изображении объекта с учётом помехи обратного рассеяния.

Матричный приёмник излучения (МПИ) ТВ-камеры преобразует распределение облучённости в электрический сигнал в виде распределения числа фотоэлектронов, накопленных в пикселях, который преобразуется в распределение яркости на экране дисплея. Так как уровни оптических сигналов при наблюдении подводных объектов невелики, то ТВ-систему будем рассматривать как линейную пространственно инвариантную систему. Линейные искажения, которые вносит ТВ-система, характеризуются импульсным откликом или пространственной передаточной функцией (ППФ), равной произведению ППФ объектива ТВ-камеры, МПИ и дисплея:

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{ТВ}(\nu_{\varphi x}, \nu_{\varphi y}) &= \\ &= \tilde{H}_{ОС}(\nu_{\varphi x}, \nu_{\varphi y}) \tilde{H}_{МПИ}(\nu_{\varphi x}, \nu_{\varphi y}) \tilde{H}_{Д}(\nu_{\varphi x}, \nu_{\varphi y}). \end{aligned} \quad (13)$$

Если пренебречь эффектами пространственной и временной дискретизации, то с учётом формулы (12) распределение яркости, формируемое на экране дисплея, можно представить выражением

$$\begin{aligned} L_{Д}(\varphi'_x, \varphi'_y) &= k_{ТВ} E_{b\Sigma} \times \\ &\times [1 + C_{M1} \cdot L_n(\varphi'_x, \varphi'_y) \otimes H_{ТВ}(\varphi'_x, \varphi'_y)], \end{aligned} \quad (14)$$

где:

φ'_x и φ'_y – угловые размеры изображений, наблюдаемых человеком на экране дисплея;

$k_{ТВ}$ – коэффициент, учитывающий энергетические преобразования оптического сигнала в тракте ТВ-системы.

Примем допущение о том, что источником помех в изображении, предъявляемом человеку на экране дисплея, является только МПИ. Помехи, которые вносят МПИ, используемые в современных ТВ-камерах, обусловлены фотонным шумом и темновым шумом. Результирующая дисперсия помех МПИ, выраженная числом фотоэлектронов, определяется формулой

$$\sigma_{МПИ}^2 = \sigma_{\Phi}^2 + \sigma_{\tau}^2, \quad (15)$$

где σ_{Φ}^2 и σ_{τ}^2 – дисперсия фотонного и темнового шума соответственно.

Темновой шум следует учитывать при низких уровнях облучённости чувствительных элементов МПИ, а дисперсия фотонного шума пропорциональна среднему числу фотоэлектронов \bar{n}_{Φ} , накопленных в каждом пикселе за время t_s . При относительно малых контрастах изображения объекта можно считать, что дисперсия фотонного шума зависит от среднего

уровня облучённости от фона и для случая квазимонохроматического излучения определяется формулой

$$\sigma_{\Phi}^2 = \bar{n}_{\Phi} = \frac{A_{п} t_s}{hc} E_{el}^b(\lambda) \Delta\lambda \eta(\lambda) \lambda, \quad (16)$$

где:

$E_{el}^b(\lambda) \Delta\lambda$ – значение спектральной плотности энергетической облучённости от фона в узком спектральном интервале $\Delta\lambda$;

$\eta(\lambda)$ – спектральная квантовая эффективность детектора;

$A_{п}$ – площадь пикселя;

h – постоянная Планка;

c – скорость света.

Дисперсию шума в изображении на экране дисплея можно рассчитать, как

$$\sigma_{Д}^2 = k_{ТВ}^2 \sigma_{МПИ}^2. \quad (17)$$

4. Математическая модель зрительной системы человека-оператора

Основными показателями эффективности СТЗ, входящей в состав РТК с телеметрическим принципом управления, являются вероятностные показатели обнаружения и распознавания изображений объектов человеком-оператором. В [19–22] приведено описание математических моделей, которые отражают особенности преобразования оптических сигналов в зрительной системе человека и позволяют рассчитать значения вероятностей обнаружения и распознавания образов объектов, формируемых ОЭП. В этих моделях процесс обработки зрительных образов разбит на два этапа. На этапе первичной обработки, которая осуществляется в глазах человека, моделируется преобразование сигналов оптической системой глаза, образованной роговицей и хрусталиком, а также преобразование зрительных образов, осуществляемое в слоях сетчатки вплоть до зрительного нерва. Кроме этого, учитывается влияние внешних и внутренних помех в виде фотонного и нейронного шума, действующих в зрительной системе. На этапе вторичной обработки зрительных образов, осуществляемой в стриарной коре головного мозга, осуществляется выделение и анализ признаков, содержащихся в наблюдаемых изображениях, осуществляемый с целью принятия решений об обнаружении и распознавании образов объектов. Для описания этого этапа используются два подхода, один из которых основан на многоканальной модели, а второй – на одноканальной модели. В многоканальной модели в качестве признаков используются комплексные коэффициенты разложения изображений объектов в базисе финитных гармонических функций, а принятие решений производится на основе байесовского критерия. В одноканальной модели для описания принятия решений также используется байесовский критерий, но признаками являются примитивы в виде линий, границ

перепадов яркости и др. На основе экспериментальных исследований [21, 22] установлено, что многоканальная модель адекватно описывает обнаружение и распознавание полутонных изображений объектов, а для оценки обнаружения изображений бинарных объектов более адекватной является одноканальная модель.

В настоящей публикации для иллюстрации предлагаемой методики оценки эффективности подводных систем наблюдения использована одноканальная модель зрительной системы, так как при проведении численных экспериментов использовались бинарные тест-объекты, наблюдаемые на практически равномерном фоне. В соответствии с одноканальной моделью зрительной системы условные вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги рассчитываются по формулам

$$P_D = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\xi_t}^{\infty} \exp\left[-\frac{(\xi - \mu)^2}{2}\right] d\xi, \quad (18)$$

$$P_{FA} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\xi_t}^{\infty} \exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right) d\xi, \quad (19)$$

где:

$\xi_t = (\ln \Lambda_t / \mu) + (\mu / 2)$ – пороговое значение принятия решения;

$\Lambda_t = 100$ – пороговое значение отношения правдоподобия, определённое экспериментально [20];

μ – отношение сигнала к шуму (ОСШ) с учётом пространственной и временной фильтрации оптических сигналов в зрительной системе.

Если пренебречь действующими в зрительной системе фотонным и нейронным шумом [21, 22], то выражение для ОСШ можно представить в виде

$$\mu = \mu_p \sqrt{\frac{A_{\phi o} 2\tau_v v_k}{A_{\phi n}}} \times \left(\int \int \frac{|\tilde{L}'_n(v_{\phi x}, v_{\phi y})|^2 |\tilde{H}_{lat}(v_{\phi x}, v_{\phi y})|^2}{|\tilde{H}_D(v_{\phi x}, v_{\phi y})|^2 |\tilde{H}_{lat}(v_{\phi x}, v_{\phi y})|^2} dv_{\phi x} dv_{\phi y} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (20)$$

где:

μ_p – пиковое ОСШ в изображении, наблюдаемом на экране дисплея;

$A_{\phi o}$ – площадь изображения объекта в угловой мере;

$A_{\phi n}$ – площадь одного пикселя на экране дисплея в угловой мере;

$\tau_v = 0,1$ с – постоянная времени, которой оценивают инерционность зрительного восприятия;

$\tilde{L}'_n(v_{\phi x}, v_{\phi y}) = \tilde{L}_n(v_{\phi x}, v_{\phi y}) \tilde{H}_{TV}(v_{\phi x}, v_{\phi y})$ – пространственно-частотный спектр нормированного распределения яркости в наблюдаемом изображении объекта;

$v_{\phi x}$ и $v_{\phi y}$ – угловые пространственные частоты, имеющие размерность градус⁻¹;

$\tilde{H}_{lat}(v_{\phi x}, v_{\phi y})$ – ППФ звена, описывающего эффект латерального торможения в слоях сетчатки;

$\tilde{H}_{Lat}(v_{\phi x}, v_{\phi y})$ – ППФ звена, описывающего эффект латерального торможения с учётом временных флуктуаций помех в наблюдаемых изображениях.

Если положить, что помеха в изображении, наблюдаемом оператором, определяется только фотонным шумом МПИ, то значение пикового ОСШ можно рассчитать по формуле

$$\mu_p = C_{M1} \sqrt{\bar{n}_{b\Sigma}}, \quad (21)$$

где

$$\bar{n}_{b\Sigma} = \frac{A_p t_s}{hc} E_{b\Sigma} \eta(\lambda) \lambda -$$

среднее число фотоэлектронов, накопленных от фона в окрестности регистрируемого изображения объекта.

5. Результаты численных экспериментов

Целью численных экспериментов являлась апробация математических моделей, положенных в основу предлагаемой методики оценки эффективности СТЗ телевизионного типа для подводных РТК. На первом этапе экспериментов исследовалось влияние конструктивных параметров СТЗ, таких как линейный параллакс между визирными осями ТВ-камеры и осветителя, а также угловое поле СТЗ, на контраст регистрируемого изображения объекта при наличии помехи обратного рассеяния. При этом использовались те же исходные данные, что при расчёте распределения облучённости от помехи обратного рассеяния, результаты которого представлены на рис. 3, а контраст в окрестности изображения объекта рассчитывается по формуле

$$C(x_0', y_0') = \frac{\bar{E}_{bs}(x_0', y_0') - \Delta E_o}{\bar{E}_{bs}(x_0', y_0') + \Delta E_o}, \quad (22)$$

где

$$\bar{E}_{bs}(x_0', y_0') = \frac{1}{A_o'} \int_{A_o'(x_0', y_0')} E_{bs}(x', y') dx' dy' -$$

среднее значение распределения облучённости от помехи обратного рассеяния в окрестности изображения объекта, центр которого имеет координаты (x_0', y_0') ;

$\Delta E_o = \tau_d k_0 E_0 / \pi$ – приращение облучённости, обусловленное излучением, отражённым от диффузной поверхности объекта, имеющей коэффициент отражения $\rho_o = 1$.

На рис. 4 представлены графики зависимости контраста в изображении объекта от величины линейного параллакса при дальности, равной 8 м, полученные с использованием разработанной модели (график 1), а также в работе [9] (график 2). Графики рассчитаны для прозрачности воды, со-

ответствующей $\varepsilon = 0,25 \text{ м}^{-1}$, используемой в [9], при положении объекта в центре углового поля.

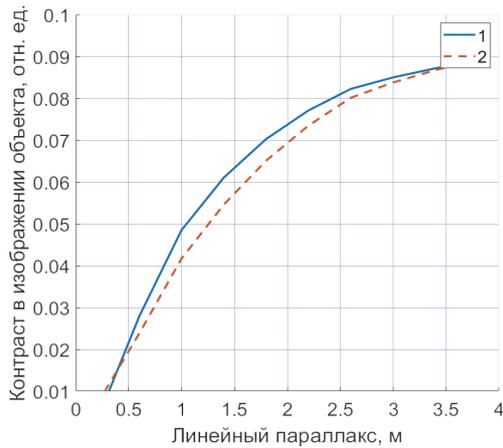


Рис. 4. Графики зависимости контраста в изображении объекта от величины линейного параллакса

Из графиков, отличие которых не превышает 10%, следует, что с увеличением линейного параллакса контраст в регистрируемом изображении объекта возрастает, что обусловлено снижением уровня помехи обратного рассеяния.

Также контраст в изображении увеличивается при уменьшении углового поля СТЗ. Это иллюстрируется на рис. 5, где представлены полученные авторами графики зависимости контраста в изображении объекта от углового поля СТЗ, которые рассчитаны при линейном параллаксе 1 м и дальности 10 м для различных значений прозрачности акватории, оцениваемой показателем Z_D .

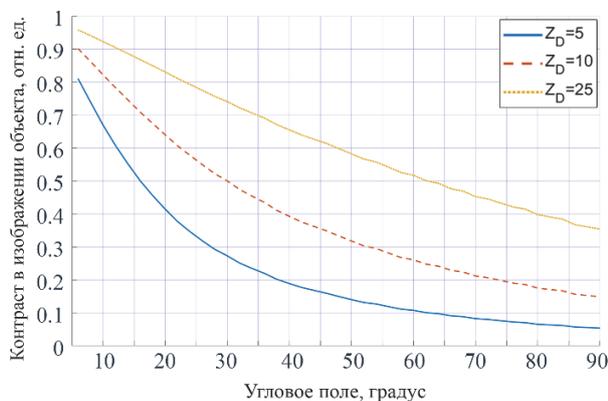


Рис. 5. Графики зависимости контраста в изображении объекта от углового поля при линейном параллаксе 1 м и дальности 10 м

Таким образом за счёт увеличения линейного параллакса или уменьшения углового поля регистрации изображений можно снизить влияние помехи обратного рассеяния в несколько раз.

На рис. 6 представлены графики зависимости контраста от дальности, рассчитанные при положении изображения объекта в центре углового поля для различных значений $Z_D = 5 \text{ м}$; 10 м ; 25 м , при линейном параллаксе 1 м и угловом поле 30° . Из графиков

следует, что даже в достаточно прозрачной воде, когда $Z_D = 25 \text{ м}$, на расстояниях, превышающих 24 м, контраст изображения снижается в 10 раз вследствие помехи обратного рассеяния.

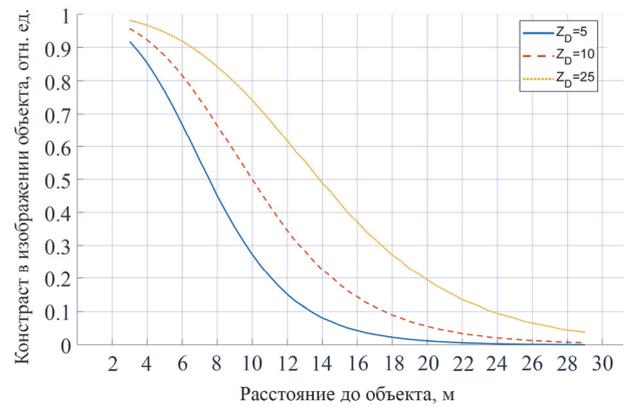


Рис. 6. Зависимость контраста в изображении от дальности до объекта

Апробация математических моделей ТВ-системы и зрительной системы человека-оператора производилась при следующих исходных данных:

- объект квадратной формы с размерами $A_o = l_x \times l_y = 0,03 \times 0,03 \text{ [м}^2\text{]}$;
- коэффициенты отражения объекта и фона соответственно равны $\rho_o = 0,5$ и $\rho_b = 0,4$;
- угловое поле подсветки и регистрации изображения $2W_0 = 30^\circ$;
- линейный параллакс $B = 1 \text{ м}$;
- относительное отверстие объектива ТВ-камеры $D_o/f_o' = 1/2$;
- фокусное расстояние объектива ТВ-камеры $f_o' = 25 \text{ мм}$;
- размеры пикселя МПИ $a_x \times a_y = 3,5 \times 3,5 \text{ мкм}^2$;
- размеры пикселя на экране дисплея $b_x \times b_y = 0,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$;
- дистанция наблюдения изображения на экране дисплея $L_D = 0,6 \text{ м}$;
- поток излучения от осветителя $\Phi_0 = 1 \text{ Вт}$.

Так как в этих условиях размер изображения при максимальной дальности составлял примерно 10 пикселей, то линейные искажения ТВ-системы считались пренебрежимо малыми.

На рис. 7 представлены графики зависимости вероятности обнаружения изображения объекта от дальности, рассчитанные при различных уровнях прозрачности акватории.

Полученные расчётные зависимости иллюстрируют возможность использования предложенных математических моделей для оценки предельных дальностей обнаружения изображений подводных объектов человеком-оператором.

Заключение

На основе системного подхода разработана методика оценки эффективности систем наблюдения,

предназначенных для подводных РТК с телеметрическим принципом управления. Особенностью предлагаемой методики является то, что она основана на системном подходе к описанию исследуемого объекта и включает: математическую модель водной среды, описывающей особенности распространения оптического излучения; математическую модель системы регистрации телевизионного типа, отражающую её свойства в линейном приближении; математическую модель зрительной системы человека, выполняющую функции оператора при наблюдении изображений подводных объектов. В качестве показателей эффективности СТЗ для подводных РТК предложено использовать вероятности обнаружения и распознавания человеком изображений объектов.

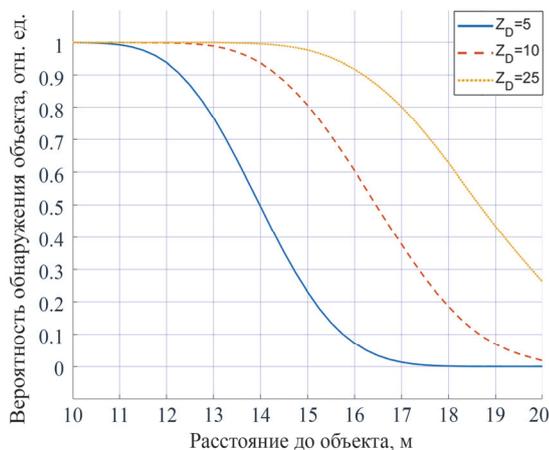


Рис. 7. Зависимость вероятности обнаружения изображения объекта от дальности

Предложенная в статье оригинальная модель водной среды позволяет количественно оценить помеху обратного рассеяния, возникающую при подсветке подводных объектов. Её достоинством является относительная простота и минимальный объём априорных данных об уровне замутнённости акватории в виде значения глубины видимости диска Секки. Достаточно хорошее соответствие результатов расчётов, выполненных на основе этой модели, и результатов, полученных другими авторами, подтверждает её достоверность. Для количественной оценки погрешности предложенной модели авторы планируют проведение натуральных экспериментальных исследований.

References

[1] Petillot YR, Antonelli G, Casalino G, Ferreira F. Underwater robots: From remotely operated vehicles to intervention-autonomous underwater vehicles. *IEEE Robot Autom Mag* 2019; 26(2): 94-101. DOI: 10.1109/MRA.2019.2908063.

[2] Ortiz A, Simó M, Oliver G. A vision system for an underwater cable tracker. *Mach Vis Appl* 2002; 13: 129-140. DOI: 10.1007/s001380100065.

[3] Zhang H, Zhang S, Wang Ya, Liu Yu, Yang Ya, Zhou T, Bian H. Subsea pipeline leak inspection by autonomous underwater vehicle. *Appl Ocean Res* 2021; 107: 102321. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102321.

[4] Dumke I, Nornes SM, Purser A, Marcon Y, Ludvigsen M, Ellefmo SL, Johnsen G, Sørreide F. First hyperspectral imaging survey of the deep seafloor: High-resolution mapping of manganese nodules. *Remote Sens Environ* 2018; 209: 19-30. DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.024.

[5] Wu TC, Chi YC, Wang HY, et al. Blue laser diode enables underwater communication at 12.4 Gbps. *Sci Rep* 2017; 7: 40480. DOI: 10.1038/srep40480.

[6] Reynolds RA, Stramski D, Neukermans G. Optical backscattering by particles in Arctic seawater and relationships to particle mass concentration, size distribution, and bulk composition. *Limnol Oceanogr* 2016; 61: 1869-1890. DOI: 10.1002/lno.10341.

[7] Loisel H, Stramski D, Dessailly D, Jamet C, Li L, Reynolds RA. An inverse model for estimating the optical absorption and backscattering coefficients of seawater from remote-sensing reflectance over a broad range of oceanic and coastal marine environments. *J Geophys Res Oceans* 2018; 123: 2141-2171. DOI: 10.1002/2017JC013632.

[8] Mosyagin GM, Koluchkin VY. The theory of optical-electronic systems [In Russian]. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University; 2020.

[9] McGlamery BL. A computer model for underwater camera systems. *Proc SPIE* 1980; 208: 221-231. DOI: 10.1117/12.958279.

[10] Jaffe JS. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems. *IEEE J Ocean Eng* 1990; 15(2): 101-111.

[11] Shifrin KS. Introduction to ocean optics [In Russian]. Leningrad: "Gidrometeoizdat" Publisher; 1983.

[12] Levin IM. Promising lines of studying the ocean by optical remote sensing methods [In Russian]. *Fundamental and Applied Hydrophysics* 2008; 1: 14-47.

[13] Kozintcev VI, Orlov VM, Belov ML. Optical electronic systems for ecological monitoring of the nature environment [In Russian]. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University; 2002.

[14] Karasik VE, Orlov VM. Location laser vision systems [In Russian]. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University; 2013.

[15] Kostylev NM, Kolyuchkin VYa, Stepanov RO. A mathematical model of laser radiation propagation in seawater. *Optics Spectrosc* 2019; 127: 612-617. DOI: 10.1134/S0030400X1910014X.

[16] Lisenko AA, Shamanaev VS. Statistical estimates of the effect of the sea water scattering phase function on the characteristics of airborne hydrooptical lidar signals. *Russian Physics Journal* 2021; 64(2): 1373-1380. DOI: 10.1007/s11182-021-02463-7.

[17] Goodman JW. Introduction to Fourier optics. McGraw-Hill; 1996.

[18] Rizzini DL, Kallasi F, Aleotti J, Oleari J, Caselli S. Integration of a stereo vision system into an autonomous underwater vehicle for pipe manipulation tasks. *Comput Electr Eng* 2017; 58: 560-571. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2016.08.023.

[19] Gulina YS, Koliuchkin VYa, Trofimov NE. Mathematical model of human visual system. *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)* 2018; 27(4): 219-234. DOI: 10.3103/S1060992X1804001X.

[20] Gulina YS, Kolyuchkin VYa. Experimental investigations of a model of the human visual system. *Optics Spectrosc* 2019; 127: 675-683. DOI: 10.1134/S0030400X19100114.

[21] Gulina YS, Kolyuchkin VYa. Method for calculating detection probability of objects images by a human. *Optical Memory and Neural Networks* 2020; 29(3): 209-219. DOI: 10.3103/S1060992X2003011X.

[22] Gulina YS, Kolyuchkin VYa. Method for calculating recognition probability of objects images by a human.

Optical Memory and Neural Networks 2021; 30(2): 172-179. DOI: 10.3103/S1060992X21020090.

Сведения об авторах

Колочкин Василий Яковлевич, 1948 года рождения, в 1972 году окончил МВТУ им. Н.Э.Баумана и в 1986 МИФИ. Д-р техн. наук, профессор кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области системного проектирования оптико-электронных приборов. E-mail: vkoluch@bmstu.ru.

Костылёв Никита Михайлович, 1987 года рождения, в 2010 году окончил МГТУ им. Н.Э.Баумана. Работает старшим преподавателем на кафедре лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: проектирование оптико-электронных приборов, обработка изображений, цифровая фотография. E-mail: kostylev@bmstu.ru.

Гулина Юлия Сергеевна, 1986 года рождения, в 2009 году окончила МГТУ им. Н.Э.Баумана. Кандидат технических наук, доцент кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: синтез оптических систем, математическое моделирование зрительной системы человека, лазерная физика. E-mail: gulina_ys@bmstu.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 8 декабря 2022 г. Окончательный вариант – 20 марта 2023 г.

Performance evaluation of underwater vision systems

V.Y. Kolyuchkin¹, N.M. Kostylev¹, Y.S. Gulina^{1,2}

¹ Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia, 2-Ya Baumanskaya Ulitsa 5;

² P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,
119991, Moscow, Russia, Leninskiy Prospekt 53

Abstract

The article describes a methodology for performance evaluation of vision systems for remotely operated underwater vehicles. The methodology is based on a system approach and uses mathematical models of the aqueous medium where an optical signal propagates, the underwater object image registration system, and the mathematical model of the human visual system. The detection and recognition probabilities of underwater object image at a given registration range are used as performance evaluation indicators of underwater vision systems. The mathematical model of the aqueous medium developed by the authors allows quantitative evaluation of the influence of backscattering interference arising during objects illumination on the underwater vision system performance. The results of numerical experiments presented in the paper illustrate the possibility of using the proposed technique to optimize the underwater object image registration system parameters in order to achieve the required values of detection or recognition probabilities at the given ranges.

Keywords: ROUV, underwater vision system, backscattering, optical imaging, water inherent optical properties, human visual system, detection and recognition probabilities.

Citation: Kolyuchkin VY, Kostylev NM, Gulina YS. Performance evaluation of underwater vision systems. *Computer Optics* 2023; 47(5): 761-769. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1262.

Authors' information

Vasiliy Yakovlevich Kolyuchkin, (b. 1948), graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1972 and National Research Nuclear University MEPhI in 1986. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Laser and Optoelectronic Systems department at the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 scientific papers in the field of optoelectronic devices system design. E-mail: vkoluch@bmstu.ru.

Nikita Mikhailovich Kostylev, (b. 1987), graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2010. Works as a senior lecturer at the Laser and Optoelectronic Systems department of the Bauman Moscow State Technical University. Research interests: optoelectronic devices design, image processing, digital photography. E-mail: kostylev@bmstu.ru.

Yulia Sergeevna Gulina, (b. 1986), graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2009. PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Laser and Optoelectronic Systems department of Moscow State Technical University. Research interests: optical systems design, mathematical modeling of human visual system, laser physics. E-mail: gulina_ys@bmstu.ru.

Received December 8, 2022. The final version – March 20, 2023.
