

На правах рукописи
НЕ ВДАЕТСЯ

МУХИНА Елена Евгеньевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ПОДВОДНОЙ
СИСТЕМЫ ВИДЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО
ПОДХОДА**

05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



МОСКВА 2005

Работа выполнена на кафедре «Лазерные и оптико-электронные системы» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Карасик Валерий Ефимович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Самохвалов Игнатий Викторович
кандидат технических наук, доцент
Алехнович Валентин Иванович

Ведущая организация: **ОАО «НПО «Геофизика-НВ», Москва**

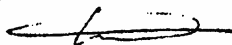
Защита состоится «15» февраля 2006 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
105005 г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5

Отзывы, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу:
105005 г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5. Диссертационный совет
Д 212.141.19

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан « ____ » января 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук



Бурый Е.В.

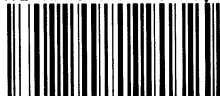
Актуальность работы

В последнее время все большее значение приобретает получение изображений подводных объектов, находящихся на небольших глубинах (порядка 50 м), не только с целью определения их местоположения (т.е. обнаружения), но и для их распознавания и идентификации, например, при поиске полезных ископаемых (типа марганцевых конкреций, которые хорошо видны на фоне шельфа), аварийно-спасательных работах и т.д. Использование для этих целей подводных аппаратов сопряжено с большими техническими сложностями, поэтому целесообразно проводить исследования с помощью активных изображающих систем, когда подсвет осуществляется лазерным источником излучения, а регистрация изображений – фотоприемным устройством, расположенными на борту авианосителя. Тогда возникает задача оценки качества изображения подводного объекта, регистрируемого лазерной системой видения (ЛСВ) через взволнованную границу раздела «воздух-вода».

При наблюдении подводного объекта через взволнованную поверхность моря его изображение искажается вследствие размытия из-за многократного рассеяния излучения в воде, а также нарушений топологии, вызванных случайным характером преломления излучения на границе раздела «воздух-вода». С помощью модуляционной передаточной функции (МПФ) возможно оценить только качество среднестатистического изображения, т.е. накопленного за бесконечно большое время усреднения. Сложнее обстоит дело с оценкой качества изображения, полученного при ограниченном времени усреднения, т.к. именно в этом случае помимо потери контраста имеют место искажения, нарушающие топологию изображения (изображение дробится, в нем появляются разрывы, прямые линии искривляются, форма изображения искажается). Негативное влияние волнения можно уменьшить за счет увеличения времени накопления. Однако в реальных условиях эти возможности ограничены. Поэтому задача определения необходимого времени накопления, при котором обеспечивается получение изображения требуемого качества, представляется достаточно важной.

Работы в данном направлении ведутся в ряде организаций, в частности во ФГУП «НИИ Прецизионного приборостроения», Московском физико-техническом институте, в Институте прикладной физики РАН (Зеге Э.П., Кацевым И.Л., Долиным Л.С., Лучининым А.Г., Вебером В.Л.). Из этих работ следует, что получить аналитические выражения, устанавливающие связь между параметрами волнения и характеристиками неполностью усредненных изображений, удастся только для некоторых, наиболее простых условий наблюдения.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1738171

Мухина Е.Е. Разработка и и

В этой связи разработка новых методов анализа процесса формирования изображения подводного объекта лазерной системой видения, функционирующей через взволнованную границу раздела «воздух-вода» при ограниченном времени наблюдения, является весьма актуальной. Для решения этой задачи в работе предложен наиболее эффективный метод математического моделирования на основе имитационного подхода и алгоритм его реализации.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка методов расчета основных параметров лазерной системы подводного видения и характеристик изображения подводного объекта на основе математического моделирования с использованием имитационного подхода.

Задачи исследования

1. Разработать методику анализа процесса формирования изображения лазерной подводной системой видения, которая учитывает влияние на качество формируемого изображения как слоя рассеивающей среды, так и взволнованной границы раздела «воздух-вода».
2. Разработать методику оценки статистических моментов сигнала в элементе изображения при наблюдении через взволнованную морскую поверхность.
3. Разработать математическую модель подводной активной изображающей системы, функционирующей через взволнованную границу раздела «воздух-вода», на основе имитационного подхода.
4. Выбрать и обосновать критерий качества формируемого изображения при наблюдении через взволнованную морскую поверхность.
5. Разработать методику определения необходимого времени накопления, при котором обеспечивается получение изображения требуемого качества.
6. Разработать методику оценки обнаружительных характеристик и предельной дальности действия подводной лазерной системы видения через взволнованную границу раздела «воздух-вода» при ограниченном времени наблюдения.
7. Разработать методику проведения натурных экспериментальных исследований для верификации созданной математической модели.
8. Провести проверку степени адекватности разработанной математической модели на основе сравнения с результатами теоретических и экспериментальных исследований.

Методы исследования

При решении поставленной задачи использовались методы теории переноса оптического излучения для исследования распределения освещенности в плоскости подводного объекта, методы теории вероятности и математи-

ческой статистики для нахождения первого и второго статистических моментов мощности сигнала в элементе изображения, методы математического моделирования на основе имитационного подхода для анализа процесса формирования изображения через взволнованную морскую поверхность, методы теории линейных систем для описания передаточных функций звеньев ЛСВ.

Научная новизна диссертации

1. Создана математическая модель лазерной системы подводного видения через взволнованную границу раздела «воздух-вода» на основе имитационного подхода, позволяющая оценить качество изображения подводного объекта при ограниченном времени наблюдения.
2. Разработана методика определения необходимого времени усреднения для формирования изображения требуемого качества в зависимости от балльности волнения.
3. Разработана методика определения отношения сигнал/шум лазерной системы видения, работающей через взволнованную границу раздела «воздух-вода», с учетом флуктуационной составляющей сигнала, обусловленной волнением.

Практическая ценность

1. Разработана инженерная методика оценки обнаружительных характеристик и предельной дальности видения подводной ЛСВ при ограниченном времени наблюдения, позволяющая сделать рациональный выбор элементной базы изображающей системы.
2. Разработана методика проведения натурных экспериментальных исследований для проверки степени адекватности созданной математической модели.
3. Разработана методика определения пространственного коэффициента корреляции по результатам натурных экспериментов через взволнованную морскую поверхность.
4. Разработаны алгоритмы и программы обработки изображений, позволяющие существенно сократить процесс вычислений.

Внедрение результатов диссертационной работы

Основные результаты исследований внедрены на ФГУП «Геофизика-НВ» при разработке подводных изображающих систем, на ФГУП «НПО «Оптика» при разработке оптических систем, а также используются в учебном процессе на кафедре «Лазерные и оптико-электронные системы», что подтверждено соответствующими актами. Разработанные методы анализа процесса формирования изображения подводной ЛСВ в рассеивающей среде использованы при проведении НИР «Цунами» и «Ихтиандр» совместно со ФГУП «НИИ прецизионного приборостроения».

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы представлялись на XI, XIII и XIV Международных научно-технических конференциях "Лазеры в науке, технике, медицине" (г. Сочи, 2000, 2002, 2003 гг.), на научно-технической конференции "Лазерные системы и их применение" (г. Кострома, 2004 г.), а также на II и III научно-технических конференциях «Радиооптические технологии в приборостроении» (г. Сочи, 2004 и 2005 гг.).

Публикации

По теме диссертации опубликованы работы [1-7].

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов и списка литературы. Она изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка и 5 таблиц. Список литературы включает 60 наименований.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Математическая модель на основе имитационного подхода подводной лазерной системы видения через взволнованную морскую поверхность при ограниченном времени накопления.
2. Методика определения необходимого времени накопления для получения изображения требуемого качества в зависимости от балльности волнения.
3. Модельное представление процесса формирования изображения в рассеивающей среде, позволяющее оценить его качество с учетом вклада прямой и рассеянной компонент излучения в распределение освещенности.
4. Методика определения обнаружительных характеристик и предельной дальности видения подводной ЛСВ, работающей через взволнованную границу раздела «воздух-вода».
5. Методика проведения натурных экспериментальных исследований для проверки степени адекватности разработанной математической модели.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. Определены цель и задачи работы. Проведен обзор литературы и анализ результатов исследований по направлению работы. Изложены методы исследования. Описаны структура и содержание диссертации.

В первой главе на основе математического моделирования процесса формирования изображения подводного объекта с помощью ЛСВ в приближении «гладкой» границы раздела «воздух-вода» определяются средние зна-

чения характеристик изображения с учетом только многократного рассеяния.

Моделирование ведется с использованием теории переноса изображения в рассеивающей среде, которая базируется на фундаментальных положениях:

- уравнении переноса излучения;
- оптической теореме взаимности;
- условию ракурсной инвариантности.

С использованием указанных положений процесс формирования изображения подводной активной системой видения описывается уравнением переноса изображения в рассеивающей среде:

$$P(\vec{r}_{s0}) = P_{\infty} \int \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\vec{r}_s) H(\vec{r}_{s0} - \vec{r}_s) d\vec{r}_s, \quad (1)$$

где $P_{\infty} = P_0 \cdot \frac{\Sigma_n \Omega_n}{\pi} \int \int_{-\infty}^{\infty} E_n(\vec{r}_s) E_n(\vec{r}_s) d\vec{r}_s$ – мощность сигнала, отраженного от бесконечно протяженного объекта с коэффициентом отражения $\rho = 1$; $\rho(\vec{r}_s)$ – распределение коэффициента отражения объекта; $\vec{r}_s, \vec{r}_{s0}$ – координаты на поверхности объекта; Σ_n, Ω_n – соответственно площадь входного зрачка и телесный угол поля зрения приемника; $H(\vec{r}_s)$ – функция рассеяния (ФР) активной системы видения, которая учитывает как параметры изображающей системы, так и оптические характеристики рассеивающей среды.

Для ЛСВ, в которой источник подсвета имеет широкую диаграмму направленности, а приемник – узкую, ФР активной системы видения определяется выражением:

$$H(\vec{r}_s) = E_n(\vec{r}_s) / \int \int_{-\infty}^{\infty} E_n(\vec{r}_s) d\vec{r}_s.$$

$E_n(\vec{r}_s), E_n(\vec{r}_s)$ представляют собой нормированные распределения освещенности в плоскости объекта от действительного и «фиктивного» (с параметрами приемника) источников, которые находятся из решения уравнения переноса в малоугловом приближении:

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \vec{n}_1 \nabla_1 \right) L(\vec{r}_1, z, \vec{n}_1) = -\epsilon L(\vec{r}_1, z, \vec{n}_1) + \frac{\sigma}{4\pi} \int \int_{-\infty}^{\infty} L(\vec{r}_1, z, \vec{m}_1) x(\vec{n}_1 - \vec{m}_1) d^2 m_1,$$

где $\vec{n}_1 \nabla_1 = n_x \frac{\partial}{\partial x} + n_y \frac{\partial}{\partial y}$; $L(\vec{r}_1, z, \vec{n}_1)$ – яркость, Вт/(м²·ср); $\vec{r}_1, \vec{n}_1$ – проекции радиус-вектора точки $\vec{r}$ и векторов направления $\vec{n}$ и $\vec{m}$ на плоскость $z = \text{const}$, нормальную к оси пучка; ϵ – показатель ослабления излучения, м⁻¹; σ – показатель рассеяния, м⁻¹; $x(\vec{n}_1 - \vec{m}_1)$ – индикатриса рассеяния.

Для источника с гауссовой диаграммой направленности получено выражение для освещенности площадки, расположенной на глубине z , от лазерно-

го источника, расположенного на высоте H , представляющее собой сумму двух компонент: «прямой», когда действует только закон Бугера, и «рассеянной», описывающей влияние многократного рассеяния.

$$E_n(z, r_i) = \frac{\exp(-\varepsilon z) \exp(-r_i^2/b_n)}{\pi b_n} + \frac{\Lambda \varepsilon \exp(-\varepsilon z)}{\pi} B_n,$$

$$b_n = \alpha_n^2 (H + z/n)^2, \quad B_n = \int_0^z \frac{\exp(-\Lambda \varepsilon z) \exp(-r_{zf}^2/r_{zf}(x))}{r_{zf}(x)} dx,$$

$$r_{zf}(x) = \alpha_n^2 (H + z/n)^2 + 6\mu^2 x^2 + 2\Lambda \varepsilon \mu^2 z^3 - 2\Lambda \varepsilon \mu^2 x^3,$$

где Λ – вероятность «выживания» фотона; μ – параметр, характеризующий вытянутость индикатрисы рассеяния, α_n – угловая расходимость излучения источника, рад. Величины ε , σ , Λ , μ определяются по глубине видимости белого диска Секки z_6 .

Это дает возможность оценить вклад каждой компоненты в распределение освещенности в зависимости от параметров морской среды и глубины расположения объекта (рис. 1). На рисунке «прямая» компонента обозначена сплошной линией, а «рассеянная» – пунктирной.

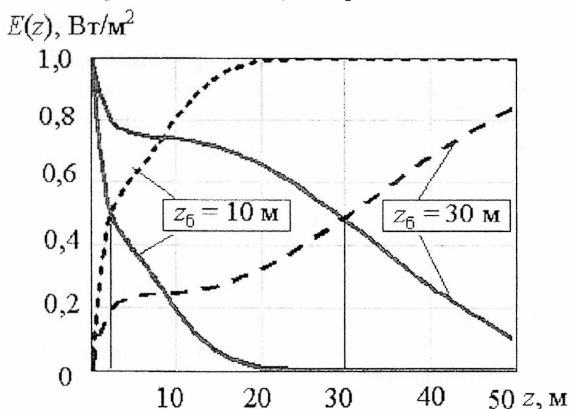


Рис.1. Соотношение «прямой» и «рассеянной» компонент

Показано, что при наблюдении с высоты 100 м в воде с $z_6 = 10$ м, распределение освещенности практически полностью определяется многократным рассеянием. В более прозрачной воде с $z_6 = 30$ м до глубин порядка 20 м многократное рассеяние можно не учитывать.

На основе полученного распределения освещенности определена мощность сигнала в элементах изображения ограниченного объекта, фона и помехи обратного рассеяния (ПОР) в режиме стробирования по дальности.

$$P_{об}(z, r_0) = \frac{2\pi P_0 \sum_n \Omega_n \tau_{мн} \tau_a \tau_{ос} \rho_{об}}{n^2 \pi} \int_0^{r_0} \int E_n(\vec{r}_1, z) E_n(\vec{r}_2, z) r_1 dr_1, \quad (2)$$

$$P_\phi(z) = \frac{P_0 \tau_{мн} \tau_a \tau_{ос} \rho_\phi}{n^2} \left(\frac{r_n}{r_s} \right)^2 \alpha_n^2 \exp[-2\tau(1-\Lambda)] \frac{D/(\Lambda \varepsilon z)^3 + \exp[-2\Lambda \varepsilon z(1 + D/(\Lambda \varepsilon z)^3)]}{1 + D/(\Lambda \varepsilon z)^3}, \quad (3)$$

$$P_{пор}(z) = \frac{P_0 \tau_{мн} \tau_a \tau_{ос}}{n^2} \left(\frac{\sigma x_n c t_{им}}{8n} \right) \left(\frac{r_n}{r_s} \right)^2 \alpha_n^2 \exp[-2\tau(1-\Lambda)] \frac{D/(\Lambda \varepsilon z)^3 + \exp[-2\Lambda \varepsilon z(1 + D/(\Lambda \varepsilon z)^3)]}{1 + D/(\Lambda \varepsilon z)^3}, \quad (4)$$

$$D = \Lambda^2 (\varepsilon r_s)^2 / (4\mu^2); \quad r_s^2 = (\alpha_n^2 + \alpha_n^2) (H + z/n)^2.$$

где P_0 – мощность излучения лазерного источника подсвета; $\tau_{мн}$ – коэффициент пропускания морской поверхности; τ_a – коэффициент пропускания атмосферы; $\tau_{ос}$ – коэффициент пропускания оптической системы; $\rho_{об}$, ρ_ϕ – соответственно коэффициенты отражения объекта и фона, r_n – радиус входного зрачка оптической системы; α_n – угол зрения приемной системы; $t_{им}$ – длительность лазерного импульса; x_n – значение индикатрисы рассеяния в обратном направлении, c – скорость света.

Показано, что на малых глубинах величины мощности излучения в элементе изображения ограниченного и бесконечно большого объектов практически одинаковы и можно рассматривать наблюдение любого объекта как бесконечно большого.

С помощью компьютерного моделирования на основе решения двумерного интеграла свертки (1) коэффициента отражения с функцией рассеяния с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье проведена оценка размытия изображения вследствие многократного рассеяния в морях с различными значениями z_6 (рис. 2).

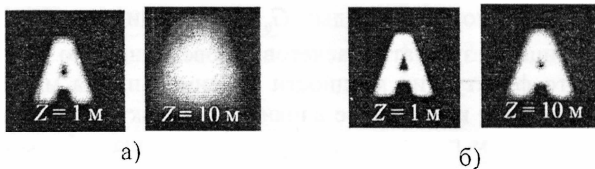


Рис. 2. Размытие изображения в морской среде: а) $z_6 = 10$ м, б) $z_6 = 30$ м

Разработанное модельное представление процесса формирования изображения в рассеивающей среде позволяет оценивать его качество и потенциальные возможности ЛСВ при наблюдений подводного объекта в море.

Вторая глава посвящена анализу влияния волнения на характеристики оптического сигнала, отраженного от подводного объекта. Цель анализа – разработка методики расчета отношения сигнал/шум в элементе изображения при наблюдении через взволнованную границу раздела «воздух-вода».

При наблюдении через взволнованную морскую поверхность сигнал, регистрируемый фотоприемником, становится случайной величиной, в нем появляется флуктуационная составляющая, обусловленная волнением. Анализ флуктуаций проводится на основе нахождения двух первых статистических моментов мощности сигнала: среднего значения и дисперсии

Средние значения флуктуаций описываются выражениями для мощности излучения (2) – (4), полученными в первой главе для рассеивающей среды в приближении гладкой границы раздела «воздух-вода».

Дисперсии флуктуаций мощности ограниченного объекта, фона и помехи обратного рассеяния находятся из соотношений:

$$\sigma_{\text{ог}}^2(z) = \frac{(P_0 \tau_{\text{мп}} \tau_a \tau_{\text{ос}} \rho_{\text{ог}} r_n^2 \alpha_n^2)^2 (1 - 1/n)^2 z^2 \int_0^\infty J^2(s) G_0(s) ds}{(4\pi n^2)^2 \bar{P}_{\text{ог}}^2(z)}, \quad (5)$$

$$\sigma_{\phi}^2(z) = \frac{(P_0 \tau_{\text{мп}} \tau_a \tau_{\text{ос}} \rho_{\phi} r_n^2 \alpha_n^2)^2 (1 - 1/n)^2 z^2 \int_0^\infty J^2(s) G_0(s) ds}{(4\pi n^2)^2}, \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{пор}}^2(z) = \frac{(P_0 \tau_{\text{мп}} \tau_a \tau_{\text{ос}} (\sigma_{\chi_{\pi}} c t_{\text{им}}) / 8n)^2 r_n^2 \alpha_n^2 (1 - 1/n)^2 z^2 \int_0^\infty J^2(s) G_0(s) ds}{(4\pi n^2)^2}, \quad (7)$$

где $\bar{P}_{\text{ог}}(z)$ – среднее значение мощности излучения от протяженного объекта, которое определяется по формуле (5'); $\bar{P}_{\text{ог}}^1(z)$ – среднее значение мощности излучения от ограниченного объекта, определяющееся по формуле (5); $J(s)$ – функция, учитывающая параметры приемо-передающей системы и оптические характеристики морской среды; $G_0(s)$ – модифицированный спектр Пирсона-Московица. Результаты расчетов, проведенных по формулам (5) – (7), показали, что флуктуации мощности максимальны на малых глубинах, где волнение оказывает наибольшее влияние на характеристики оптического сигнала. С увеличением глубины флуктуации уменьшаются вследствие усиления многократного рассеяния (рис. 3).

Наличие флуктуаций мощности сигнала в элементе изображения приводит к появлению дополнительного флуктуационного шума, обусловленного волнением. В сигнале, регистрируемом фотоприемным устройством, всегда присутствует фотонный дробовый шум. В предположении, что фотонный и флуктуационный шумы независимы и некоррелированы, определено отношение сигнал/шум на выходе фотоприемного устройства ЛСВ, функционирующей через взволнованную морскую поверхность. В качестве фотоприем-

ного устройства в ЛСВ обычно используется ФПЗС-матрица, поэтому шумы рассчитаны в числах фотоэлектронов n :

$$\mu_{\text{сист}}(z) = \frac{\Delta n_c \cdot T_{\text{сист}}(\nu)}{\sqrt{\langle n_{\text{фот}}^2(z) \rangle + \langle n_{\text{а.об}}^2(z) \rangle + \langle n_{\text{а.ф}}^2(z) \rangle + \langle n_{\text{а.пор}}^2(z) \rangle}},$$

где $\Delta n_c = \bar{n}_{\text{об}} - \bar{n}_{\text{ф}}$ – разность средних чисел фотоэлектронов, формируемых соседними элементарными ячейками (пикселями) фотоприемного устройства под воздействием сигнального и фонового излучения за определенный временной интервал; $T_{\text{сист}}$ – модуляционная передаточная функция системы.

$$\bar{n}_{\text{а.ф}(\phi)} = \frac{\bar{P}_{\text{а.ф}(\phi)} t_n \eta(\lambda)}{h\nu},$$

где t_n – время накопления матрицы, которое в режиме стробирования по дальности равно длительности импульса зондирующего лазерного источника $t_{\text{им}}$; $\eta(\lambda)$ – квантовая эффективность фоточувствительного слоя на рабочей длине волны; $h\nu$ – квант энергии.

$\langle n_{\text{фот}}^2 \rangle = 0,5(\bar{n}_{\text{об}} + \bar{n}_{\text{ф}} + \bar{n}_{\text{пор}})$ – дисперсия фотонного шума.

$\langle n_{\text{а.об}(\phi)\text{пор}}^2(z) \rangle = \sigma_{\text{а.ф}(\phi)\text{пор}}^2 \left(\frac{t_{\text{им}} \eta(\lambda)}{h\nu} \right)^2$ – дисперсия флуктуационного шума.

На рис. 4 представлены результаты расчета отношения сигнал/шум. Показано, что на малых глубинах кривая отношения сигнал/шум имеет экстремум, где флуктуации, вызванные поверхностным волнением, максимальны. При увеличении глубины эти флуктуации уменьшаются за счет возрастания многократного рассеяния, и кривая стремится к асимптотической зависимости, определяемой дробовыми шумами.

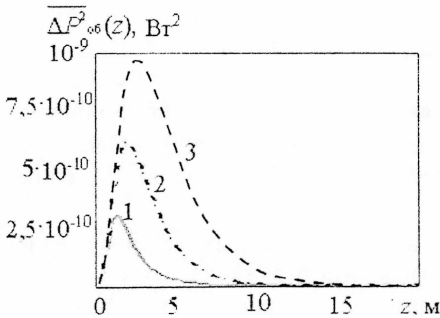


Рис. 3. Дисперсия флуктуаций мощности сигнала от объекта:

1 – $z_0 = 10$ м; 2 – $z_0 = 20$ м; 3 – $z_0 = 30$ м

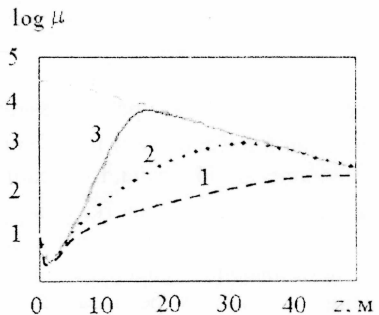


Рис. 4. Отношение сигнал/шум:

1 – $\nu = 1$ м/с; 2 – $\nu = 3$ м/с;

3 – $\nu = 5$ м/с; 4 – нет волнения.

Разработанные методы расчета статистических характеристик сигнала позволяют решить задачу обнаружения подводного объекта. Однако, помимо появления флуктуационного шума в элементе изображения под влиянием взволнованной границы раздела «воздух-вода» происходит нарушение топологии изображения. Оценить нарушение топологии изображения с помощью аналитических методов не представляется возможным. В работе предлагается решать эту задачу путем математического моделирования с использованием имитационного подхода.

В третьей главе разрабатывается методика определения необходимого времени накопления для получения изображения требуемого качества на основе математического моделирования с использованием имитационного подхода.

При имитационном подходе подводная ЛСВ заменяется имитатором, состоящим из конечного числа элементов. Поведение же системы в целом описывается алгоритмом, реализуемым на ЭВМ и учитывающим взаимодействие друг с другом моделей отдельных элементов внутри системы.

Волнение моделируется в виде суперпозиции синусоидальных волн с детерминированными амплитудами и волновыми числами и со случайными фазами, равномерно распределенными в интервале от 0 до 2π :

$$q(x_0) = \sum_{i=1}^M a_i \sin(k_i x_0 + \varphi_i).$$

Ухудшение качества формируемого изображения оценивается величиной пространственного коэффициента корреляции, характеризующего степень подобия идеального и искаженного изображений:

$$R = \frac{\overline{\Delta\rho'_{ид}(x'_0) \Delta\rho'_{ис}(x'_0)}}{\sqrt{(\overline{\Delta\rho'_{ид}(x'_0)})^2} \sqrt{(\overline{\Delta\rho'_{ис}(x'_0)})^2}}, \quad (8)$$

$$\Delta\rho'_{ид}(x'_0) = \overline{\rho'_{ид}(x'_0)} - \overline{\rho'_{ид}(x'_0)}, \quad \Delta\rho'_{ис}(x'_0) = \overline{\rho_{ис}(x'_0)} - \overline{\rho_{ис}(x'_0)},$$

где $\rho'(x'_0)$, $\Delta\rho'(x'_0)$ – распределение и амплитуда модуляции коэффициента отражения в идеальном и искаженном изображениях объекта. Двойная черта над функциями обозначает операцию их усреднения по координате x'_0 в пределах наблюдаемого участка объекта.

Идеальные изображения задаются в виде дискретных массивов значений, описывающих распределение коэффициента отражения. Путем формирования случайных реализаций взволнованной поверхности моделируются отдельные реализации изображений (рис. 5). Показано, что повышение скорости ветра приводит к усилению искажений изображения, а, следовательно, к уменьшению пространственного коэффициента корреляции. Многократное рассеяние, в свою очередь, уменьшает искажения, вызванные волнением.

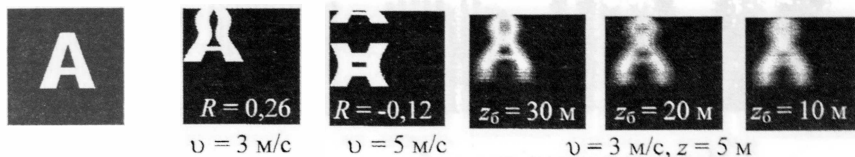


Рис. 5. Идеальное и искаженные модельные изображения

Понижение качества изображения можно объяснить тем, что при повышении скорости ветра перестают разрешаться высокие пространственные частоты. В прозрачной воде и в отсутствие волнения максимально разрешаемая пространственная частота ограничивается только разрешением самой системы видения, назовем ее граничной (или аппаратной) пространственной частотой, а коэффициент корреляции равен 1. Существует возможность повысить качество изображения за счет его усреднения по ансамблю реализаций. При этом происходит восстановление его топологии, увеличивается коэффициент корреляции, и повышается максимальная разрешаемая частота, т.е. повышается качество изображения (рис. 6).

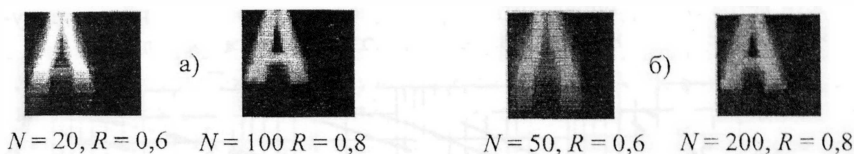


Рис. 6. Результаты усреднения модельных изображений объектов:

а) $v = 3$ м/с; б) $v = 5$ м/с

При бесконечно большом усреднении максимально разрешаемая пространственная частота стремится к аппаратной, а коэффициент корреляции – к единице.

На основании результатов моделирования разработана методика определения необходимого времени накопления для получения изображения требуемого качества, основанная на определении пространственного коэффициента корреляции усредненных модельных изображений тест-объектов в виде серии синусоидальных мир различной пространственной частоты при различных скоростях ветра.

Алгоритм определения необходимого времени накопления выглядит следующим образом:

- 1) Задаются параметры приемо-передающего тракта подводной ЛСВ.
- 2) Моделируются идеальные изображения в виде серии синусоидальных мир различной пространственной частоты, причем максимальная пространственная частота выбирается равной аппаратной частоте ЛСВ (рис. 7).

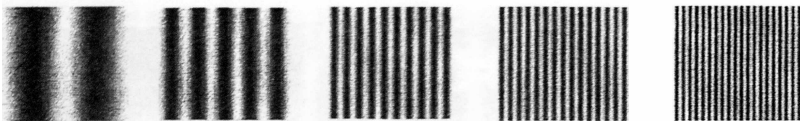


Рис. 7. Модельные идеальные изображения синусоидальных мир

3) Задается скорость ветра и моделируются искаженные реализации изображений мир путем случайного розыгрыша реализаций волнения.

4) Производится усреднение модельных искаженных изображений по ансамблю реализаций и определяется пространственный коэффициент корреляции усредненного и идеального изображений каждой мира.

5) Увеличивается число усредняемых реализаций до тех пор, пока величина пространственного коэффициента корреляции не достигнет значения, близкого к единице.

6) Указанная последовательность действий повторяется для другого значения скорости ветра.

В результате строится номограмма (рис. 8), по которой при заданной скорости ветра можно определить необходимое число реализаций для получения изображения с требуемым значением коэффициента корреляции.

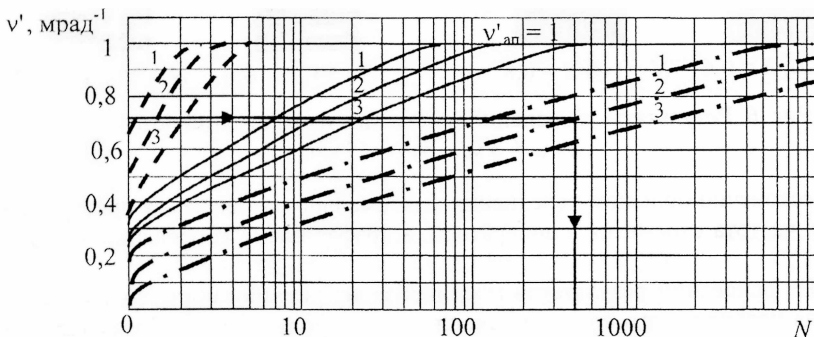


Рис. 8. Номограмма для определения необходимого числа усредняемых реализаций: 1 – $R = 0,7$; 2 – $R = 0,8$; 3 – $R = 0,9$

— $v = 3 \text{ м/с}$ — · — $v = 0,5 \text{ м/с}$ - - - $v = 0,2 \text{ м/с}$

Путем сравнения теоретической модуляционной передаточной функции взволнованной морской поверхности и модельной МПФ, полученной по усредненным модельным изображениям синусоидальных мир различной пространственной частоты, определено пороговое значение пространственного коэффициента корреляции, равное 0,8; при котором оценку качества изобра-

жения и обнаружительных характеристик подводной ЛСВ можно проводить с использованием теории линейных систем.

На основе полученных результатов разработана методика оценки обнаружительных характеристик и предельной дальности действия подводной ЛСВ, функционирующей через взволнованную границу раздела «воздух-вода» при ограниченном времени накопления, на основе использования понятия минимального разрешаемого контраста (МРК) $\kappa_{\min}$, т.е. такого минимального контраста наблюдаемого объекта, при котором воспринимаемое оператором на экране монитора отношение сигнал/шум превышает заданное пороговое значение $\mu_{\text{восп.пор}}$:

$$\kappa_{\min}(z) = \frac{\pi^2}{8} \frac{\mu_{\text{восп.пор}} < n_{\text{сист}}^2 >^{1/2}}{T_{\text{ЛСВ}}(z \cdot N / H_{\text{кр}})(\bar{n}_{\text{об}} + \bar{n}_{\phi})} \sqrt{\frac{1}{t_{\text{гл}} \cdot f_{\text{к}}}} \sqrt{\alpha_x \alpha_y \frac{(z \cdot N / H_{\text{кр}})^2}{q_m}},$$

где N – число периодов эквивалентной волны, укладывающихся на критическом размере $H_{\text{кр}}$ наблюдаемого объекта; $t_{\text{гл}}$ – постоянная времени глаза; $f_{\text{к}}$ – частота кадров; α_x, α_y – угловой шаг пикселей по горизонтали и вертикали; q_m – отношение размеров полосы трехшпальной эквивалентной волны.

Величина МРК не должна превышать уровня наблюдаемого контраста $\kappa_{\text{об.н.}}$, который определяется через МПФ морской среды и взволнованной морской поверхности. Поскольку с увеличением глубины МРК возрастает, а наблюдаемый контраст уменьшается, то предельной дальностью видения ЛСВ будет дальность, на которой $\kappa_{\min}$ равен $\kappa_{\text{об.н.}}$. Для найденной величины предельной дальности восприятия объекта с заданным критическим размером по номограмме (рис. 8) определяется требуемое время наблюдения, обеспечивающее заданный пространственный коэффициент корреляции.

В качестве примера определена предельная дальность распознавания (рис. 9) объекта с критическим размером 1 м для ЛСВ, расположенной на высоте 100 м и работающей в режиме стробирования по дальности. Лазерный источник подсвета имеет энергию в импульсе 1 Дж. Установлено, что для обеспечения $R = 0,8$ время накопления равно 1 с.

Для проверки степени адекватности разработанной математической модели проведены натурные экспериментальные исследования на Красном море в прибрежной зоне, где прозрачность воды достаточно высокая ($\sim 30 - 40$ м), что позволило не учитывать многократное рассеяние, а оценивать только влияние взволнованной границы раздела «воздух-вода». Видеосъемка объекта осуществлялась цифровой видеокамерой с частотой кадров 25 Гц. Объект погружался на глубину до 10 м. Высота над уровнем моря составляла примерно 2 – 2,5 м. Скорость ветра определялась по текущим метеосводкам и диапазон ее изменения находился в пределах от 1 м/с до 5 м/с. Получены отдельные реализации изображения объекта на различных глубинах и при различной скорости ветра (рис. 10), которые затем усреднялись по ансамблю и

определялся их коэффициент корреляции (рис.11а). Верификация разработанной модели велась путем сравнения значений коэффициента корреляции в изображениях, полученных из эксперимента и путем моделирования (рис. 11б). Расхождение результатов не превышает 5%. Это дает основание говорить о высокой степени адекватности разработанной математической модели с использованием имитационного подхода.

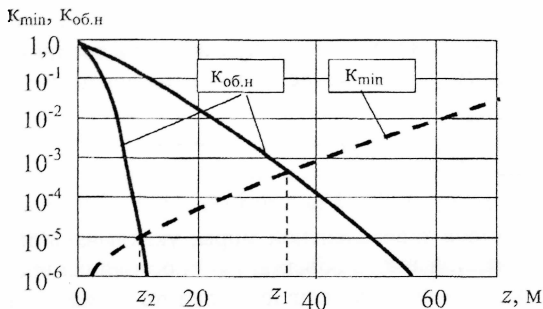


Рис. 9. Определение предельной дальности распознавания объекта при скорости ветра 0,5 м/с (z_1) и 3 м/с (z_2)

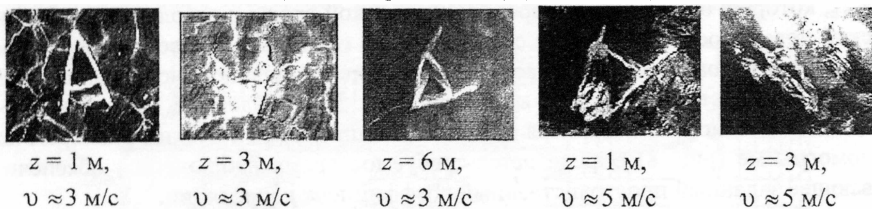


Рис. 10. Экспериментальные реализации изображения

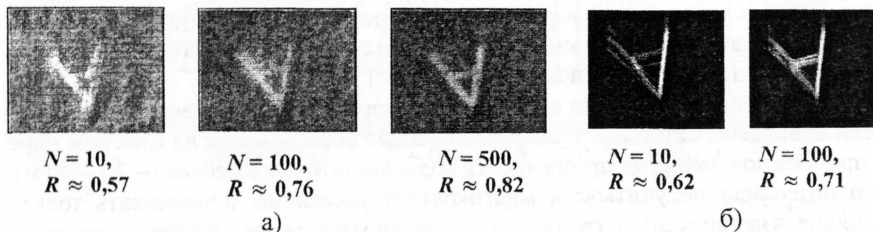


Рис. 11. Усредненные изображения при $z = 3 \text{ м}, v \approx 3 \text{ м/с}$:
а) экспериментальные, б) модельные

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе, и выводы по диссертации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Создана математическая модель лазерной системы подводного видения через взволнованную границу раздела «воздух-вода» на основе имитационного подхода, позволяющая оценить качество изображения подводного объекта, а также обнаружительные характеристики системы на предельных дальностях видения до 100 м при ограниченном времени наблюдения.
2. Предложено оценивать ухудшение качества изображения, вызванного случайным характером волнения, пространственным коэффициентом корреляции и определены пути повышения качества изображения за счет его статистического усреднения по ансамблю реализаций, накопленных за время наблюдения. Разработана методика определения требуемого времени накопления, при котором обеспечивается получение заданной величины коэффициента корреляции. При скорости ветра 3 м/с для получения качества изображения, достаточного для распознавания, необходимо усреднить от 100 до 300 реализаций, что при наблюдении с частотой кадров 25 Гц соответствует времени накопления от 5 до 12 с.
3. Разработано модельное представление процесса формирования изображения в рассеивающей среде, позволяющее оценить его качество с учетом вклада прямой и рассеянной компонент излучения в распределение освещенности в морской воде.
4. Для лазерной локации подводных объектов через случайную взволнованную морскую поверхность на основе соотношений для среднего значения и дисперсии флуктуаций мощности излучения в элементе изображения разработана методика оценки отношения сигнал/шум проектируемой системы в зависимости от величины волнения и оптических характеристик среды.
5. Высокая степень адекватности разработанной имитационной модели подтверждена теоретическими и экспериментальными исследованиями. Показано, что максимальное отличие теоретической МПФ от МПФ, полученной в результате моделирования не превышает 2%. Расхождение значений коэффициентов корреляции смоделированных и полученных при ограниченном времени накопления изображений не превышает 5%.
6. Разработана оригинальная методика оценки обнаружительных характеристик и предельной дальности видения ЛСВ, функционирующей в рассеивающей среде через взволнованную границу раздела «воздух-вода», при ограниченном времени накопления. Использование указанной методики позволяет сделать рациональный выбор элементной базы изображающей системы.
7. Полученные результаты имеют универсальный характер и могут применяться при проектировании лазерных локационных систем различного назначения, работающих в сложных погодных условиях, например, для сопровождения морских судов и для экологического мониторинга среды.

Список публикаций по теме диссертационной работы:

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Карасик В.Е., Мухина Е.Е. Оценка предельной дальности действия лазерных систем видения с импульсным подсветом // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 1999. - № 3. - С. 30-42.
2. Карасик В.Е., Мухина Е.Е. Методика экспериментального определения воспринимаемого отношения сигнал/шум ЛСВ с импульсным подсветом // Лазеры в науке, технике, медицине: Тез. докл. XII Международной науч.-техн. конф. – Сочи, 2001. - С. 49-51.
3. Карасик В.Е., Мухина Е.Е. К вопросу об определении предельной дальности видения изображающих активных систем // Синтез, передача и прием сигналов управления и связи: Сб. научн. трудов ВГТУ.– (Воронеж). - 2002.- Вып. 9. - С. 22-30.
4. Карасик В.Е., Мухина Е.Е., Орлов В.М. О наблюдении малоразмерных объектов в рассеивающей среде лазерными системами видения с импульсным подсветом. // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 2004. - № 1(54). - С. 19-27.
5. Карасик В.Е., Мухина Е.Е., Орлов В.М. Исследование распределения освещенности в плоскости объекта при наблюдении через границу раздела «воздух-вода» // Лазерные системы и их применение: Сборник трудов – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2004. - С. 13-15.
6. Карасик В.Е., Мухина Е.Е.. Анализ распределения освещенности подводного объекта при его наблюдении из воздуха // Прикладная оптика: Сборник трудов VI Международной конференции. – С.-Петербург, 2004 . - Т. 1. - С. 282-286.
7. Карасик В.Е., Мухина Е.Е., Орлов В.М. Об использовании методов имитационного моделирования подводных активных систем видения // Современное телевидение: Труды 13-й Всероссийской НГК. – М., 2005. - С. 114-117.

Подписано к печати 26.12.05 Зак. 455 Объем 1.0 п.л. Тир. 100 экз.
Типография МГТУ имени Н.Э. Баумана