

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДАЛЬНОСТИ ВИДЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ

Современные задачи повышения качества результатов подводных исследований требуют применения инновационных решений. Одним из перспективных направлений является разработка информативных каналов, основанных на лазерных системах подводного видения. Задачами исследования в представленной работе являются: обоснование применения лазерного информативного канала для картографирования донной поверхности; доказательство корректности проведения расчета предельной дальности видимости лазерной системы путем введения оптических передаточных функций, позволяющих характеризовать вклад каждой из составных частей этой многозвенной системы в формирование конечного изображения. Предлагаемые лазерные системы подводного видения могут найти практическое применение в различных областях, среди которых — океанография, подводный поиск, модернизация глубоководных аппаратов. Проведенные на основе разработанной математической модели расчеты и натурные испытания в реальных условиях показали соответствие теоретических и экспериментальных результатов.

Ключевые слова: лазерная система, подводный поиск, гидрооптика, модуляционная передаточная функция.

Введение. Исследование факторов, влияющих на дальность подводного сканирования, а также его оптимизация являются составляющими увеличения поисковой производительности глубоководных аппаратов. Одной из частных задач для этого может служить реализация нового, ранее не апробированного, лазерного информативного канала в составе интегрированной поисковой системы (ИПС). Успешного применения в глубоководной технике лазерные системы подводного видения ранее не имели. Причиной этому было как отсутствие концепции комплексного использования поисковой техники для увеличения эффективности подводного поиска, так и сложность технической реализации согласованного взаимодействия радиоэлектронного оборудования глубоководного аппарата (ГА), функционирующего в различных физических полях.

Использование инновационных технологий дает поле для целого ряда направлений в области осуществления и реализации подводного поиска. При этом для его реализации важной составной частью ИПС является лазерный информативный канал. Его внедрение обеспечит увеличение точности подводного видения целей, обнаруженных на траверзах ГА гидролокатором бокового обзора (ГБО). Сказанное означает, что научно-методологическими направлениями увеличения эффективности подводного поиска являются:

— расширение зоны охвата лазерными системами обзора, что достигается наличием более полной и актуальной информации о наличии объектов на траверзах глубоководного аппарата;

— проведение комплекса исследовательских работ в целях получения необходимых тактических

показателей работы лазерного канала для передачи информации. Это необходимо в практических задачах, связанных с применением в реальных условиях глубоководной эксплуатации и при обследовании подводных объектов по данным гидролокатора бокового обзора [1];

— исследование технологии подводного лазерного сканирования для определения им трех пространственных координат объектов поиска;

— реализация обмена информацией между ГБО и лазерным информативным каналом о координатах цели, обнаруженной на траверзах ГА, для оптического наведения на нее лазерной системы подводного видения;

— оперативное опознавание целей, обнаруженных ГБО, за счет получения их трехмерных моделей благодаря лазерному информативному каналу без изменения курса ГА;

— исследование и внедрение беспроводного оптического канала подводной связи;

— создание адаптивной интегрированной поисковой системы.

Постановка цели и теоретическое обоснование. Лазерный информативный канал, составной частью которого является лазерная система подводного видения (ЛСПВ), обеспечивает комплексность функционирования ИПС. Основное назначение ЛСПВ — визуализация объекта в процессе обзора пространства по траверзам ГА на дальностях, превышающих $0,7Z_0$, где Z_0 — прозрачность воды, определяемая по диску Секки. Многообразие задач, решаемых изображающими системами, порождает различие в требованиях, предъявляемых к качеству изображения, которое они формируют. Но в любом

случае качество изображающей системы оценивается тем выше, чем меньше степень отличия полученного изображения от реально существующего подводного объекта по уровню распределения световой интенсивности.

Теоретические исследования, проведенные в [2], в большом объеме описывают пути построения изображения с помощью лазерной системы видения.

Результаты натурального эксперимента. Как уже показано выше, была использована математическая модель, приведенная в [2]. Её достоинство заключается в детальной проработке большинства звеньев модуляционно-передаточной функции (МПФ) АСПВ и водной среды.

Дальнейший расчет на основе формул, представленных в [2], показал, что предельная дальность, на которой исследуемый объект начнет отличаться от фоновой составляющей, выражается формулой:

$$D \approx 2,7 \cdot Z_0, \quad (1)$$

D — расстояние до объекта, Z_0 — прозрачность воды по белому диску.

При проведении натурального эксперимента в качестве излучателя применялся твердотельный лазер

с диодной накачкой на кристалле Nd:YVO4 с удвоением частоты излучения и модуляцией добротности от внешнего генератора. Его характеристики приведены в табл. 1.

На рис. 1а показано облако точек диска в воде бассейна на расстоянии 20,4 м при угле сканирования лазера $\varphi = 7^\circ$ и прозрачности воды по белому диску, равной 25 м, то есть $Z_0 = 25$ м. Здесь и в дальнейшем прозрачность определялась классическим методом — по глубине исчезновения из вида плоского диска белой окраски, диаметр которого 30 см. Этот диск, называемый диском Секки, опускается в воду вместе с грузом. При этом момент полного исчезновения диска Секки определяется коллегиально группой наблюдателей, участвующих в эксперименте.

Съемка проводилась в полдень. Видимость диска хорошая. Отчетливо просматриваются крупные и мелкие части секторов. Изображение является высококонтрастным. За диском просматривается кафельная плитка.

Хорошее качество изображения на рис. 1а получилось на дальности, которое меньше $1 \cdot Z_0$. Особенность видения под водой заключается в том, что с приближением к расстоянию наблюдения, со-

Таблица 1

Характеристики твердотельного лазера на кристалле Nd:YVO4

Длительность импульса	не более 10 нс
Энергия в импульсе	не менее 1 мкДж
Частота повторения импульсов	не менее 200 кГц
Стабильность задержки между запускающим импульсом и импульсом лазерного излучения	не более 2 нс
Качество излучения TEM ₀₀	не менее 95%
Длина волны излучения	532 нм
Время формирования кадра	
Разрешение	Время
512×512 пикселей	1,3 с
256×256 пикселей	0,325 с
128×128 пикселей	0,081 с

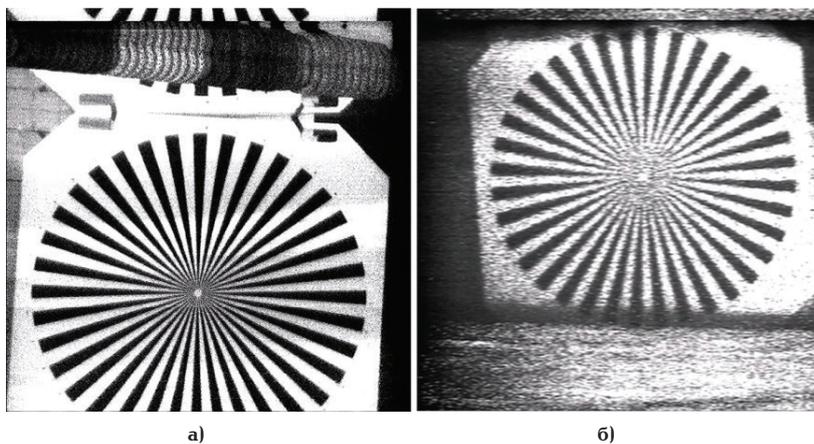


Рис. 1. а — облако точек диска в бассейне $L = 20,4$ м, $\varphi = 7^\circ$, $Z_0 = 25$ м;
б — облако точек диска в бассейне $L = 27$ м, $\varphi = 7^\circ$, $Z_0 = 25$ м

Условия проведения натурных испытаний

Сезон проведения испытаний	сентябрь
Район испытаний	одна из бухт Кольского залива Баренцева моря
Глубина района испытаний	до 50 м включительно
Заглубление подводных элементов ЛСПВ	до 3 м
Допустимая скорость движения ЛСПВ	до 5 узлов
Непрерывный цикл подводной съемки	до 24 час
Скорость ветра	до 15 м/с
Волнение моря	до 2 баллов
Температура окружающего воздуха	+10°C
Температура морской воды	до +5°C
Соленость морской воды	до 350/00

Таблица 3

Характеристики лазера QG-532-2000 YVO4 (CrystaLaserInc, США)

Лазерный кристалл	Nd:YVO ₄
Длина волны лазерного излучения	532 нм
Средняя выходная мощность	2 Вт
Частота следования импульсов (<i>f</i>)	0–200 КГц
Энергия в импульсе	2–3 мкДж при <i>f</i> =200 КГц
Длительность импульса	20 нс при <i>f</i> =200 КГц
Расходимость лазерного луча	3–4 мрад
Стабильность положения лазерного луча	0,02 мрад
Диаметр лазерного луча(1/е ²)	0,35 мм
Нестабильность энергии в импульсе	<±5%
Поляризационное отношение	100:1
Поляризация	вертикальная
Габариты	70×185×36 мм ³
Рабочая температура	10–35 °С
Напряжение питания	12–24 В
Потребляемая мощность	40 Вт

ставляющему $1 \cdot Z_0$, «картинка» заметно ухудшается. Это отчетливо видно на фото рис. 16, выполненном с расстояния 27 м.

Как видно, фото на рис. 16 соответствует дальности, превышающей величину $1 \cdot Z_0$. При этом необходимо отметить, что кафельная плитка за диском исчезла из поля зрения оператора.

Следующий этап испытаний проводился в реальных условиях на Баренцевом море. Условия съемки описаны в табл. 2.

В качестве когерентного импульсного источника оптического излучения выбран лазер QG-532-2000 YVO4 фирмы CrystaLaserInc, США [3]. Его характеристики представлены в табл. 3.

Перед проведением испытаний измерялась прозрачность воды диском Секки. Она составила:

$$Z_0 = 8 \text{ м.}$$

Прозрачность измерялась в дневное время с помощью диска Секки (белого диска), что соответствует данным лоции [4]. Испытания начинались после 22.00 часов по московскому времени, когда наступала полная темнота. Тем самым имитировались большие глубины погружения.

Так как лазерное излучение осуществлялось на одной длине волны, изображение объектов на пульте оператора наблюдалось монохромным.

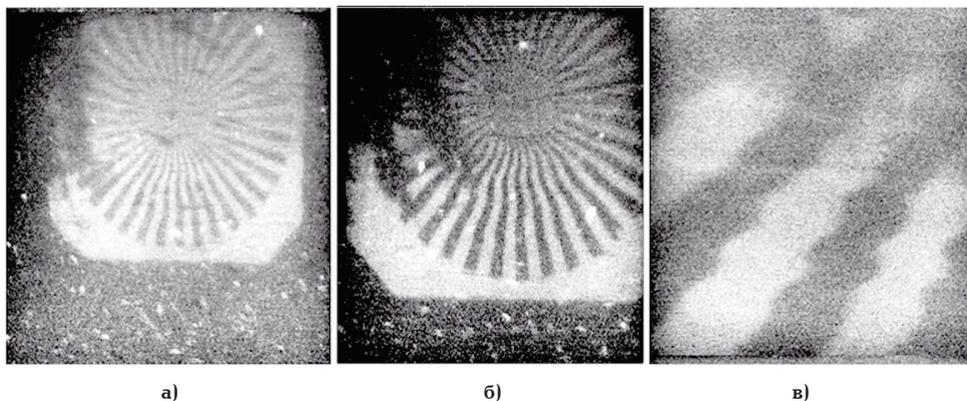


Рис. 2. Фото объекта, наблюдаемого ЛСПВ на дальности $D=8$ м, $f=83,3$ кГц при разных углах обзора: а) $\varphi=12^\circ$, б) $\varphi=7^\circ$, в) $\varphi=1,6^\circ$

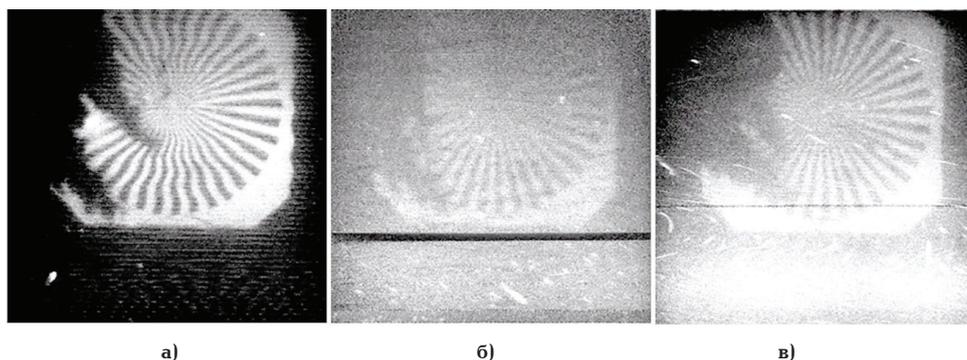


Рис. 3. Фото объекта, наблюдаемого ЛСПВ на дальности $D=8$ м, $\varphi=12^\circ$ при разных частотах излучения лазера: а) $f=62,5$ кГц, б) $f=40$ кГц, в) $f=20$ кГц

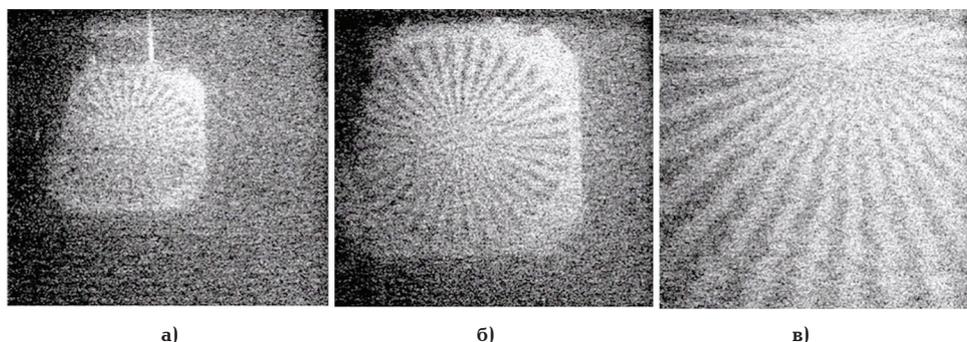


Рис. 4 Фото объекта, наблюдаемого ЛСПВ на дальности $D=12$ м при $f=83,3$ кГц при разных углах обзора: а) $\varphi=12^\circ$, б) $\varphi=7^\circ$, в) $\varphi=1,6^\circ$

При излучении импульсов подсветки выходным объективом оптической системы, в качестве которого применялся трансфокатор, дистанционно изменялся угол сканирования (размер угла обзора φ). Оперативное управление размером угла обзора осуществлялось дистанционно с пульта оператора.

С учетом сказанного на рис. 2 изображены фото сюжетов, наблюдаемых с помощью ЛСПВ на дальности, равной 8 м, что составляет $1 \cdot Z_0$. Частота следования импульсов постоянна.

С левой стороны снимков наблюдаются водоросли с борта рядом стоящего судна.

На рис. 3 представлены данные о влиянии частоты излучения импульсов на качество изображения при наблюдении одного и того же объекта с постоянным углом обзора φ . Видно, что чем выше частота следования импульсов f , тем лучше изображение.

Кроме того, необходимо отметить, что возможности телевизионных систем подводного видения ограничены дистанцией, равной величине $0,7 \cdot Z_0$. Судя по полученным результатам испытаний, предельная дистанция, в пределах которой возможно получение сюжетов хорошего качества с помощью ЛСПВ, равна $1,25 \cdot Z_0$. Подтверждением сказанному являются фото, приведенные на рис. 4.

С увеличением дальности до объекта наблюдением на качество изображения более заметно сказывается изменение частоты следования импульсов f . Это хорошо отображено на рис. 5 сравнением двух фото диска, наблюдаемого на фоне металлической лестницы. При дальнейшем увеличении дальности до 13,5 м не удастся улучшить изображение наблюдаемого объекта даже за счет уменьшения угла обзора φ . Сказанное можно наблюдать на рис. 6.

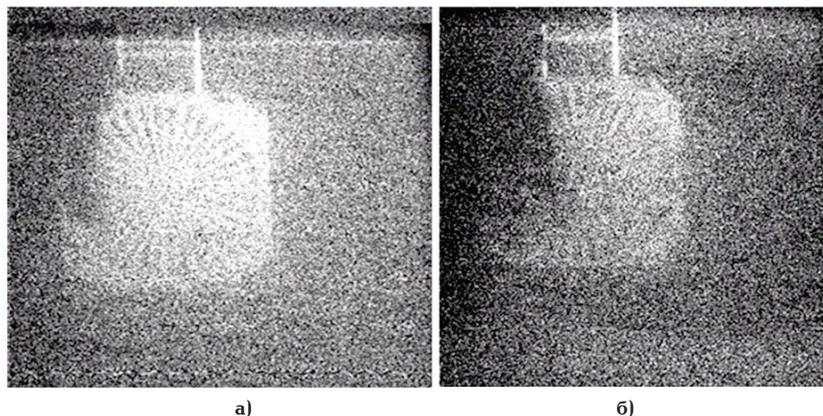


Рис. 5 Фото объекта, наблюдаемого ЛСПВ на дальности $D=12$ м и $\varphi=12^\circ$ при разных частотах излучения лазера: а) $f=77$ кГц, б) $f=67$ кГц

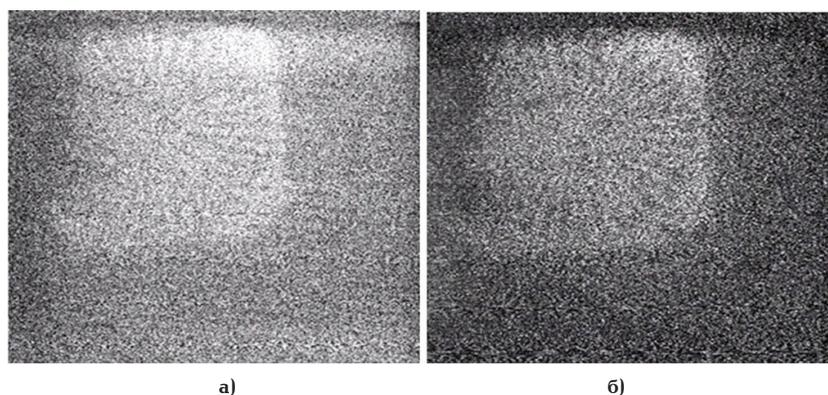


Рис. 6. Фото объекта, наблюдаемого ЛСПВ на дальности $D=13,5$ м и $\varphi=7^\circ$ при разных частотах излучения лазера: а) $f=77$ кГц, б) $f=59$ кГц

Дальнейшее, даже незначительное, увеличение дальности до 14 м приводит к еще большему поражению полезного сигнала.

В результате анализа полученных фото установлено, что:

1. На дальности, равной $D = 1,25 \cdot Z_{\sigma}$, ЛСПВ позволяет однозначно идентифицировать объекты с приемлемым контрастом и четкостью. При этом частота лазерных импульсов должна быть $f > 60$ кГц.

2. На дальности, равной $D = 1,25 \cdot Z_{\sigma}$, изображение объекта можно идентифицировать на общем фоне, сам объект отображается менее детально. Следует отметить, что частота импульсов должна быть $f > 80$ кГц, а углы обзора $\varphi < 7^\circ$.

3. На дальности, равной $D = 1,7 \cdot Z_{\sigma}$, отмечается сильное поражение полезного сигнала, хотя само присутствие объекта можно зафиксировать, но однозначная идентификация затруднена.

«Таким образом, результаты эксперимента, проведенного в естественных условиях, показали, что дальность видимости ЛСПВ составляет около $1,5 \cdot Z_{\sigma}$. Необходимо отметить, что эксперимент проводился возле берега, на мелководье, где прозрачность воды низка.

Практика показывает, что водная среда в полигонах, удаленных от мест дислокации кораблей и судов, характеризуется меньшим показателем ослабления, и эффективность средств технического зрения там выше. Отсюда следует, что наклонная дальность ЛСПВ в Баренцевом море при $Z_{\sigma} = 20$ м в среднем составит не менее 30 м» [5].

Вывод. Исследование результатов испытаний лазерной телевизионной системы подтверждает соответствие результатов научных исследований и натурных экспериментов.

Результаты эксперимента подтверждают выводы научных исследований [2, 5–9] о применении свойства направленности лазерного пучка и его малой расходимости для формирования беспроводного оптического канала связи, ранее не апробированного в РФ.

Его практическая реализация значительно повышает поисковые возможности подводных аппаратов, обеспечивая передачу видеосюжетов под водой между подводными техническими средствами на дальности 60...160 м в зависимости от прозрачности воды [5].

Библиографический список

1. Мартынов В. Л. Методология создания поисковых систем для исследования арктического шельфа // Морская радиоэлектроника. 2016. № 1 (55). С. 36–39.
2. Карасик В. Е., Орлов В. М. Лазерные системы видения. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 352 с. ISBN 978-0-521-53676-9.
3. Отчет по результатам испытаний макета лазерной телевизионной системы / ФГУП «НИИТелевидения». СПб., 2000. 55 с.
4. Лочия Баренцева моря. Ч. 2. От реки Воряема до пролива Карские Ворота и западные берега островов Новая Земля. СПб.: Изд-во УНиО, 1995. 462 с.

5. Мартынов В. Л., Божук Н. М., Голосной А. С. Картографирование донной поверхности с использованием лазерных технологий // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2-2 (44). С. 69–73.

6. Törnblom N. Underwater 3D Surface Scanning Using Structured Light. Uppsala, Sweden, 2010. 54 p.

7. Bruno F., Bianco G., Muzzupappa M. [et al.]. Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2011. Vol. 66 (4). P. 508–518. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.02.009.

8. Guo Y. 3D underwater topography rebuilding based on single beam sonar // 2013 IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC 2013). KunMing. 2013. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICSPCC.2013.6664031.

9. Andono P. N., Yuniarno E. M., Hariadi M. [et al.]. 3D reconstruction of under water coral reef images using low cost multi-view cameras // Proceedings of 2012 International

Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS 2012). 2012. P. 803–808. DOI: 10.1109/ICMCS.2012.6320131.

ГОЛОСНОЙ Алексей Сергеевич, ведущий инженер.
SPIN-код: 7756-6560
AuthorID (РИНЦ): 797054
Адрес для переписки: golosnoy2@yandex.ru

Для цитирования

Голосной А. С. Экспериментальное определение предельной дальности видения подводной лазерной системы // Омский научный вестник. 2020. № 3 (171). С. 115–120. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-115-120.

Статья поступила в редакцию 17.02.2020 г.
© А. С. Голосной