

Раздел IV. Техническое зрение

УДК 551.46.0

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-241-256

Ю.К.Грузевич, Ю.Н. Гордиенко, П.С. Альков, Д.В. Волков, М.С. Ходаковская
БОРТОВАЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ
ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА «ВОЗДУХ-ВОДА»

Целью данной работы является создание системы обнаружения подводных объектов, предназначенная для установки на надводные платформы (летательные аппараты или дистанционно пилотируемые летательные аппараты). Системы такого типа могут применяться для решения широкого спектра задач в различных областях народного хозяйства: поиск редких рыб и морских млекопитающих, определение путей их миграции, диагностика и прокладка подводных трубопроводов и сетей волоконных кабелей, контроль загрязнения толщи морских вод, поиск затонувших кораблей и археологических ценностей, проведение спасательных работ. Для решения данной задачи был описан процесс распространения лазерного излучения до объекта через границу раздела «воздух-вода», смоделирована взволнованная морская поверхность, предложен ряд математических допущений и приближений. В практической части была разработана структурная схема лазерной оптико-телевизионной активно-импульсной системы подводного видения, включающая в себя приемный и передающий каналы, а также устройство управления, состоящее из блока обработки изображений и контроллера управления. В состав приемного канала вошел электронно-оптический преобразователь III+ поколения, высокочувствительный в спектральном диапазоне прозрачности морской воды. Основным элементом передающего канала является высокоэффективный импульсный лазер, излучающий в спектральном диапазоне прозрачности морской воды. Собранный прибор прошел полевые испытания, в результате которых стало понятно, что обнаружение и распознавание подводных целей с борта летательного аппарата через границу раздела «воздух-вода» по сформированному изображению возможно, предельная дальность обнаружения и распознавание подводных целей активно-импульсной системы подводного видения с борта летательного аппарата через границу раздела «воздух-вода» в основном определяется затуханием оптического излучения в морской воде и мощностью подсвечивающего лазерного импульсного излучения. При этом, отличительной особенностью работы активно-импульсной системы подводного видения является то, что увеличение дальности обнаружения и распознавания практически прямо пропорционально до определенного уровня мощности лазерного излучения, а дальнейшее увеличение мощности приводит к незначительному увеличению дальности.

Активно-импульсная система подводного видения; электронно-оптический преобразователь; модель; импульсный лазер.

Yu.K., Gruzevich, Yu.N. Gordienko, P.S. Alkov, D.V. Volkov, M.S. Khodakovskaya
ONBOARD ACTIVE-PULSE UNDERWATER VISION SYSTEM THROUGH
THE AIR-WATER BOUNDARY

The objective of this work is to create a system for detecting underwater objects intended for installation on surface platforms (aircraft or remotely piloted aircraft). Systems of this type can be used to solve a wide range of problems in various areas of the national economy: searching for rare fish and marine mammals, determining their migration routes, diagnostics and laying underwater pipelines and fiber optic cable networks, monitoring seawater pollution, searching for sunken ships and archaeological treasures, and carrying out rescue operations. To solve this problem, the process of laser radiation propagation to an object across the air-water interface was described, a rough sea surface was modeled, and a number of mathematical assumptions and approximations were proposed. In the practical part, a structural diagram of a laser optical-television active-pulse underwater vision system was developed, including receiving and transmitting channels, as well as a control device consisting of an image processing unit and a control

controller. The receiving channel includes an electron-optical converter of the III+ generation, highly sensitive in the spectral range of sea water transparency. The main element of the transmitting channel is a highly efficient pulse laser emitting in the spectral range of sea water transparency. The assembled device has undergone field tests, as a result of which it became clear that detection and recognition of underwater targets from an aircraft through the air-water interface using the generated image is possible, the maximum detection range and recognition of underwater targets of the active-pulse underwater vision system from an aircraft through the air-water interface is mainly determined by: attenuation of optical radiation in sea water and the power of the illuminating laser pulse radiation. At the same time, a distinctive feature of the active-pulse underwater vision system is that the increase in the detection and recognition range is almost directly proportional to a certain level of laser radiation power, and a further increase in power leads to an insignificant increase in range.

Active-pulse underwater vision system; image intensifier tube; model; pulse laser.

Введение. В последнее время все большее значение приобретает получение информации о подводных объектах не только с целью определения их положения и местонахождения, но и для их распознавания и идентификации за счет формирования изображения этих объектов. Одним из перспективных направлений получения изображения подводных объектов является применение лазерных оптико-телевизионных активно-импульсных систем подводного видения (АИС ПВ) для наблюдения за косяками рыб, поиска затонувших объектов, измерения профиля морского дна и других применений. АИС ПВ могут располагаться на борту летательных аппаратов (ЛА), например, вертолете или дистанционно пилотируемом летательном аппарате (ДПЛА) [1–8]. При этом, время поиска подводных объектов с высоты пилотирования ЛА значительно сокращается за счет увеличения площади охватываемого района поиска. В связи с этим, возникает задача оценки дальности обнаружения и распознавания подводных объектов, а также оценки качества их изображения, регистрируемого АИС ПВ через взволнованную границу раздела «воздух-вода».

Принцип действия подводного видения. Подводное видение основано на возможности наблюдения в узком спектральном диапазоне прозрачности морской воды от 450 нм до 550 нм (рис. 1 [9]) при освещении наблюдаемого пространства короткими импульсами оптического излучения с длительностью меньшей, чем время распространения импульсов до объектов наблюдения, и синхронизированном приеме и многократном усилении отраженных от подводных объектов наблюдения оптических сигналов. Такой метод наблюдения получил название активно-импульсный. Он обеспечивает формирование изображений в ограниченном по глубине окружающего подводного пространства и резко уменьшает зависимость наблюдения от условий освещенности объектов наблюдения и от окружающих их фонов, а также естественных оптических помех – это сама рассеивающая морская вода и др. Применение активно-импульсного метода формирования подводных видеоизображений позволяет устранить «паразитное» влияние помехи обратного рассеяния оптического излучения, которые накладываются на полезное изображение наблюдаемых подводных объектов, снижая их контраст.

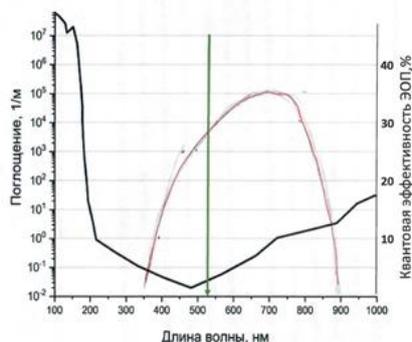


Рис. 1. Спектральная характеристика пропускания морской воды, чувствительности ЭОП III поколения с «голубым» фотокатодом и излучения Nd:YAG лазера

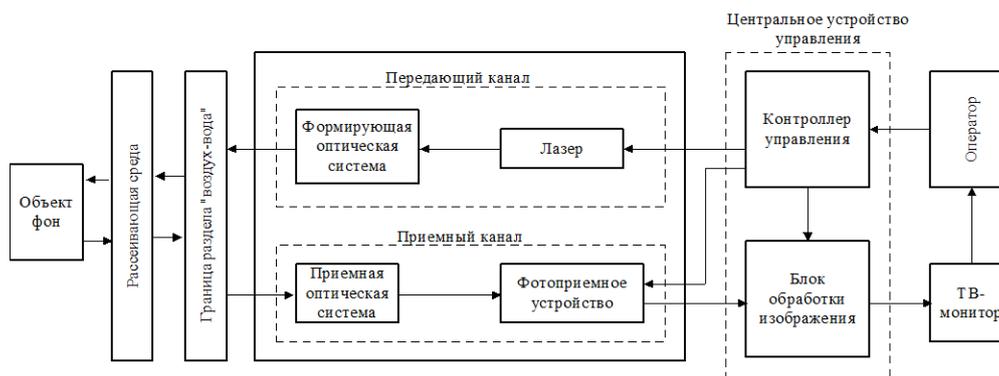


Рис. 2. Структурная схема лазерной оптико-телевизионной активно-импульсной системы подводного видения

На рис. 2 представлена обобщенная структурная схема лазерной оптико-телевизионной активно-импульсной системы подводного видения (АИС ПВ). Передающий канал формирует зондирующее импульсное лазерное излучение. Основными его элементами являются лазер подсвета, излучающий в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, и формирующая оптическая система для изменения угловой расходимости лазерного излучения. Зондирующее излучение проходит через границу раздела «воздух-вода», рассеивающую среду и подсвечивает подводный объект. Отраженное лазерное излучение после обратного прохождения через морскую воду и границу раздела «вода - воздух» регистрируется приемным каналом, содержащим приемную оптическую систему и фотоприемное устройство на основе чувствительной структуры «Электронно-оптический преобразователь (ЭОП) III поколения с фотокатодом, чувствительным в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, – цифровая ТВ камера». Центральное устройство управления содержит блок обработки изображения и контроллер управления. Блок обработки изображения предназначен для усиления и обработки сигнала с фотоприемного устройства и формирования видеосигнала, поступающего на вход ТВ монитора. Контроллер управления осуществляет формирование синхронизирующих и управляющих импульсов, индикацию режимов работы АИС ПВ, выполнение команд оператора.

Важнейшим ключевым элементом, используемым для создания высокоэффективных АИС ПВ, является быстродействующий, специально разработанный специалистами ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», ЭОП III+ поколения с высокой квантовой эффективностью в спектральной области прозрачности морской воды, который получил название: ЭОП III+ поколения с «голубым» фотокатодом. Спектральная характеристика фоточувствительности ЭОП III+ поколения с «голубым» фотокатодом приведена на рис. 1 [9].

Активно-импульсный метод формирования подводных изображений тесно связан с развитием средств лазерной импульсной подсветки, и, прежде всего, с созданием высокоэффективных импульсных лазеров, излучающих в спектральном диапазоне прозрачности морской воды. Разработка современных высокоэффективных импульсных лазеров, рабочим телом которого является кристалл Nd:YAG, накачка рабочего тела которого осуществляется диодными светоизлучающими линейками, а модуляция добротности производится электрооптическим затвором. Удвоение частоты генерации (на длине волны 532 нм) осуществляется элементом на основе кристалла КТР, что обеспечивает излучение в спектральном диапазоне прозрачности морской воды (рис. 1 [9]). Разработанные Nd:YAG лазеры обеспечивают при энергии в импульсе от несколько сотен мДж до десятков мДж длительность импульса (по уровню 0,5) от единиц до десятков наносекунд.

Наблюдение подводных объектов через взволнованную границу раздела «воздух-вода». Для обеспечения обнаружения и распознавания подводных объектов через взволнованную границу раздела «воздух-вода» на фоне рассеивающей морской воды или морского дна в условиях сильно рассеивающей водной среды и при отсутствии подведе-

чивающего солнечного излучения АИС ПВ может устанавливаться на борту летательного аппарата (ЛА), например, вертолета или ДПЛА. Рассмотрим принцип действия двух вариантов наблюдения подводных объектов с борта ЛА в АИС ПВ:

- ◆ с непрерывно визирующим пространство объектов (рис. 3);
- ◆ с параллельным сканированием подсвечивающим лазерным излучением и восстановлением изображения (рис. 4).

В обоих вариантах АИС ПВ для подсветки используются импульсный лазерный источник «И», который освещает подводный объект на окружающем фоне, а отраженное объектом лазерное излучение регистрируется приемным каналом АИС ПВ («ПР») на основе ФПМ чувствительной структурой «ЭОП III⁺ поколения – цифровая КМОП - матрица».

В обоих вариантах АИС ПВ находится на борту ЛА на высоте $H_{ЛА}$ над поверхностью моря, а диаграммы направленности импульсного лазерного источника и приемного канала на базе ФПМ ориентированы по нормали к морской поверхности.

В варианте исполнения АИС ПВ, приведенном на рис. 3, диаграммы направленности источника излучения в пределах телесного угла $\Omega_{и} = \pi \cdot \alpha_{и}$ (где $\alpha_{и}$ – угол при вершине конического сечения телесного угла $\Omega_{и}$) и приемного канала в пределах телесного угла $\Omega_{пр} = \pi \cdot \alpha_{пр}$ (где $\alpha_{пр}$ – угол при вершине конического сечения телесного угла $\Omega_{пр}$) практически совпадают ($\Omega_{и} \approx \Omega_{пр}$).

В варианте исполнения АИС ПВ, приведенном на рис. 4, лазерная подсветка пространства объектов наблюдения происходит путем сканирования лазерным излучением в пределах угла $\alpha_{и} \approx \alpha_{пр}$ с диаграммой направленности источника излучения в пределах телесного угла $\delta\Omega_{и}$ ($\delta\Omega_{и} \ll \Omega_{пр}$) в направлении по нормали к вектору скорости ЛА. При таком исполнении у АИС ПВ будет более высокая эффективность подсветки пространства наблюдения и, следовательно, система будет обладать большей дальностью видения подводных объектов $Z_{об}$.

При наблюдении подводных объектов через взволнованную границу раздела «воздух-вода» с помощью АИС ПВ, установленной на борту ЛА, процессы рассеяния и селективного поглощения оптического излучения в морской воде заметно влияют на качество изображения даже при сравнительно небольших расстояниях между подводными объектами и системой наблюдения [10–13].

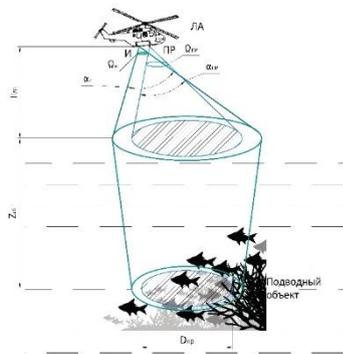


Рис. 3. Наблюдение подводных объектов с борта ЛА в АИС ПВ непрерывно визирующих пространство объектов

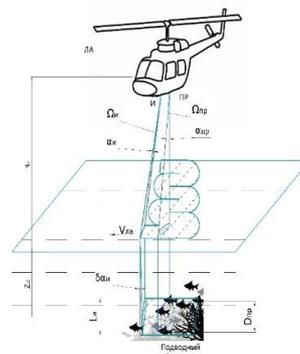


Рис. 4. Наблюдение подводных объектов с борта ЛА в АИС ПВ с параллельным сканированием подсвечивающим лазерным излучением и восстановлением изображения

Это влияние проявляется в ослаблении яркости и снижении контрастности изображения, искажении его пространственной структуры, утрате информации о цвете объекта, относительном увеличении шумовой составляющей изображения и, в конечном итоге, ограничении дальности видимости в основном, в результате воздействия двух основных факторов:

- ◆ многократного рассеяния оптического излучения в морской воде, которое приводит к размытию изображения подводных объектов;
- ◆ флуктуации в распределении подводной освещенности, вызванные случайным характером преломления излучения на взволнованной поверхности.

Понижение качества изображения можно объяснить тем, что перестают разрешаться высокие пространственные частоты, и, чем выше скорость ветра, тем ниже максимальная разрешаемая пространственная частота. В прозрачной воде и в отсутствие волнения максимальная разрешаемая пространственная частота ограничивается только разрешающей способностью АИС ПВ. При наличии ветра качество изображения ухудшается, возникают искажения топологии изображения, т.е. уменьшается максимальная разрешаемая частота.

Повысить качество изображения можно путем его статистического усреднения по ансамблю реализаций за время наблюдения, при этом происходит восстановление его топологии и повышается максимальная разрешаемая частота. При бесконечно большом времени усреднения максимальная разрешаемая частота стремится к граничной частоте и изображение становится подобным объекту. В этом случае для определения предельной дальности видения можно использовать подход, основанный на использовании понятия минимального разрешаемого контраста (МРК) [14, 15].

В теоретическом плане задача расчета статистических характеристик сигнала, проходящего через взволнованную морскую поверхность, достаточно сложна, так как требует одновременного учета двух конкурирующих механизмов: случайного характера преломления световых лучей на взволнованной поверхности, приводящего к появлению флуктуаций оптического сигнала, и многократного рассеяния подсвечивающего лазерного излучения в морской воде, подавляющего флуктуации в морской среде.

В связи с этим принимается ряд приближений и положений, упрощающих задачу:

- ◆ флуктуации мощности сигнала определяются только уклонами волн и не зависят от их высот (приближение случайного фазового экрана);
- ◆ эффекты многократного рассеяния света в морской воде оказывают на процесс формирования подводного светового поля более сильное влияние, чем механизм случайного разброса световых лучей при пересечении взволнованной морской поверхности (линейное по уклонам приближение);
- ◆ время распространения одного зондирующего импульса от границы раздела до наблюдаемого объекта и обратно, а также инерционность приемной системы намного меньше характерного времени изменения формы поверхности, поэтому ее можно считать «замороженной» в течение времени одного наблюдения.

В настоящее время значительное число теоретических работ посвящено исследованию влияния поверхностного волнения и толщи воды на качество изображения подводного объекта, наблюдаемого из атмосферы. При этом были получены аналитические соотношения между статистически средними характеристиками изображения и условиями наблюдения. При таком подходе можно оценить искажения, которые вносят в статистически среднее изображение процессы многократного рассеяния и поглощения излучения в водной среде и случайного преломления на взволнованной границе [16–18].

Однако при современном развитии элементной базы для АИС ПВ (быстродействующих высокоэффективных фотоприемных устройств и импульсных лазеров), используемой на практике при формировании изображений подводных объектов в натуральных условиях, невозможно, а в ряде случаев и не целесообразно добиваться полного усреднения изображения, т.к. длительность регистрации изображения подводного объекта с применением АИС ПВ, как правило, крайне мала и составляет от единиц до десятков наносекунд. Вследствие этого обычно приходится идти по пути упрощения или идеализации модели волнения на поверхности раздела, считая границу раздела «воздух-вода» гладкой и характеристики сигнала, регистрируемого быстродействующей АИС ПВ, считать детерминированными величинами, которые можно считать средними значениями флуктуаций при наблюдении в реальных условиях через взволнованную границу, усредняя по ансамблю реализаций величины получаемого сигнала [19].

Для оценки потенциальных возможностей АИС ПВ, работающей с борта ЛА в рассеивающей морской воде для обнаружения подводных объектов, использовалось допущение, при котором формирование изображения осуществляется через гладкую границу раздела «воздух-вода». Предложенное допущение позволяет оценить только предельную дальность обнаружения подводных объектов в условиях недостаточной естественной освещенности или ночью в условиях естественных и организованных оптических помех и не может быть применима при решении задач высокоточного их распознавания и идентификации.

При создании бортовых АИС ПВ принципиально важной проблемой является обеспечение воспроизводимого изображения, которое определяется субъективным впечатлением. Это воспринимаемая метрика, зависящая не только от оптимального функционирования системы «глаз – мозг», но и от входных параметров других сенсорных систем, эмоций, обученности и др. Воспринимаемое качество одного и того же изображения существенно разнится между наблюдателями, а также отличается по времени для одного наблюдателя. Поэтому качество изображения, сформированной АИС ПВ, установленной на борту ЛА, не может оцениваться в абсолютных величинах, а визуальные психофизиологические исследования не позволяют количественно измерить все показатели изображающих систем. Существует множество алгоритмов для оценки качества изображения, каждая из которых получена для конкретных условий наблюдения эмпирическим путем. Все они в той или иной мере используют две основные характеристики – пространственную и энергетическую разрешающую способность.

Для оценки возможности обнаружения с вероятностью ($P_{\text{обн}}=0.9$) и распознавания с вероятностью ($P_{\text{расп}}=0.8$) подводных объектов с критическим размером 2.5 м и 12.5 м в морской воде с прозрачностью по белому диску $Z_6 = 10$ м и $Z_6 = 20$ м с применением АИС ПВ с борта ЛА с высоты 50 м через границу раздела «воздух-вода» в качестве примера были рассмотрены следующие параметры макетного образца АИС ПВ:

- ◆ канал подсветки на основе импульсных лазеров, излучающих на длине волны 527 нм, НФЛ-Н100-2И с энергией в импульсе 50 мДж и НФЛ-Н40СТ с энергией в импульсе 200 мДж;
- ◆ приемный канал на основе ФПМ типа «ФПМ-5-1» с чувствительной структурой «ЭОП III⁺ поколения типа «ЭПМ 62Г» – цифровая КМОП-матрица типа «IMX 174», разработанный ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ».

Алгоритм расчета дальности обнаружения и распознавания подводного объекта по его изображению, сформированному АИС ПВ, установленный на борту ЛА, через границу раздела «воздух-вода», приведен в [3]. В соответствии с данным алгоритмом на первом этапе расчета, в соответствии со структурной схемой АИС ПВ, приведенной на рис. 2, определяется ее модуль передаточной функции (МПФ). При этом АИС ПВ представляется в виде составной (многоступенной) линейной изображающей системы, что позволит определить МПФ всей системы (системную МПФ) в виде произведения МПФ отдельных ее подсистем:

$$\hat{H}_{\text{АИС}}(\nu) = \hat{H}_{\text{ос}}(\nu)\hat{H}_{\text{ЭОП}}(\nu)\hat{H}_{\text{ро}}(\nu)\hat{H}_{\text{КМОП}}(\nu)\hat{H}_{\text{эл}}(\nu)\hat{H}_{\text{мон}}(\nu)\hat{H}_{\text{эл}}(\nu), \quad (1)$$

где $\hat{H}_{\text{ос}}(\nu)$ – ОПФ приемной оптической системы; $\hat{H}_{\text{ЭОП}}(\nu)$ – МПФ ЭОП III⁺ поколения; $\hat{H}_{\text{ро}}(\nu)$ – ОПФ репродукционного объектива; $\hat{H}_{\text{КМОП}}(\nu)$ – МПФ матричного приемника оптического излучения (КМОП – матрицы); $\hat{H}_{\text{эл}}(\nu)$ – МПФ электронного тракта; $\hat{H}_{\text{мон}}(\nu)$ – МПФ монитора (дисплея); $\hat{H}_{\text{эл}}(\nu)$ – зрительного анализатора.

Системная МПФ активно-импульсной системы регистрации и отображения видеоизображений характеризует качество изображения, воспроизводимого на экране монитора, и оператор оценивает качество этого изображения.

Результирующая МПФ образца АИС ПВ, полученная перемножением МПФ всех составляющих звеньев системы по формуле (1). На рис. 5 приведен график результирующей МПФ образца АИС ПВ.

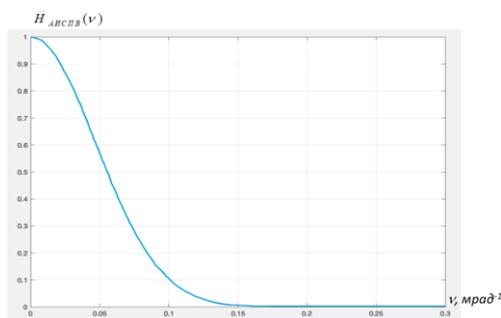


Рис. 5. Результирующая МПФ образца АИС ПВ

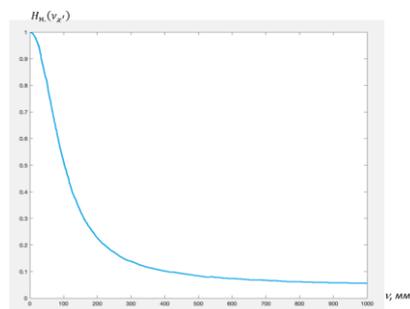


Рис. 6. Результирующая МПФ слоя рассеивающей морской воды

На следующем этапе расчета определяются гидрооптические характеристики и МПФ морской воды. В соответствии с заданным значением прозрачности морской воды по белому диску Z_0 находим вероятность выживания фотона Λ , показатель ослабления ε , показатель рассеяния σ и показатель поглощения k_n , а затем по полученным значениям (Λ , ε , σ и k_n) находим коэффициент асимметрии k_{ac} индикатрисы рассеяния $x(\gamma)$ и рассчитаем интегральный параметр индикатрисы рассеяния μ , значение индикатрисы рассеяния в направлении обратного рассеяния x_π и величину φ_0 . [3]. Значения гидрооптических характеристик морской среды для значения $Z_0 = 20$ м и $Z_0 = 10$ м приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения гидрооптических характеристик морской среды

$Z_0, \text{м}$	Λ	$\varepsilon, \text{м}^{-1}$	$\sigma, \text{м}^{-1}$	$k_n, \text{м}^{-1}$	φ_0	μ	x_π
20	0,80	0,29	0,23	0,06	0,0112	0,071	0,0713
10	0,85	0,63	0,53	0,10	0,0119	0,068	0,0683

МПФ слоя рассеивающей и турбулентной морской среды определяются по формулам, которые для угловых пространственных частот можно записать в виде:

$$H_{\text{м.р.}}(\nu') = \exp \left[-\Lambda \varepsilon z + \frac{\Lambda \varepsilon z}{\sqrt{(2\pi \mu \nu')^2 + 1}} \right] = \exp \left(-3.346 + \frac{3.346}{\sqrt{(0.0075 \nu')^2 + 1}} \right)$$

$$H_{\text{м.т.}}(\nu') = \exp \left[-\frac{(\lambda \nu' k_n)^2 \langle \Delta n^2 \rangle z}{3a} \right].$$

Для расчетов принимаем следующие значения: $\langle \Delta n^2 \rangle = 10^{-9}$; $n = 1,34$; $a = 0,5$.
Результирующая МПФ слоя морской воды:

$$H_{\text{м}}(\nu') = H_{\text{м.р.}}(\nu') = H_{\text{м.т.}}(\nu').$$

Результирующая МПФ слоя рассеивающей морской воды $H_{\text{м}}(\nu')$ приведена на рис. 6.

Далее необходимо определить энергетические характеристики сигнальных и фоновых составляющих регистрируемого излучения, т.к. при работе АИС ПВ под водой необходимо осуществить стробирование по дальности из-за интенсивного обратного рассеяния излучения подсвета в морской воде, обеспечивая при этом длительность строба равной длительности зондирующего импульса, а другой особенностью энергетического расчета является наличие в фотоприемном устройстве ЭОП III+ поколения типа ЭПМ-62Г, осуществляющего многократное усиление яркости. Паспортные характеристики ЭОП III+ поколения типа ЭПМ-62Г приведены в табл. 2

Таблица 2

Паспортные характеристики ЭОП Ш+ поколения типа ЭПМ-62Г

Характеристика	Обозначение	Численное значение
Спектральная чувствительность фотокатода	$S_{фк}^p$	$30 \frac{мА}{Вт}$
Интегральная чувствительность фотокатода	$S_{фк}^п$	$1200 \frac{мкА}{лм}$
Электронно-оптическое увеличение	Γ	1
Световая отдача люминофора	γ	$30 \frac{лм}{Вт}$
Коэффициент усиления яркости	η	$3 \cdot 10^4$

Для определения энергетических характеристик необходимо определить число фотоэлектронов, генерируемых в одном пикселе регистрируемым излучением, от объекта, фона и помех обратного рассеяния по формулам, приведенным в табл. 3. В табл. 3 также приведены формулы для вычисления чисел фотоэлектронов, формируемых в результате солнечной засветки.

Графически зависимости $n(z)$, характеризующие работу подводной АИС ПВ в режиме стробирования по дальности, представлены на рис. 7–10.

Таблица 3

Выражения для расчета чисел фотоэлектронов

№	Число фотоэлектронов	Расчетная формула
1	$n_{об.л}$	$\frac{P_0 t_{им} S_{фпу} K_{опт} \rho_{об} \alpha_n^2 r_n^2 \exp[-2\epsilon z(1-\Lambda)] q_2}{4\mu^2 \Lambda \epsilon z^3 + (\alpha_n^2 + \alpha_n^2) z^2}$
2	$n_{ф.л}$	$\frac{P_0 t_{им} S_{фпу} K_{опт} \rho_{ф} \alpha_n^2 r_n^2 \exp[-2\epsilon z(1-\Lambda)] q_2}{4\mu^2 \Lambda \epsilon z^3 + (\alpha_n^2 + \alpha_n^2) z^2}$
3	$n_{ПОР.л}^{ст}$	$\left(\frac{\sigma x_{п} c t_{им}}{8n}\right) \frac{P_0 t_{им} S_{фпу} K_{опт} \alpha_n^2 r_n^2 \exp[-2\epsilon z(1-\Lambda)]}{4\mu^2 \Lambda \epsilon z^3 + (\alpha_n^2 + \alpha_n^2) z^2}$
4	$n_{об.с}^{ст}$	$\frac{E_{мд}}{\pi} t_{им} S_{фпу} \rho_{об} \pi \alpha_n^2 \pi r_n^2 \Delta \lambda_{ф} \exp(-k_{п} z) q_4$
5	$n_{ф.с}^{ст}$	$\frac{E_{мд}}{\pi} t_{им} S_{фпу} \rho_{ф} \pi \alpha_n^2 \pi r_n^2 \Delta \lambda_{ф} \exp(-k_{п} z)$
6	$n_{ПОР.с}^{ст}$	$\frac{E(z_1)}{\pi} t_{им} S_{фпу} \frac{\varphi_0 \Lambda}{4\gamma} \pi \alpha_n^2 \pi r_n^2 (1 - \exp(-2\gamma \epsilon z))$

Графически зависимости $n(z)$, характеризующие работу подводной АИС ПВ в режиме стробирования по дальности, представлены на рис. 7–10.

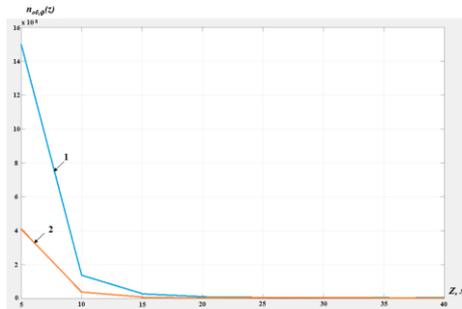


Рис. 7. Зависимость количества фотоэлектронов, генерируемых в одном пикселе излучением от объекта $n_{об}$ (кривая 1) и от фона $n_{ф}$ (кривая 2)

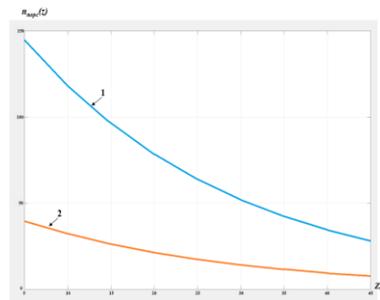


Рис. 8. Зависимость количества фотоэлектронов, генерируемых в одном пикселе помехой обратного рассеяния от объекта $n_{ПОР об}$ (кривая 1) и от фона $n_{ПОР ф}$ (кривая 2)

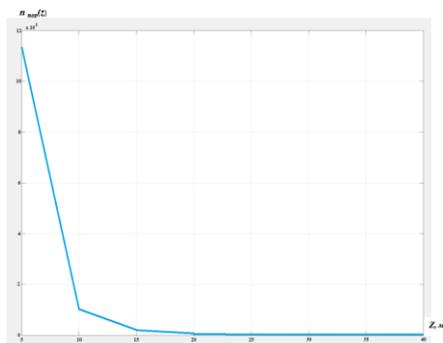


Рис. 9. Зависимость количества фотоэлектронов помехи обратного рассеяния от дальности

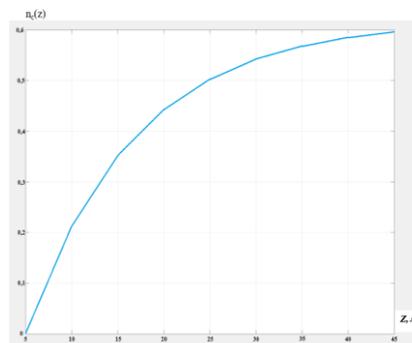


Рис. 10. Зависимость количества фотоэлектронов солнечной помехи обратного рассеяния от дальности

По графику зависимости прозрачности по белому диску от вероятности выживания фотона (рис. 11) находим вероятность выживания фотона.

По произведению показателя ослабления и Z_0 , находим показатель ослабления. Зная показатель ослабления ε и вероятность выживания фотонов Λ , находим по формуле показатель рассеяния σ :

$$\sigma = \varepsilon \cdot \Lambda.$$

Далее, используя график связи между коэффициентом асимметрии индикатрисы и показателем рассеяния, находим коэффициент асимметрии k_{ac} (рис. 12).

Значения среднего косинуса индикатрисы рассеяния, дисперсию малоугловой части индикатрисы рассеяния и долю света, рассеянную в заднюю полусферу, определим по формулам: $\overline{\cos(\theta)} = 1 - 2,9/(1 + k_{ac})$; $\overline{\theta_{45}^2} = 0.285 - 0.264 \overline{\cos(\theta)}$; $\overline{q_{45}^2} = 0.880 - 0.885 \overline{\cos(\theta)}$.

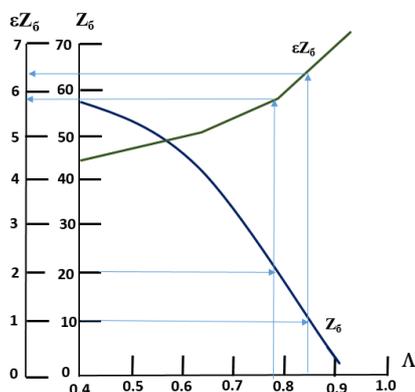


Рис. 11. Зависимость прозрачности по белому диску от вероятности выживания фотона

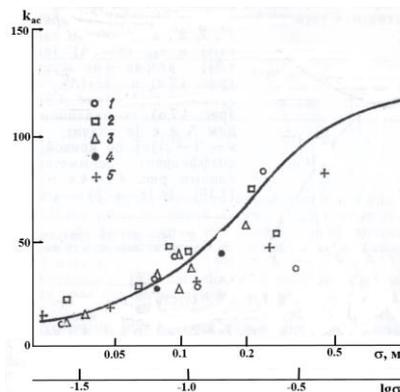


Рис. 12. Связь между коэффициентом асимметрии индикатрисы и показателем рассеяния

Полученные таким образом гидрооптические характеристики используются для оценочных расчетов дальности действия АИС ПВ при работе с борта ЛА по обнаружению подводных целей через границу «воздух-вода». Результаты, полученные в ходе расчетов, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчетов гидрооптических характеристик

	Показатель ослабления, $\varepsilon, \text{м}^{-1}$	Показатель рассеяния, $\sigma \text{ м}^{-1}$	Вероятность выживания фотонов, Λ	Коэффициент асимметрии, k_{ac}	Значение параметра индикатрисы рассеяния
$Z_6 = 4 \text{ м}$	1,625	1,45	0,89	120	0,0678
$Z_6 = 8 \text{ м}$	0,78	0,69	0,87	НО	0,0671
$Z_6 = 10 \text{ м}$	0,63	0,53	0,85	107	0,0683
$Z_6 = 20 \text{ м}$	0,29	0,23	0,80	80	0,0713
$Z_6 = 40 \text{ м}$	0,11	0,07	0,66	30	0,0873

Как показали расчеты, из-за сильного ослабления света в морской воде АИС ПВ имеют небольшие дальности действия – менее 100 м даже в чистой воде. В воде довольно быстро наступает световой режим, при котором в отраженном сигнале преобладает составляющая, обусловленная рассеянным светом.

Использование полученных результатов расчета гидрооптических характеристик морской воды обеспечивает определение предельной дальности обнаружения подводных объектов АИС ПВ через границу раздела «воздух-вода».

На первом этапе определяется зависимость минимального разрешаемого контраста от угловой пространственной частоты $K_{min \text{ воспр.}} = f_1(v'_x)$. На втором этапе определяется зависимость наблюдаемого контраста от угловой пространственной частоты $K_{изобр} = f_3(v'_x)$. Пользуясь методикой пересчета угловых пространственных частот в дальность обнаружения определяются зависимости минимального разрешаемого контраста от угловой пространственной частоты $K_{min \text{ воспр.}} = f_2(z)$. На втором этапе определяется зависимость наблюдаемого контраста от угловой пространственной частоты $K_{изобр} = f_4(z)$. Проще всего определить предельную дальность обнаружения графическим способом, построив на одном графике зависимости $K_{min \text{ воспр.}} = f_2(z)$ и $K_{изобр} = f_4(z)$. Абсцисса точки пересечения этих кривых соответствует предельной дальности.

Одним из самых принципиальных вопросов для АИС ПВ является увеличение дальности обнаружения подводных целей и предельные возможности этого увеличения. Выделено несколько уровней восприятия, нижний из которых (обнаружение объекта) соответствует выделению какого-то размытого пятна на фоне помех, а высший уровень соответствует точной идентификации объекта (идентификация). В качестве параметра, характеризующего возможный уровень восприятия предложено использовать разрешение штриховых мир, эквивалентных объекту. При этом предполагается, что объект характеризуется неким минимальным размером $H_{крит}$, существенным для его восприятия. Каждому уровню видения сопоставлено число некоторых разрешаемых периодов эквивалентной миры, укладывающихся в пределах критического размера объекта. В таблице 6 приведены численные значения коэффициентов по критерию Джонсона, необходимых для вычисления требуемого числа периодов эквивалентной миры.

Таблица 6

Критерий Джонсона

Уровень видения	Описание	Nso	Вероятность восприятия	Множитель
Обнаружение	Выделение размытого пятна на фоне помех	1.0	1.00	3.0
			0.95	2.0
Распознавание	Объект выделяется с достаточной ясностью и дифференцируется по принадлежности к классу	4.0	0.80	1.5
			0.50	1.0
			0.30	0.75
Идентификация	Объект дифференцируется по принадлежности к типу внутри класса	8.0	0.10	0.50
			0.02	0.25

Значение N выбирают в соответствии с заданным уровнем и вероятностью восприятия, приведенными в табл. 7.

Таблица 7

Современные критерии визуального восприятия

Уровень видения	Описание	N
Обнаружение	Выделение размытого пятна на фоне помех	1.0
Различие	Объект выделяется с достаточной ясностью и дифференцируется по принадлежности к класса	4.0
Идентификация	Объект дифференцируется по принадлежности к типу внутри класса	8.0

Тогда при известном критическом размере объекта $H_{крит}$ и выбранном N дальность действия Z и угловая пространственная частота ν' эквивалентного тест-объекта связаны соотношением:

$$\nu' = \frac{z \cdot N}{H_{крит}}$$

Значение N выбирается в соответствии с заданным уровнем и вероятностью восприятия. Тогда при известном критическом размере $H_{крит}$ подводного объекта и выбранном N дальность действия Z и угловая пространственная частота ν' эквивалентного тест-объекта связаны соотношением

$$Z = H_{крит} \cdot \nu' / N \tag{2}$$

Например, если требуется обнаружить подводную объект, имеющей критический размер 0.3 м с вероятностью 80%, то пользуясь данными таблицы и формулой (2) находим требуемое число периодов $N = (1 \cdot 1.5) = 1.5$. Подставив найденное значение в формулу (2) получим формулу для пересчёта дальности через угловые пространственные частоты:

$$Z = 0.2 \cdot \nu'$$

Полученное выражение будет использоваться при пересчете зависимостей: $K_{min\text{ воспр.}} = f_1(\nu'_x)$ в $K_{min\text{ воспр.}} = f_2(z)$, а также $K_{изобр} = f_3(\nu'_x)$ в $K_{изобр} = f_4(z)$.

Другой особенностью энергетического расчета АИС ПВ является наличие ЭОП III+ поколения в составе ФПМ приемного канала АИС ПВ, осуществляющего с высоким быстродействием многократное усиления яркости изображения, сформированного на фотокатоде. Многократно усиленное изображение, сформированное на экране ЭОП проецируется репродукционным объективом на фоточувствительную поверхность матричного фотоприемника (КМОП-матрицу). Для проведения расчета светоэнергетических характеристик сигнальных и фоновых составляющих сигнала на выходе АИС ПВ определим число. Другой особенностью энергетического расчета АИС ПВ является наличие ЭОП III+ поколения в составе ФПМ приемного канала АИС ПВ, осуществляющего с высоким быстродействием многократное усиления яркости изображения, сформированного на фотокатоде. Многократно усиленное изображение, сформированное на экране ЭОП проецируется репродукционным объективом на фоточувствительную поверхность матричного фотоприемника (КМОП-матрицу). Для проведения расчета светоэнергетических характеристик сигнальных и фоновых составляющих сигнала на выходе АИС ПВ определим число фотоэлектронов, генерируемых в одном пикселе КМОП-матрицы регистрируемым излучением от подводной цели $n_{ц}$, окружающего ее фона $n_{ф}$ и ПОР $n_{ПОР}$ по формулам:

$$n_{ц} = \frac{P_0 t_{им} S_{ФПУ} K_{опт} \rho_{ц} \alpha_{п}^2 r_{п}^2 \exp(-2\epsilon z(1 - \Lambda)) q_2}{4\mu^2 \Lambda \epsilon z^3 + (\alpha_{п}^2 + \alpha_{н}^2) z^2}$$

$$n_{ф} = \frac{P_0 t_{им} S_{ФПУ} K_{опт} \rho_{ф} \alpha_{п}^2 r_{п}^2 \exp(-2\epsilon z(1 - \Lambda)) q_2}{4\mu^2 \Lambda \epsilon z^3 + (\alpha_{п}^2 + \alpha_{н}^2) z^2}$$

$$n_{ПОР} = \left(\frac{\sigma x_{п} c \tau}{8n} \right) \frac{P_0 t_{им} S_{ФПУ} K_{опт} \rho_{ц} \alpha_{п}^2 r_{п}^2 \exp(-2\epsilon z(1 - \Lambda)) q_2}{4\mu^2 \Lambda \epsilon z^3 + (\alpha_{п}^2 + \alpha_{н}^2) z^2}$$

Для расчета коэффициента преобразования были использованы следующие формулы:

$$S_{\text{ФПУ}} = P_{\text{сигн.}} \cdot M \cdot \frac{D^2}{4f^2} \cdot \tau_{\text{ро}} \cdot \frac{1}{\beta_{\text{ро}}^2} \cdot \kappa,$$

где M – коэффициент преобразования ЭОП;

$P_{\text{сигн.}}$ – мощность сигнала на 1 эквивалентный пиксель;

$\tau_{\text{ро}}$ – пропускание оптики;

$\beta_{\text{ро}}^2$ – квадрат линейного увеличения репродукционного объектива;

κ – квантовый выход матрицы.

$$M = \eta K_{\text{МКП}} \pi \gamma U \lambda_3 \frac{0,62 \cdot 10^{19}}{683 \cdot 1,24} \left[\frac{\text{фотон}}{\text{Вт} \cdot \text{с} \cdot \text{пиксель}} \right]$$

η – квантовый выход ЭОП;

$K_{\text{МКП}}$ – коэффициент усиления МКП;

γ – светоотдача выходного экрана;

U – ускоряющее напряжение.

Для расчета коэффициента преобразования квантовый выход матрицы был выбран в соответствии с паспортными данными КМОП-матрицы «Baumer MXGC20», используемой в составе ФПМ типа «ФПМ-5-1».

Контраст изображения был рассчитан с учетом вносимых искажений водной среды и лазерной системы видения.

$$K_{\text{изобр}}(v') = \frac{n_{\text{об}} - n_{\text{ф}}}{n_{\text{об}} + n_{\text{ф}} + 2n_{\text{ПОР}}} \cdot \tilde{H}_{\text{АИСПВ}}(v') \cdot \tilde{H}_{\text{воды}}(v'),$$

где $n_{\text{об}}, n_{\text{ф}}, n_{\text{ПОР}}$ – число фотоэлектронов от цели, от фона и ПОР;

$\tilde{H}_{\text{АИСПВ}}(v')$ – МПФ лазерной системы видения;

$\tilde{H}_{\text{воды}}(v')$ – МПФ морской воды;

v' – угловая пространственная частота.

Для определения наблюдаемого контраста подводной цели на окружающем фоне и при воздействии ПОР предварительно получено выражения для соотношения сигнал/шум.

$$\frac{C}{\text{Ш}} = \frac{n_{\text{об}} - n_{\text{ф}}}{\sqrt{n_{\text{об}} + n_{\text{ф}} + 2n_{\text{ПОР}}}} \tilde{H}_{\text{АИСПВ}}(v') \cdot \tilde{H}_{\text{воды}}(v').$$

Выразив из формулы для сигнал/шума выражение $(n_{\text{об}} - n_{\text{ф}})$ и подставив его в контраст изображения, было получено соотношение для расчета минимально разрешаемого контраста:

$$K_{\text{min воспр.}}(v'_x) = \frac{C/\text{Ш}_{\text{min}}}{\sqrt{n_{\text{об}} + n_{\text{ф}} + 2n_{\text{ПОР}}}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_x \alpha_y}{q}} \cdot v'_x.$$

где α_x, α_y – угловой шаг пикселей по горизонтали и вертикали;

q – соотношение вертикального и горизонтального элементов мира;

$C/\text{Ш}_{\text{min}}$ выбираем равным 5.

В качестве примера, на рис. 13 представлены результаты расчета дальности обнаружения и распознавания подводных целей с размером $H = 2.5$ м для прозрачности морской воды по белому $Z_6 = 10$ м.

Проведенные расчеты предельной дальности обнаружения и распознавания подводных объектов с применением АИСПВ с борота ЛА через границу, «воздух-вода», выполненные по данной методике, для приведенных в статье исходных данных, показали, что в морской воде:

♦ с прозрачностью по белому диску $Z_6 = 10$ м, при максимальной средней энергии излучения (в импульсе на частоте 1 кГц) $W_{\text{опт}} = 50$ мДж дальность обнаружения подводного объекта (с критическим размером 2.5 м) $Z_{\text{об}} = 23,3$ м и дальность распознавания $Z_{\text{р}} = 10,1$ м;

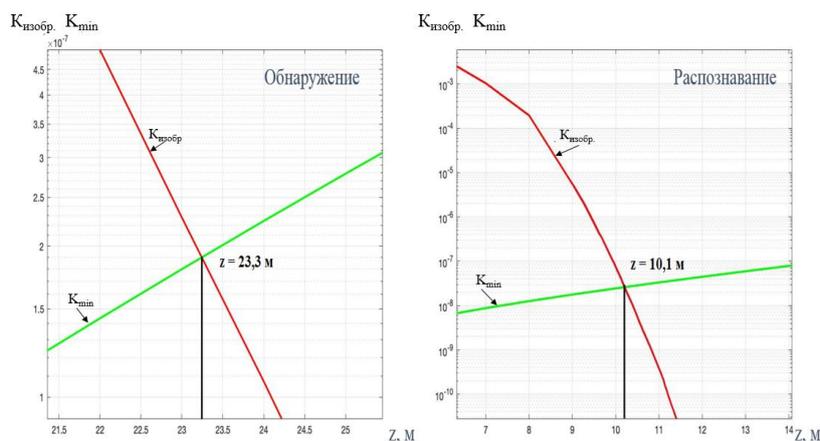


Рис. 13. Результаты определения предельной дальности обнаружения и распознавания подводных целей с помощью АИС ПВ (обнаружение подводной цели размером 2,5 м $Z = 23,3$ м, а распознавание $Z = 10,1$ м)

- ◆ с прозрачностью по белому диску $Z_6 = 20$ м, максимальной средней энергии излучения (в импульсе на частоте 1 кГц) $W_{\text{опт}} = 50$ мДж дальность обнаружения подводного объекта (с критическим размером 12,5 м) $Z_{\text{об}} = 42$ м;
- ◆ с прозрачностью по белому диску $Z_6 = 20$ м, максимальной средней энергии излучения (в импульсе на частоте 1 кГц) $W_{\text{опт}} = 50$ мДж дальность обнаружения подводного объекта (с критическим размером 12,5 м) $Z_{\text{об}} = 49,3$ м;
- ◆ с прозрачностью по белому диску $Z_6 = 20$ м, максимальной средней энергии излучения (в импульсе на частоте 1 кГц) $W_{\text{опт}} = 200$ мДж дальность обнаружения подводного объекта (с критическим размером 12,5 м) $Z_{\text{об}} = 52,3$ м.

В настоящее время для экспериментального подтверждения в натуральных условиях проведенных расчетов дальности действия АИС ПВ был разработан и изготовлен ОАО «НПО Геофизика-НВ» макетный образец АИС ПВ, установленный в глубоководные боксы, внешний вид которого приведен на рис. 14.



Рис. 14. Внешний вид макетного образца АИС ПВ

Заключение:

1. Обнаружение и распознавание подводных объектов с борта ЛА через границу раздела «воздух-вода» по сформированному изображению стала возможным после завершения разработки быстродействующих фотоприемных устройств на основе ЭОП III+ поколения, высокочувствительных в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, и высокоэффективных импульсных лазеров, излучающих в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, и создания на их основе активно-импульсных оптико-телевизионных систем подводного видения (АИС ПВ).

2. Предельная дальность обнаружения и распознавание подводных объектов АИС ПВ с борта ЛА через границу раздела «воздух-вода» в основном определяется:

♦ затуханием оптического излучения в морской воде и практически обратно пропорционально показателю ослабления водной среды;

♦ мощностью подсвечивающего лазерного импульсного излучения, но отличительной особенностью работы АИС ПВ является увеличение дальности обнаружения и распознавания практически прямо пропорционально до определенного уровня мощности лазерного излучения, а дальнейшее увеличение мощности приводит к незначительному увеличению дальности, например, увеличение на порядок мощности подсвечивающего лазерного излучения приводит к увеличению дальности обнаружения подводного объекта всего на 10%–15%.

3. Одним из вариантов уменьшения помехи обратного рассеяния в АИС ПВ является наличие базы b – расстояние между приемным и подсвечивающим каналами АИС ПВ. Были рассмотрены различные варианты значения базы ($b = 0.5$ м, $b = 1$ м, $b = 5$ м и $b = 10$ м). Проведенные расчеты показали, что увеличение базы более 1 м не приводит к нужным результатам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Tan Y.Z. et al.* Overview of Chinese and American marine airborne LiDAR // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2020. – Vol. 42. – P. 111-115.
2. *Mariani P.* Range-Gated Imaging System for Underwater Monitoring in Ocean Environment Quincoces // Sustainability. – 2019. – 11, 162. – P. 1-13.
3. *Tulldahl H.M., Pettersson M.* Lidar for shallow underwater target detection // Electro-optical remote sensing, detection, and photonic technologies and their applications. – SPIE, 2007. – Vol. 6739. – P. 55-66.
4. *Rumbaugh L.K. et al.* A 532 nm chaotic lidar transmitter for high resolution underwater ranging and imaging // 2013 OCEANS-San Diego. – IEEE, 2013. – P. 1-6.
5. *DeWeerts M.J.* Detection of Underwater Military Munitions by a Synoptic Airborne Multi-Sensor System // BAE Systems Spectral Solutions, Honolulu (HI). – 2010.
6. *Birkeland j.* The potential of lidar as an antisubmarine warfare sensor: diss. – University of Glasgow, 2009.
7. *Swain R., Easton R.* Sea mines: the low-end threat in the high-end fight // Proceedings Products, August. – 2021. – Vol. 147/8/1,422.
8. *Карасик В.Е., Орлов В.М.* Локационные лазерные системы видения. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 480 с. – ISBN 978-5-7038-3667-5.
9. *Грузевич Ю.К., Альков П.С., Балясний Л.М., Чистов О.В.* Лазерная оптико-телевизионная активно-импульсная система подводного видения // Подводные исследования и робототехника. – 2024. – № 3 (49). – С. 62-75.
10. *MacCarone A.* Submerged single-photon lidar imaging sensor used for real-time 3d scene reconstruction in scattering underwater environments // School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, UK.
11. *Лучинин А.Г., Сергиевская И.А.* О флуктуациях светового поля под взволнованной поверхностью моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1982. – Т. 18, № 8. – С. 850-858.
12. *Лучинин А.Г.* О некоторых свойствах сигнала обратного рассеяния при лазерном зондировании верхнего слоя океана через взволнованную поверхность // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1987. – Т. 23, № 9. – С. 976-983.
13. *Вебер В.Л.* О влиянии волнения на качество изображения подводного объекта, полученного при наблюдении через морскую поверхность // Оптика атмосферы и океана. – 1992. – Т. 5, № 8. – С. 869-875.
14. *Вебер В.Л., Лучинин А.Г.* Влияние корреляционных эффектов на характеристики изображения дна водоема, наблюдаемого через взволнованную поверхность // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 37, № 2. – С. 257-264.
15. *Вебер В.Л., Лучинин А.Г.* О дисперсии флуктуации изображений при наблюдении через взволнованную поверхность // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1983. – Т. 19, № 6. – С. 631-638.
16. *Лучинин А.Г.* Отношение сигнал/шум в изображении дна водоема, наблюдаемого через взволнованную поверхность // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1986. – Т. 22, № 2. – С. 195-201.
17. *Лучинин А.Г.* Об основных принципах формирования изображения подводных объектов при наблюдении через взволнованную поверхность // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1996. – Т. 32, № 2. – С. 296-302.

18. Лучинин А.Г. Функции распределения сигнала в изображениях самосветящихся подводных тест-объектов, наблюдаемых через взволнованную поверхность // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 38, № 3. – С. 419-425.
19. Лучинин А.Г. Вероятностная трактовка расщепления изображений подводных объектов. – Н. Новгород: Ин-т прикладной физики РАН, 2002.
20. Долин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 229 с.
21. Оптика океана. Т. 2 Прикладная оптика океана / под ред. А.С. Моница. – М.: Наука, 1983. – 236 с.

REFERENCES

1. Tan Y.Z. et al. Overview of Chinese and American marine airborne LiDAR, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, Vol. 42, pp. 111-115.
2. Mariani P. Range-Gated Imaging System for Underwater Monitoring in Ocean Environment *Quincoces, Sustainability*, 2019, 11, 162, pp. 1-13.
3. Tulldahl H.M., Pettersson M. Lidar for shallow underwater target detection, *Electro-optical remote sensing, detection, and photonic technologies and their applications*. SPIE, 2007, Vol. 6739, pp. 55-66.
4. Rumbaugh L.K. et al. A 532 nm chaotic lidar transmitter for high resolution underwater ranging and imaging, *2013 OCEANS-San Diego*. IEEE, 2013, pp. 1-6.
5. DeWeerts M.J. Detection of Underwater Military Munitions by a Synoptic Airborne Multi-Sensor System, *BAE Systems Spectral Solutions, Honolulu (HI)*, 2010.
6. Birkeland j. The potential of lidar as an antisubmarine warfare sensor: diss. University of Glasgow, 2009.
7. Swain R., Easton R. Sea mines: the low-end threat in the high-end fight, *Proceedings Products, August*, 2021, Vol. 147/8/1,422.
8. Karasik V.E., Orlov V.M. Lokatsionnye lazernye sistemy videniya [Location laser vision systems]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2013, 480 p. ISBN 978-5-7038-3667-5.
9. Gruzevich Yu.K., Al'kov P.S., Balyasnyy L.M., Chistov O.V. Lazernaya optiko-televizionnaya aktivno-impul'snaya sistema podvodnogo videniya [Laser optical-television active-pulse system of underwater vision], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2024, No. 3 (49), pp. 62-75.
10. Maccarone A. Submerged single-photon lidar imaging sensor used for real-time 3d scene reconstruction in scattering underwater environments, *School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, UK*.
11. Luchinin A.G., Sergievskaya I.A. O fluktuatsiyakh svetovogo polya pod vzvolnovannoy poverkhnost'yu morya [On fluctuations of the light field under the rough sea surface], *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean], 1982, Vol. 18, No. 8, pp. 850-858.
12. Luchinin A.G. O nekotorykh svoystvakh signala obratnogo rasseyaniya pri lazernom zondirovaniy verkhnego sloya okeana cherez vzvolnovannuyu poverkhnost' [On some properties of the backscattering signal in laser sounding of the upper ocean layer through a rough surface], *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean], 1987, Vol. 23, No. 9, pp. 976-983.
13. Veber V.L. O vliyaniy volneniya na kachestvo izobrazheniya podvodnogo ob'ekta, poluchennogo pri nablyudenii cherez morskuyu poverkhnost' [On the influence of waves on the quality of the image of an underwater object obtained by observation through the sea surface], *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean], 1992, Vol. 5, No. 8, pp. 869-875.
14. Veber V.L., Luchinin A.G. Vliyaniye korrelyatsionnykh effektov na kharakteristiki izobrazheniya dna vodoema, nablyudaemogo cherez vzvolnovannuyu poverkhnost' [Luchinin. Influence of correlation effects on the characteristics of the image of the bottom of a reservoir, observed through a rough surface], *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean], 2001, Vol. 37, No. 2, pp. 257-264.
15. Veber V.L., Luchinin A.G. O dispersii fluktuatsii izobrazheniy pri nablyudenii cherez vzvolnovannuyu poverkhnost' [On the dispersion of image fluctuations when observing through a rough surface], *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean], 1983, Vol. 19, No. 6, pp. 631-638.
16. Luchinin A.G. Otnosheniye signal/shum v izobrazhenii dna vodoema, nablyudaemogo cherez vzvolnovannuyu poverkhnost' [Signal/noise ratio in the image of the bottom of a reservoir observed through a disturbed surface], *AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean], 1986, Vol. 22, No. 2, pp. 195-201.

17. *Luchinin A.G.* Ob osnovnykh printsipakh formirovaniya izobrazheniya podvodnykh ob"ektov pri nablyudenii cherez vzvolnovannuyu poverkhnost' [On the basic principles of forming an image of underwater objects when observed through a rough surface], *AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean], 1996, Vol. 32, No. 2, pp. 296-302.
18. *Luchinin A.G.* Funktsii raspredeleniya signala v izobrazheniyakh samosvetyashchikhsya podvodnykh test-ob"ektov, nablyudaemykh cherez vzvolnovannuyu poverkhnost' [Signal distribution functions in images of self-luminous underwater test objects observed through a rough surface], *AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean], 2002, Vol. 38, No. 3, pp. 419-425.
19. *Luchinin A.G.* Veroyatnostnaya traktovka rasshchepleniya izobrazheniy podvodnykh ob"ektov [Probabilistic interpretation of splitting of images of underwater objects]. Nizhniy Novgorod: In-t prikladnoy fiziki RAN, 2002.
20. *Dolin L.S., Levin I.M.* Spravochnik po teorii podvodnogo videniya [Handbook of the theory of underwater vision]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, 229 p.
21. *Optika okeana. T. 2 Prikladnaya optika okeana* [Ocean Optics. Vol. 2. Applied Ocean Optics], pod red. A.S. Monina. Moscow: Nauka, 1983, 236 p.

Грузевич Юрий Кириллович – Открытое акционерное общество «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»; e-mail: yukg@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74957635492; к.т.н.; доцент; зам. генерального директора по науке.

Гордиенко Юрий Николаевич – Открытое акционерное общество «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»; e-mail: yuriy194421@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74957635492; зам. технического директора.

Альков Павел Сергеевич – Открытое акционерное общество «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»; e-mail: pavel_alkov@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79160586015; к.т.н.; доцент; зам. технического директора – начальник отдела 047.

Волков Дмитрий Владимирович – Открытое акционерное общество «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»; e-mail: mitya_volkov_7554@bk.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79859521503; ведущий инженер.

Ходаковская Мария Сергеевна – Открытое акционерное общество «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»; e-mail: mariya.xabarova.96@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79636095192; инженер.

Gruzevich Yuri Kirillovich – Open Joint-Stock Company “NPO GEOFIZIKA-NV”; e-mail: yukg@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +74957635492; cand. of eng. sc.; associate professor; deputy general director for science.

Gordienko Yuri Nikolaevich – Open Joint-Stock Company “NPO GEOFIZIKA-NV”; e-mail: yuriy194421@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +74957635492; deputy technical director.

Alkov Pavel Sergeevich – Open Joint-Stock Company “NPO GEOFIZIKA-NV”; e-mail: pavel_alkov@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79160586015; cand. of eng. sc.; associate professor; deputy technical director – head of department 047.

Volkov Dmitry Vladimirovich – Open Joint-Stock Company “NPO GEOFIZIKA-NV”; e-mail: mitya_volkov_7554@bk.ru; Moscow, Russia; phone: +79859521503; lead engineer.

Khodakovskaya Maria Sergeevna – Open Joint-Stock Company “NPO GEOFIZIKA-NV”; e-mail: mariya.xabarova.96@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79636095192; engineer.

УДК 007.52

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-256-268

Н.В. Ким, Н.Е. Бодунков, Д.С. Гиренко, Н.А. Ляпин, Н.В. Удалова

ВИЗУАЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕМАНТИЧЕСКИХ ОПИСАНИЙ МЕСТНОСТИ

Рассматривается задача визуальной навигации беспилотных летательных аппаратов (БЛА), которая заключается в автоматическом определении текущего положения БЛА (координат в земной (местной) системе координат), на основе сравнения и идентификации описаний принимаемых на борту текущих изображений (ТИ) подстилающей поверхности и эталонных описа-