

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ И ОРИЕНТАЦИИ В ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ

А.Ю. Родионов, А.Ф. Щербатюк

В последние годы значительно вырос объем информации, получаемой от различных подводных сенсорных систем, в том числе систем сбора изображений и видеоданных из океана. При этом требуется передача больших массивов накопленных данных в пункт сбора и обработки полученной информации. Разработка кабельных донных сетей обходится чрезвычайно дорого. Наиболее широкое распространение для организации подводной связи нашли акустические системы. Однако подводная акустическая связь имеет несколько недостатков, включая низкую скорость передачи информации, зашумленность данных и сложность в обеспечении скрытности передачи сообщений. В связи с этим все шире проводятся исследования, связанные с разработкой беспроводной оптической связи, которая обеспечивает скрытность и значительно более высокую скорость передачи данных. Оптические системы связи компактнее и дешевле акустических систем, и основным их недостатком является небольшая дальность действия, ограниченная дальностью оптического видения под водой. Применяемые в системах подводной оптической связи мощные светодиоды, наряду с передачей информации и определением взаимной дистанции, могут использоваться для ориентирования и приведения автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) в зону оптической видимости вблизи донной станции, что позволяет обеспечить более надежную связь. В статье выполнен обзор текущего состояния и рассмотрены перспективы использования оптических систем для организации скоростной подводной связи и обеспечения ориентирования и приведения АНПА вблизи донных объектов в подводном пространстве.

Ключевые слова. Оптические системы подводной связи, автономные сенсорные сети, необитаемые подводные аппараты, оптические системы ориентирования и приведения.

1. Введение

Изучение океана связано с долговременными наблюдениями за важнейшими физическими и биологическими параметрами морской среды. В последнее время океанографические исследования приобрели большое значение из-за таких проблем, как изменение климата и загрязнение окружающей среды. Значительный интерес вызывает развитие технологий, связанных с обнаружением цунами, мониторингом районов подводной нефтедобычи и инспектированием трубопроводов, а также управлением рыболовством.

Решение некоторых задач, таких как экологический мониторинг и охрана морских акваторий, связано с длительным пребыванием групп телеуправляемых и автономных необитаемых подводных аппаратов (ТНПА и АНПА) под водой. Для обеспечения возможности долговременного функциони-

рования АНПА под водой необходимо, чтобы они в автоматическом режиме периодически приводились к донным станциям, стыковались с ними и выполняли процедуры подзарядки бортовых аккумуляторных батарей, передачи накопленных данных и получения нового задания.

С увеличением различных видов подводной деятельности возрастает потребность в эффективной системе подводной связи, которая использует буи, суда, подводные сенсорные сети, ТНПА и АНПА. Автономные подводные сенсорные сети могут быть реализованы с использованием различных типов устройств, в том числе систем сбора изображений и видеоданных из океана. При этом требуется передача больших массивов накопленных данных в пункт сбора и обработки полученной информации.

Наиболее широкое распространение для организации подводной связи нашли акустические системы. Однако подводная акустическая связь имеет несколь-

ко недостатков, включая низкую скорость передачи информации, зашумленность данных и сложность в обеспечении скрытности передачи сообщений. В связи с этим все шире проводятся исследования, связанные с разработкой беспроводной оптической связи, которая обеспечивает скрытность и значительно более высокую скорость передачи данных. Следует отметить, что оптические системы связи компактнее и дешевле акустических систем. Основным недостатком оптических систем связи является их небольшая дальность действия, которая в прозрачной воде составляет около 100 м, а в мутной воде еще меньше.

Мощные светодиоды, которые применяются в системах подводной оптической связи для передачи информации и определения взаимной дистанции, могут использоваться для ориентирования АНПА в зоне оптической видимости вблизи донной станции. Использование светящихся ориентиров в системах приведения более предпочтительно по сравнению с контрастными маркерами, эффективность которых падает в зависимости от интенсивности и ракурса освещения и съемки. Кроме того, светящиеся ориентиры можно включать лишь на время приближения АНПА к донной станции по сигналу, что позволяет экономить электроэнергию и обеспечивает скрытность работы.

В данной статье в части 2 рассмотрены вопросы разработки оптических модемов и исследования их работоспособности в подводной среде. Использование оптической связи для управления НПА рассмотрено в части 3. В части 4 обсуждены вопросы использования АНПА для быстрого сбора информации с автономных сетей сенсоров, расположенных на дне. Методы использования оптических систем для ориентации и приведения НПА в подводном пространстве рассмотрены в части 5.

2. Разработка оптических модемов и исследование их работоспособности в подводной среде

Актуальность применения высокоскоростной связи с удаленным узлом приводит к поиску новых решений, таких как использование лазерной связи на рассеянном излучении, являющейся одним из средств для организации беспроводного высокоскоростного канала связи с подводными узлами, где на данный момент доминируют гидроакустические средства с низкой пропускной способностью. Также оптические системы представляют интерес при организации связи на границе раздела сред, тогда как гидроакустические средства ограничены примени-

ем в водном пространстве. В связи с этим имеется востребованность в разработке скоростных систем связи для организации канала с высокой пропускной способностью между несколькими АНПА, между АНПА и ТНПА, а также между приводящимися воздушными дронами и АНПА. Применение на АНПА лазерно-оптических систем связи существенно расширит их информационные возможности при проведении поисково-исследовательских работ в составе разнородных подводных робототехнических комплексов.

Большое количество работ по созданию лазерно-оптических систем связи посвящено исследованиям в области поглощения света морской средой, которое по большей части складывается из поглощения чистой воды и поглощения, вносимого примесями. В соответствии с ними наименьшим затуханием для передачи информации под водой обладают волны в диапазоне 400–500 нм [1]. Исследования также показали значимый вклад хлорофилла и других цветных пигментов микроводорослей в поглощение сигнала [2]. Учитывая крайнюю неоднородность распределения солей и микроорганизмов в Мировом океане, любая акватория требует тщательного исследования оптических свойств воды и круглогодичного контроля этих параметров для выбора наиболее подходящей длины волны [3].

Основываясь на данных об оптических свойствах той или иной акватории, происходит выбор передающего источника света – лазера. На сегодняшний день ведутся исследования по использованию в подводной оптической связи лазеров со следующими типами активной среды: алюмо-иттриевый гранат («YAG», Y3Al5O12), легированный ионами неодима [4], полупроводниковые лазеры InGaN [5], волоконный лазер [6] и т.д. Отдельные коллективы также рассматривают NLOS (Non-line-of-sight) связь как на рассеянном [7], так и на отраженном излучении [8]. Подобный подход отличается сниженными требованиями по юстировке передатчика и приемника, характерными для большинства узконаправленных оптических систем.

Интенсивные исследования ведутся с целью повышения надежности систем подводной оптической связи, при этом важной задачей является обеспечение работоспособности в мутной воде. В статье [9] приведены результаты исследования затухания формируемого лазером слаборасходящегося луча света, вызванного содержащимися в мутной воде различными частицами и растворенными веществами. В работе использовался зеленый лазер с длиной волны 520 нм, а способ передачи основан на методе Pulse

Position Modulation, который имеет лучшие характеристики в среде, где присутствует шум. Получена зависимость дальности оптической связи от степени мутности воды.

В статье [10] основное внимание уделяется возможностям подводной системы связи в видимом диапазоне света UVLC (underwater visible light communication). Система основана на модуляции интенсивности с прямым обнаружением IM/DD (intensity modulation with direct detection). В такой системе усиление канала основывается на ламбертовской диаграмме направленности передающего светоизлучающего диода с учетом поглощения и рассеяния. Коэффициент усиления канала изменяется в зависимости от степени мутности воды и некоторых геометрических параметров системы. Результаты моделирования показывают, что производительность системы UVLC зависит от типа воды и пространственного расположения передатчика и приемника. Исследованию влияния разных видов примесей на оптические свойства экспериментальной воды посвящена статья [11]. Получена частотная характеристика оптического канала связи в экспериментальной воде. Результаты показывают, что тип и размер частиц примесей и их концентрация существенно влияют на оптические свойства и полосу пропускания канала оптической связи. В статье [12] для исследования характеристик распространения лазерного луча при дальней связи и зависимости его параметров от расстояния и мутности воды создана модель, основанная на методе Монте-Карло. Выполнено моделирование нескольких виртуальных гауссовых лучей с разными углами расхождения в трех типичных океанских водах.

В настоящее время несколько организаций и компаний объявили о создании опытных образцов систем подводной оптической связи. Компания Sonardyne разработала линейку оптических модемов для подводной связи BlueComm [13], которая обеспечивает скорость передачи данных до 10 Мб/с на расстоянии до 150 м. При этом система устойчиво функционирует при сильном внешнем освещении и сохраняет относительную работоспособность в мутной воде. О создании глубоководного оптического модема Luma с рабочей глубиной 6000 м и скоростью передачи данных до 10 Мб/с на расстоянии до 50 м объявила компания Hydromea [14]. АО «НПП ПТ «Океанос» представило подводную систему высокоскоростной оптической связи О2-СПОС-44020 [15], которая предназначена для беспроводной передачи данных и управления подводным аппаратом. В соответствии с описанием данная система поддерживает

скорость передачи данных до 20 Мб/с на расстоянии 10 м и обеспечивает дальность связи до 100 м. В рамках натуральных экспериментов, описанных в [8], была показана возможность передачи потокового видео на скоростях 1.5 Мбит/с на дистанции 30 м при связи на рассеянном излучении.

При проектировании системы оптической связи важным является выбор базовых электронных компонентов. В современных подводных оптических модемах доступен ряд технологий для передатчиков (лазерные диоды, светодиоды) и приемников (фотоумножители, лавинные фотодиоды, фототранзисторы, фоторезисторы и др.). Светодиоды менее дороги, чем лазерные диоды, хотя их луч распространяется на более короткие расстояния. На стороне приемника фотоумножительные лампы (ФЭУ) имеют высокую чувствительность и большую апертуру, но, как правило, они дороги, громоздки и хрупки. Оптический модем, разработанный для океанской обсерватории из [16], обеспечивает скорость до 10 Мбит/с на расстоянии 91 м для чистой воды с использованием фотоумножителя (ФЭУ) и луча лазерного диода. AquaOptical [17] – это двунаправленный модем, который обеспечивает дальность действия 50 м, скорость передачи данных 2,28 Мбит/с с собственной экспериментальной установкой. В оптическом модеме BlueComm также используется коммерческая версия оптического модема на основе фотоумножителя. Среди альтернативных технологий можно отметить оптический модем Blue Ray [18], созданный в ISR/IST (Португалия), использующий фотодиоды, которые менее чувствительны, чем ФЭУ, и имеют более медленный отклик, что ограничивает общую полосу пропускания и достижимую скорость передачи данных примерно до 200 кбит/с.

Кремниевые фотоумножители (SiPM) недавно были признаны перспективной альтернативой ФЭУ на трубках благодаря их высокой чувствительности. В статье [19] разработчики отмечают, что приемопередатчик позволяет передавать сигнал со скоростью до 10 мегабит в секунду. Это обеспечивает в реальном времени трансляцию с АНПА на пульт оператора видео в разрешении HD. Исследовательский центр Ifremer (Французский институт морских исследований) и исследовательская лаборатория Института Френеля изучают подходящие альтернативные решения для ФЭУ в контексте подводной оптической связи и впервые использовали эти новые компоненты фотодетекторов для обнаружения сигналов. Новый прототип оптического модема на основе приемников SiPM был реализован при поддержке французской приборостроительной компании Osean SAS Co.

С использованием этого модема был проведен ряд лабораторных экспериментов и морских испытаний в мутной воде и чистом открытом море для оценки практического интереса SiPM. В статье даются описание передатчика и приемника прототипа модема, методы использования преимуществ этой новой технологии, а также решения возможных практических проблем. В ней также представлена методология проведенных ходовых испытаний и оценки характеристик с точки зрения дальности и скорости передачи данных.

Подводные лазерные дальномеры и лидары. Одной из дополнительных составляющих коммуникационного оборудования являются навигационные элементы, позволяющие измерять дистанцию до объекта, выполнять оценку геометрии окружающего пространства. В наземных оптических системах широкое распространение получили лазерно-дальномерные системы, которые в совокупности со сканирующими пространственными электронными устройствами образовали лидарные системы для всевозможных робототехнических комплексов. Также лазерные лидарные системы нашли свое применение и в подводных навигационных системах ближнего действия, в создании 3D-съемки подводных объектов.

Большинство лазерных измерителей используют фазовый метод измерения расстояния. В фазовом методе лазер работает постоянно, и основной сигнал амплитудно промодулирован вспомогательным сигналом определенной частоты (единицы – сотни МГц). Отраженное от объекта излучение принимается фотоприемником, и его фаза сравнивается с фазой опорного сигнала — от лазера. Наличие задержки при распространении волны создает сдвиг фаз, который и измеряется дальномером.

Расстояние определяется по формуле:

$$D = \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4f\pi},$$

где c – скорость света, f – частота модуляции лазера, $\Delta\varphi$ – фазовый сдвиг. Формула справедлива только в том случае, если расстояние до объекта меньше половины длины волны модулирующего сигнала, которая равна $c/2f$. При частоте модуляции, равной 5 МГц, измеряемое расстояние может достигать до 30 м. При превышении этого расстояния возникает неоднозначность – невозможно определить, сколько периодов волны укладывается в измеряемом расстоянии. Для разрешения неоднозначности частоту модуляции лазера переключают, после чего решают получившуюся систему уравнений. Использование набора модуляционных частот позволяет выполнять

измерения расстояния с необходимой точностью. Учитывая необходимость распространения лазерного луча в прямом и обратном направлениях, очевидно, что для решения навигационных задач под водой и определения дистанций потенциальная дальность действия будет в два раза меньше дальности действия оптической системы связи в этих же условиях. Соответственно, в благоприятных условиях прозрачности дальность измерений под водой не превысит 50 м и модулирующий ряд частот для лазерного излучения в сине-зеленом диапазоне необходимо начинать со значений от 3 МГц и выше для повышения точности оценки расстояния. Данный навигационный функционал для оптического модема значительно расширяет возможности одиночной и групповой работы АНПА при подводных исследованиях.

Методы манипуляции подводного оптического сигнала. Ключевыми проблемами оптических систем передачи информации являются значительное поглощение светового потока при наличии примесей в воде (биологического и неорганического происхождения), а также рассеяние светового потока на частицах и возникновение временной дисперсии в оптическом канале, что может искажать фронты передаваемых цифровых импульсов при высоких скоростях передачи информации.

Классическими методами манипуляции в системах связи являются форматы, такие как цифровая амплитудная модуляция (ASK), частотная модуляция (FSK) и фазовая модуляция (PSK). Также одним из модуляционных параметров сигнала может быть и временная позиция передаваемого символа – импульсно-позиционная модуляция (PPM), она используется для дальнейшего улучшения способности защиты от помех при передаче информации и предлагается в различных наземных системах (IEEE 802.11 IR) [20–26]. Импульсно-позиционная модуляция – это хорошо известный метод ортогональной модуляции, в котором n битов сообщения кодируются путем передачи одного импульса с одним из $2n$ возможных сдвигов по времени. Структурная схема PPM-трансляции заключается в том, что в каждом временном интервале T_s присутствуют соответствующие информационные временные сдвиги импульса с максимальным сдвигом $L = 2n$ и они составляют кадр PPM-передачи. На стороне передатчика сигнал будет запущен световым импульсом, чтобы сформировать определенный временной интервал, а на стороне приемника фотозлектрический диод обнаруживает световой импульс, а затем определяет его временной интервал, чтобы оценить его положение и выполнить демодуляцию.

На данный момент в подводной оптике основными методами можно считать амплитудную манипуляцию световых импульсов (On-Off-Keying) и PPM. Однако значительными проблемами являются низкая помехоустойчивость режима с амплитудной манипуляцией из-за релеевско-райсовского статистического характера оптических шумов и соответственно сложность в выборе порога детектирования оптического «ноля» и «единицы». Импульсно-позиционная модуляция (PPM) в данном случае является некоторым компромиссом, но условия детектирования схожи с ASK.

Современные высокоэффективные методы частотного уплотнения с высокоранговыми методами манипуляции, такие как OFDM-M-QAM, показывают единицы Гбит/с пропускной способности, но при дальности действия до 2–3 метров, с применением крайне усложненных электронных систем с высокоскоростными АЦП и ПЛИС. Системы, построенные на подобных методах, могут быть использованы только при стыковочных операциях (быстрая передача данных с АНПА на донную станцию) и при увеличении дистанции резко теряют в помехоустойчивости. Начало применения OFDM в волоконно-оптических линиях (ВОЛС) было оправдано из-за роста эффекта дисперсии оптоволокна с ростом дистанции и из-за искажения фронтов импульсов, с чем метод OFDM успешно справлялся, и длины кабелей ВОЛС были многократно увеличены без применения выравнивающих повторителей. В подводной оптической связи критически важным параметром остается уровень отношения сигнал/шум для корректного декодирования данных на расстояниях до десятков метров. Дополнительное преимущество метода OFDM-M-QAM (OFDM-64/16-QAM) в виде высоких значений спектральной эффективности и высокой пропускной способности также требует высокого отношения сигнал/шум, чего добиться сложно с увеличением расстояния, и усложнение схем модуляции и декодирования в устройствах оправдано только для сверхскоростных оптических систем ближнего действия.

Важным требованием к подводным оптическим системам передачи цифровой информации является трансляция видеоданных в реальном времени между АНПА и устройством сбора информации, что требует пропускной способности от сотен кбит/с до 10 Мбит/с в зависимости от качества передаваемого изображения. Также следует отметить, что в подводном пространстве не потребуются полноцветная передача изображения, что также нужно учитывать при компрессии подводного ви-

део. Таким образом, целесообразно рассматривать оптические системы с пропускной способностью от сотен кбит/с до единиц Мбит/с при практическом применении для связи под водой на дальностях до 100 м. При данных значениях пропускной способности влияние мультипликативных помех нивелируется и доминирующую роль приобретает значение отношения сигнал/шум на приемной стороне. Здесь критически важно подбирать малошумящие оптические детекторы и усилительные каскады с одновременным увеличением мощности передатчика оптической установки с синезеленым спектром излучения.

Метод DSSS-Time-Shift для оптического канала связи. Одним из способов увеличения помехоустойчивости систем связи является применение шумоподобных сигналов, построенных на базе псевдослучайных последовательностей (ПСП): M-последовательности, коды Баркера, Голда, Касами и др. Использование ПСП в связи является эффективным и зачастую единственным средством для реализации дальней связи ввиду ограничений, связанных с излучаемой мощностью. Недостатком использования такого метода является значительное снижение скорости передачи информации. Основным способом увеличения пропускной способности для DSSS-систем (Direct Sequence Spread Spectrum), использующих ПСП, является увеличение сигнального пространства кодов. Нарращивание количества K кодов позволяет увеличить скорость в $\log_2 2K$ раз. Формирование сигнального пространства требует тщательного выбора кодов с минимальными значениями взаимокорреляционных функций (ВКФ) из набора кодов с лучшими значениями автокорреляционных функций (АКФ). В рамках данного подхода на приемной стороне необходимо организовать параллельную работу K согласованных фильтров, адаптированных под выбранные ПСП.

Для достижения приемлемых значений скорости информационного обмена без применения большого количества параллельно работающих корреляторов предлагается использование дополнительной временной сдвиговой манипуляции (Time-Shift) для ранее полученных уникальных ПСП [27]. В результате численных расчетов на высокопроизводительных компьютерах были найдены семейства бинарных кодов длиной до 60 элементов, обладающих наилучшим отношением максимума автокорреляционной функции (АКФ) к максимальному уровню боковых лепестков. В таблице приведены характеристики некоторых найденных кодов.

Характеристики некоторых найденных кодов

Длина кода L	Уровень бокового лепестка АКФ	Количество найденных кодов
28	2	16
42	3	32
45	3	32
51	3	8

Данные коды в совокупности с кодами Баркера ($L = 4, 5, 7, 11, 13$) могут быть использованы в качестве ПСП, выполняющих задачу синхронизации и передачи информационных последовательностей. Лучшее соотношение максимума АКФ к уровню боковых лепестков у найденных кодов по сравнению с известными кодами позволяет получить более точную временную локализацию передаваемой последовательности. Относительно небольшая длина кодов также позволяет достичь хороших характеристик по пропускной способности в семействе оптических DSSS систем. Оценки пропускной способности для DSSS-Time-Shift системы приведены в [28] и выражаются соотношением:

$$f_b = \frac{\log_2(2M)}{\tau(L + M/2)},$$

где τ – длительность элементарного оптического импульса, L – длина используемой кодовой последовательности, M – количество временных позиций кода.

Данный режим позволит добиться оптимальных соотношений по отношению сигнал/шум и пропускной способности для оптических подводных систем при выборе нужной длины кода L . Для каждого значения L существует оптимальная величина M , максимизирующая величину пропускной способности f_b .

3. Применение систем оптической связи для управления НПА

В последние годы появились публикации, описывающие гибридные ПА нового поколения, которые используют беспроводную оптическую связь для управления. Демонстрация возможностей оптической системы связи, разработанной в WHOI [29], была проведена с использованием ПА Nereus в доке Океанографического института WHOI. Nereus – это гибридный ROV с возможностью работы на глубину до 11000 м. Смысл демонстрации состоял в том, чтобы установить работоспособность оп-

тической связи для обеспечения возможности управления ПА в реальном времени, в частности прямого управления человеком во время интерактивного процесса выполнения сложных неструктурированных манипуляций под водой. В этой конфигурации был реализован полнодуплексный оптический канал, состоящий из пары приемников/передатчиков, обменивающихся данными через отдельные оптические частотные каналы. Видеоданные в реальном времени были переданы и декодированы оптическим способом. Расстояние между двумя системами составляло примерно 15 м.

Другим примером является новый гибридный подводный аппарат Sabertooth [30], разработанный в компании Saab Dynamic, который может работать как в режиме телеуправляемого необитаемого подводного аппарата, так и в режиме автономного необитаемого подводного аппарата. Принципиальным новшеством проекта является использование высокоскоростной открытой оптической линии связи (FSO – Free Space Optic Link). На подводный аппарат Sabertooth (рис. 1) могут быть установлены манипулятор и другой инструментарий, которым прежде оснащались только ТНПА рабочего класса.

Компания Hydromea [14] представила АНПА с камерой и беспроводным управлением при помощи оптической системы связи. Беспроводная связь позволяет управлять подводным аппаратом и получать от него видео на расстоянии до 50 м. Разработчики отмечают, что приемопередатчик позволяет передавать сигнал со скоростью до 10 мегабит в секунду. Это обеспечивает в реальном времени трансляцию с АНПА на пульт оператора видео в разрешении HD.

В ISR/IST (Португалия) рассмотрены сценарии миссий, при выполнении которых скоординированная работа группы АНПА в локальной области требует наличия системы связи для обмена сенсорной

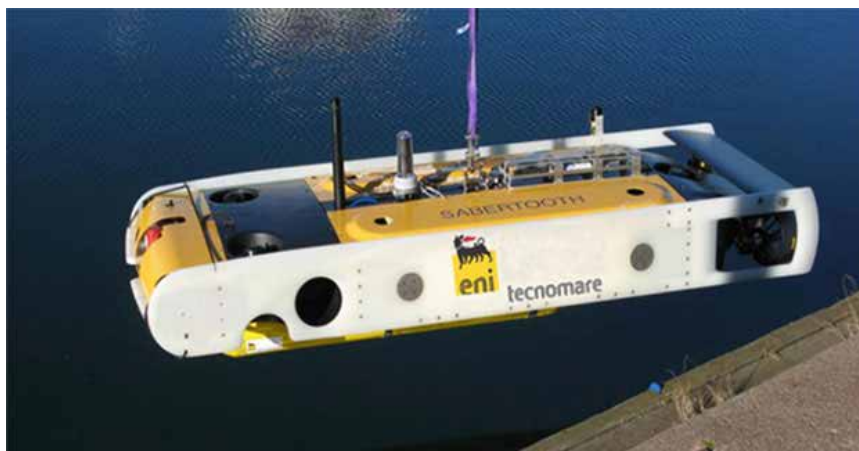


Рис. 1. Подводный аппарат Sabertooth



Рис. 2. АНПА Medusa с оптомодемом Blue Ray, разработан в ISR/IST (Португалия)

информацией, а также данными управления и навигации, чтобы группа могла принимать требуемые пространственные конфигурации и осмысленно реагировать на внешние события. Учитывая предполагаемые сценарии миссий для АНПА Medusa разработаны коммуникационные решения, которые дополняют акустику. В статье [18] сообщается об испытаниях оптического модема для двусторонней связи между парой АНПА Medusa.

4. Использование АНПА для быстрого сбора информации с установленных на дне автономных сетей сенсоров

В последние годы произошло значительное количество сильных землетрясений и цунами. Постоянный мониторинг землетрясений в прибрежных районах с высоким сейсмическим риском позволит заблаговременно предупредить о них. Чтобы полностью понять поведение разломов и предсказывать землетрясения и цунами для минимизации последствий, нужен доступ к высококачественным данным с морских сенсоров, расположенных непосредственно над местами, где вероятны сильные землетрясения. Оптоволоконные сейсмические станции реального времени, которые развернуты у берегов Японии, западного побережья Канады и северо-западного побережья США, являются наиболее современным и оперативным средством для мониторинга землетрясений, но их развертыва-

ние чрезвычайно дорого. В обозримом будущем маловероятно, что даже США развернут такие станции в необходимом количестве для покрытия зоны вдоль своего западного побережья протяженностью около 1000 километров, где вероятны сильные землетрясения.

В качестве альтернативы для решения данной проблемы могут использоваться автономные донные сейсмографы (OBS), разработанные в WHOI [31], предназначенные для экономичного и долгосрочного мониторинга землетрясений. OBS могут работать в течение более четырех лет без обслуживания, и накопленные ими данные могут быть считаны с помощью AUV в реальном времени. При этом отпадает необходимость в использовании исследовательских судов для извлечения и повторного развертывания OBS.

В [31] описан способ получения данных с OBS с помощью REMUS AUV с дальностью действия около 40 км. AUV может выполнить обход всей сети OBS за одну миссию для извлечения данных, полученных в течение заданного времени. Разработана технология извлечения данных из автономного OBS с использованием высокоскоростного оптического модема, способного поддерживать постоянную скорость передачи 10 Мбит/с, что более чем в 10 000 раз превышает скорость подводной телеметрии с помощью акустических модемов. Одновременно измеряется смещение времени между часами OBS и истинным временем



Рис. 3. Сбор данных с автономной сети расположенных на дне сенсоров

на AUV, синхронизированным с GPS в начале миссии. Данное смещение между часами используется для корректировки временной развертки OBS на истинное время с точностью около 10 мс.

В статье [32] эти же авторы помимо быстрой передачи данных и коррекции времени на OBS по показаниям часов на AUV особое внимание уделяют реализованной на рассмотренном оптическом модеме возможности измерения дальности до OBS. Данная опция обеспечивает автономным подводным аппаратам улучшенное автономное поведение при сближении с OBS и надежный доступ к накопленным данным. Предложенная технология была продемонстрирована в ходе краткосрочного эксперимента на шельфе Вудс-Хоул, штат Массачусетс.

Интегрированная подводная система связи, использующая акустический и оптический модемы, рассмотрена в статье [29]. Оптическая система связи дополняет существующую акустическую систему, что обеспечивает возможность подводной связи с высокой скоростью передачи данных и низкой задержкой в оптическом диапазоне дальностей в сочетании с большой дальностью действия, но более низкой скоростью передачи данных за пределами оптического диапазона дальностей. Тестирование зависимости дальности от скорости передачи оптической системы было продемонстрировано на чистой глубокой воде с помощью ПА Alvin. Излучатель был расположен на морском дне, а приемник – на ПА Alvin, который медленно отодвигался, пока не пропал сигнал связи. В этом эксперименте тестовые данные передавались со скоростью 1 Мбит/с, безошибочная передача на данной скорости была достигнута на расстоянии более 100 м.

В статье [33] рассмотрена задача организации эффективного сбора информации с датчиков на морском дне с помощью группы АНПА на основе подводной оптической связи. При этом сформулирована задача оптимизации размещения АНПА таким образом, чтобы вероятность покрытия всех датчиков была максимальной. Предложен алгоритм низкой сложности для эффективного решения соответствующей проблемы, который демонстрирует почти идентичные характеристики покрытия датчиков по сравнению с полным перебором. Однако поиск методом перебора предъявляет очень высокие требования к производительности вычислительной системы при увеличении количества АНПА.

Одной из целей нового европейского проекта EU Marine Robotic (EUMR) [34] является разработка гибридной акустико-оптической сети, предназначенной для развертывания передовых автономных

подводных решений с использованием интеллектуальных, адаптивных и безопасных стратегий подводных сетей, Гибридная акустико-оптическая сеть была протестирована в Дока-дус-Оливаис, Лиссабон, на участке с размерами поверхности примерно 240×370 м. Данная область характеризуется высокой мутностью воды и небольшой глубиной (максимум 4 м), которые влияют на работу оптических модемов BlueRay, установленных на АНПА Medusa. Алгоритм управления координацией обеспечивал выравнивание оптического луча, поддерживая параллельность подводных аппаратов Medusa на расстоянии 2 м при общей скорости 0,3 м/с.

5. Методы использования оптических систем для ориентации АНПА в подводном пространстве

Применяемые в системах подводной оптической связи мощные светодиоды наряду с передачей информации и определением взаимной дистанции могут использоваться для ориентирования АНПА в зоне оптической видимости вблизи донной станции. Использование светящихся ориентиров в системах приведения более предпочтительно по сравнению с контрастными маркерами, эффективность которых падает в зависимости от интенсивности и ракурса освещения и съемки. Кроме того, светящиеся ориентиры можно включать лишь на время приближения АНПА к донной станции по сигналу, что позволяет экономить электроэнергию и обеспечивает скрытность работы.

В последние годы исследованию алгоритмов подводной стыковки для АНПА на основе обработки изображений светящихся ориентиров посвящено много работ. В работе [35] рассмотрена разработанная в KORDI (Корея) система приведения для АНПА ISiMI, которая использует вертикальную плоскую мишень, содержащую пять светящихся точек, расположенных определенным образом на окружности.

В работах [36–37] для выполнения точных перемещений подводного аппарата вблизи стыковочного устройства после прихода его в зону визуальной видимости донной станции предложены крестообразный и круговой ориентиры со светодиодами. На основе визуальной информации АНПА должен распознать ориентир и определить относительно него свои местоположение и ориентацию.

Крестообразный маркер. Для выделения такого маркера выполняются следующие шаги:

- обнаружение на изображении ярких пятен, соответствующих светящимся источникам света (ис-

пользуется сравнение с порогом для преобразования исходного изображения в бинарное);

– определение координат центров найденных пятен;

– нахождение двух взаимно перпендикулярных линий, соответствующих выделенным точкам.

Полярные координаты точки пересечения (ρ, φ) двух прямых, заданных параметрами (ρ_1, θ_1) и (ρ_2, θ_2) , вычисляются на основе соотношений (см. [36]):

$$\varphi = \theta_2 - \arctg\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - \operatorname{ctg}(\theta_2 - \theta_1)\right),$$

$$\rho = \rho_2 / \cos(\theta_2 - \varphi).$$

Достоинством данного маркера является относительная вычислительная простота выделения его на изображении.

Круговой маркер. Круговой маркер представляет собой контрастную круговую линию. В общем случае подобная мишень проецируется на плоскость изображения как эллипс. Для выделения данного маркера было разработано алгоритмическое обеспечение, основанное на обнаружении на изображении эллипсов с использованием преобразования Хоу [38]. Данный маркер также может иметь точечный вариант представления. В [36] рассмотрен круговой точечный маркер, который представляет собой структуру из 10 точечных источников света, равномерно расположенных на дуге окружности в 270° . Оставленный пустым сектор служит для определения ориентации АНПА относительно маркера. Представленная форма позволяет определить действительную взаимную ориентацию АНПА и маркера во всем диапазоне $0-360^\circ$. Алгоритм выделения данного маркера включает следующие шаги:

1. Выделение на изображении ярких пятен, соответствующих светящимся источникам света (используется сравнение с порогом для преобразования исходного изображения в бинарное).

2. Определение координат центров найденных пятен.

3. Решение системы из i линейных уравнений вида:

$$\{Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F = 0,$$

где x_i, y_i – координаты полученных точек, $A-F$ – неизвестные. Количество уравнений должно быть не менее 6. При обнаружении менее 6 точек вычисления не производятся. Указанная система уравнений решается с помощью алгоритма определения параметров эллипса методом наименьших квадратов.

1. Определение угла поворота эллипса по формуле $\alpha = \frac{1}{2} \arctg\left(\frac{B}{A-C}\right)$.

2. Пересчет коэффициентов $\tilde{A}, \tilde{C}, \tilde{D}, \tilde{E}$ по формулам:

$$\tilde{A} = A \cdot \cos^2 \alpha + B \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha + C \cdot \sin^2 \alpha,$$

$$\tilde{C} = A \cdot \sin^2 \alpha - B \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha + C \cdot \cos^2 \alpha,$$

$$\tilde{D} = D \cdot \cos \alpha + E \cdot \sin \alpha, \quad \tilde{E} = E \cdot \cos \alpha - D \cdot \sin \alpha.$$

3. Определение координат центра эллипса x_0, y_0 по соотношениям:

$$x_0 = \left(\frac{\tilde{E}}{2\tilde{C}}\right) \sin \alpha - \left(\frac{\tilde{D}}{2\tilde{A}}\right) \cos \alpha,$$

$$y_0 = -\left(\frac{\tilde{E}}{2\tilde{C}}\right) \cos \alpha - \left(\frac{\tilde{D}}{2\tilde{A}}\right) \sin \alpha.$$

Следует отметить, что для выделения данного маркера требуется выполнить больший объем вычислений по сравнению с маркером, состоящим из прямолинейных отрезков.

В статье [39] рассмотрена задача организации стыковки НПА с донной станцией. Для этого разработан активный светоизлучающий 3D-маркер. Предложен новый метод измерения положения и ориентации цели в темноте и в мутной среде и выполнены эксперименты по стыковке. Приведены результаты успешной стыковки с расстояния 600 мм между роботом и целью. Задача выполнения стыковки НПА по 3D-маркеру в условиях возмущений, вызванных океанским течением, рассмотрена в статье [40]. Для ее решения разработана автономная роторная станция, которая устраняет рассогласование между направлением океанского течения и направлением стыковки. В данной статье описана автономная роторная станция и выполнен анализ результатов эксперимента по морской стыковке в условиях океанского течения. Задача организации скоординированного движения группой АНПА рассмотрена в статье [41]. Для более точного перемещения на малых расстояниях авторы применили визуальное позиционирование. В предлагаемом методе ведомый АНПА оценивает свое положение и скорость на небольшом расстоянии от движущегося ведущего АНПА, используя свою камеру и светодиодную матрицу, установленную на ведущем АНПА. Новизна предложенного метода состоит в том, что АНПА оценивает свою относительную скорость относительно движущегося ведущего АНПА и использует ее для самоконтроля. Предлагаемый метод реализован с монокулярной камерой и светодиодами и его можно использовать на недорогих ведомых АНПА. Для оценки работоспособности предложенного метода было проведено бассейновое испытание с использованием АНПА.

6. Заключение

В статье выполнен обзор текущего состояния использования оптических систем для организации скоростной подводной связи и обеспечения ориентирования АНПА вблизи донных объектов в подводном пространстве. Рассмотрены современные разработки оптических модемов и исследование их работоспособности в подводной среде. Обсуждены вопросы использования оптической связи для управления АНПА и их применения для быстрого сбора

информации с автономных сетей сенсоров, расположенных на дне. Также рассмотрены дополнительные возможности оптических систем для ориентации и приведения АНПА к донным устройствам с целью повышения качества связи и стыковки. Показана актуальность проведения исследований, связанных с разработкой беспроводной оптической связи, которая обеспечивает скрытность и значительно более высокую скорость передачи данных и имеет широкие практические применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smith R. C., Baker K. S. Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // *Applied optics*. 1981. Vol. 20. No 2. P. 177–184.
2. Garrison T. S. *Oceanography: an invitation to marine science* // Cengage Learning, 2012.
3. Kaushal H., Kaddouf G. Underwater optical wireless communication // *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. P. 1518–1547.
4. Risk W. P. et al. *Compact blue-green lasers*. Cambridge University Press, 2003.
5. Aldag H. R., Titterton D. H. From flashlamp-pumped liquid dye lasers to diode-pumped solid-state dye lasers // *Solid State Lasers XIV: Technology and Devices*. International Society for Optics and Photonics, 2005. P. 194–207.
6. Polynkin P. et al. Laser Transmitter for Undersea Communications Using Third-Harmonic Generation of Fiber-Laser System // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2007. Vol. 19. No. 17. P. 1328–1330.
7. Liu W. et al. Non-line-of-sight scattering channel modeling for underwater optical wireless communication // *IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. 2015. P. 1265–1268.
8. Huang A., Tao L. Monte Carlo based channel characteristics for underwater optical wireless communications // *IEICE Transactions on Communications*. 2016.
9. Kim S. et al. Performance of Underwater Laser Communication in Turbid Water // *Proceedings of the OCEANS 2018 MTS/IEEE*. Kobe, Japan, 2018.
10. Matta G. et al. Channel Capacity for Underwater Visible Light Communication Systems // *Proceedings of the OCEANS 2019 MTS/IEEE*. SEATTLE, USA, 2019.
11. Ma L. et al. Experiments of Recreating the Frequency Domain Properties of Seawater Channel for Underwater Optical Communication // *Proceedings of the OCEANS 2019 MTS/IEEE*. Seattle, USA, 2019.
12. Qin J. et al. Simulation of Beam Characteristics in Long-distance Underwater Optical Communication // *Proceedings of the OCEANS 2020 MTS/IEEE*. San-Diego, USA, 2020.
13. www.sonardyne.com
14. www.hydromea.com
15. www.oceanos.ru
16. N. Fair, A. Chave, L. Freitag, J. Preisig, S. White, D. Yoerger and F. Sonnichsen. Optical modem technology for seafloor observatories // *Proceedings of the OCEANS 2006 MTS/IEEE*. Boston, USA, 2006.
17. Doniec M., Vasilescu I., Chitre M., Detweiler C., Hoffmann-Kuhnt M., Rus D. Aquaoptical: A lightweight device for high-rate long range underwater point-to-point communication // *Proceedings of the OCEANS 2009 MTS/IEEE*. Biloxi, USA, 2009.
18. Gois P., Sreekantaswamy N., Basavaraju N., Rufino M., Sebastiao L., Botelho J., Gomes J., Pascoal A. Development and validation of blue ray, an optical modem for the medusa class AUVs // *Proceedings of the IEEE Third Underwater Communications and Networking Conference (UComms)*, 2016.
19. Leon P., Roland F., Brignone L., Opderbecke J. A New Underwater Optical Modem based on Highly Sensitive Silicon Photo-Multipliers // *Proceedings of the OCEANS 2017 MTS/IEEE*. Aberdeen, Scotland, 2017.
20. Ahmad Z., Green R. Link design for multi-hop underwater optical wireless sensor network // *Proc. Int. Conf. Syst. Netw. Commun. (IARIA)*. 2012. P. 65–70.
21. Swathi P., Prince S. Designing issues in design of underwater wireless optical communication system // *2014 International Conference on Communication and Signal Processing*. 2014. P. 1440–1445.
22. Gabriel C. et al. Investigation of suitable modulation techniques for underwater wireless optical communication // *International Workshop on Optical Wireless Communications*. 2012.
23. Anguita D., Brizzolara D., Parodi G. Optical wireless communication for underwater wireless sensor networks: Hardware modules and circuits design and implementation // *OCEANS 2010 MTS/IEEE*. Seattle, 2010. P. 1–8.
24. Mattoussi F., Khalighi M. A., Bourenmane S. Improving the performance of underwater wireless optical communication links by channel coding // *Applied optics*. 2018. Vol. 57. No. 9. P. 2115–2120.
25. Cox W. C. et al. An underwater optical communication system implementing Reed-Solomon channel coding // *Proceedings of the OCEANS 2008*. IEEE, 2008. P. 1–6.
26. Sun R., Habuchi H., Kozawa Y. Underwater Turbo-code optical communication system compatible with partial erasure channel // *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*. 2016. P. 2066–2069.
27. Ковылин А.А., Злобин Д.В., Родионов А.Ю. Анализ частоты повторений RLE-блоков в семействах бинарных кодов, наилучших по минимаксному критерию автокорреляционной функции // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. № 1 (83). С. 99–103.
28. Rodionov, A.Y., Unru, P.P., Kirianov, A.V., Dubrovin, F.S., Kulik, S.Y. Some algorithms for DSSS signal processing with time-shift keying for long-distance underwater communication // *Underwater Technology (UT)*. 2017.

29. Farr N., Bowen A., Ware J., Pontbriand C. An integrated, underwater optical /acoustic communications system. Proceedings of the OCEANS 2010 MTS/IEEE. Sydney, Australia, 2010.
30. www.saabseaeye.com
31. Farr N, Collins J. et al. Wireless Retrieval of High-Rate Ocean Bottom Seismograph Data and Time Synchronization Using the WHOI Optical Modem and REMUS AUV // Proceedings of the OCEANS 2019 MTS/IEEE. Seattle, USA, 2019.
32. Pelletier P., Collins J. et al. Delivery of Accurate Timing to Subsea Instruments via Optical Modem Technology with the Added Benefit of Optical Range Measurement // Proceedings of the OCEANS 2019 MTS/IEEE. Seattle, USA, 2019.
33. Thompson J. et al. Multi-AUV Placement for Coverage Maximization in Underwater Optical Wireless Sensor Networks // Proceedings of the OCEANS 2020 MTS/IEEE. San-Diego, USA, 2020.
34. Joao Sousa. Advancing the EU Marine Robotics Research Infrastructure Network (EUMarine Robots) // Proceedings of the OCEANS 2021 MTS/IEEE. San-Diego, USA, 2021.
35. Park J.Y., Jun B.H. et al. Improvement of vision guided underwater docking for small AUV ISiMI // Proceedings of the OCEANS 2009 MTS/IEEE Conference. Biloxi, USA, 2009.
36. Щербатюк А.Ф., Борейко А.А., Воронцов А.В., Кушнерик А.А. Алгоритмы обработки видео изображений для решения некоторых задач управления и навигации автономных необитаемых подводных аппаратов. // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 1. С. 29–39.
37. Scherbatyuk A., Kushnerik A. and Vorontsov A. Small AUV Docking Algorithms near Dock Unit Based on Visual Data // Proceedings of the OCEANS 2009 MTS/IEEE Conference. Biloxi, USA, 2009.
38. Fitzgibbon A.W., Pilu M., Fisher R.B.. Direct Least Squares Fitting of Ellipses // IEEE Trans. PAMI. 1999. Vol. 21. P. 476–480.
39. Yamada D. et al. Docking Experiment in Dark Environments Using Active/Lighting Marker and HSV Correlation // Proceedings of the OCEANS 2018 MTS/IEEE. Kobe, Japan, 2018.
40. Monden T. et al. Successful Repeated Docking under Fluctuating Current Disturbances in Real Sea // Proceedings of the OCEANS 2019 MTS/IEEE. Seattle, USA, 2019.
41. Hamamatsu Y. et al. Short Range Tracking Method of Underwater Vehicles Based on Vision // Proceedings of the OCEANS 2019 MTS/IEEE. Marseille, France, 2019.

Об авторах

РОДИОНОВ Александр Юрьевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Научные интересы: цифровая гидроакустическая связь и навигация, цифровая обработка сигналов
Тел.: +7(924)245-29-75
E-mail: deodar1618@yandex.ru
ORCID ID: 0000-0003-2931-900X

ЩЕРБАТЮК Александр Федорович, д.т.н., чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН
Адрес: 690041, г. Владивосток, улица Радио, 5
Научные интересы: разработка и использование морских робототехнических комплексов, навигационное обеспечение необитаемых подводных аппаратов
Тел. +7(902)52-38-156
E-mail: alex-scherba@yandex.ru
ORCID ID: 0000-0002-7600-6711

Для цитирования:

Родионов А.Ю., Щербатюк А.Ф. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ И ОРИЕНТАЦИИ В ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ // Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 4(38). С. 37–49. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_38_04_04.