

На правах рукописи



Аронов Леонид Вячеславович

**СИНТЕЗ И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ПО ПОДВОДНОМУ
ОТКРЫТОМУ ОПТИЧЕСКОМУ КАНАЛУ ПЕРЕДАЧИ
ИНФОРМАЦИИ**

Специальность:

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО «РГРТУ»)

Научный руководитель: **Дмитриев Владимир Тимурович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Самойлов Александр Георгиевич**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых»

Мирошникова Наталия Евгеньевна
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»**

Защита состоится «11» февраля 2022 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина» и на официальном сайте университета <http://www.rsreu.ru/post-graduate/dissertatsii>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.375.03
доктор технических наук, доцент



Г. В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Первые подводные инженерные коммуникации – трансатлантические телеграфные кабели были проведены в XIX веке. С тех пор освоение океана значительно продвинулось вперед, прокладываются подводные инженерные коммуникации, функционируют буровые нефте- и газодобывающие платформы, ведутся геологоразведочные работы и научные исследования. Работа на глубине опасна для обслуживающего персонала, требует подготовки и связана с повышенным риском. В этих условиях расширяется использование автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА).

Использование АНПА позволяет снизить риски персонала при работе в сложных и опасных условиях, например при мониторинге подводных трубопроводов, оценке состояния скважин, проведении научных, геологоразведочных и спасательных работ. Управление подводными роботизированными системами, в частности АНПА, требует канала передачи данных, ширина которого достаточна для трансляции нескольких видеопотоков в реальном масштабе времени. Видеопотоки передаются с бортовых камер АНПА на борт пункта управления. К бортовой аппаратуре передачи данных предъявляется ряд дополнительных требований, в частности массогабаритные показатели, энергопотребление и т.д. При этом использование проводного канала неприемлемо из-за ограничения автономности, маневренности и большой парусности. Из существующих подводных каналов передачи информации: акустического, радиочастотного и оптического, только подводный открытый оптический канал обладает требуемыми характеристиками. Однако, несмотря на свою актуальность, реализация систем передачи данных на основе подводных открытых оптических каналов передачи информации (ПООКПИ) на данный момент технически затруднена, и в отличие от атмосферных линий связи серийно выпускаемые ПООКПИ практически отсутствуют, а специализированная компонентная база массово не производится.

Степень разработанности темы. ПООКПИ на основе когерентного источника оптического излучения способен обеспечить пропускную способность, необходимую для передачи с борта АНПА нескольких потоков видеоданных в реальном масштабе времени. Такой канал энергетически незатратен и обладает приемлемыми массогабаритными показателями. Данное направление науки и техники возникло относительно недавно и быстро развивается. Значительный вклад в развитие ПООКПИ внесли Ш.Арнон, Х.Каушал, Л.Джонсон, А.Мазин, С.Йаруватадилек, В.Прайт, А.Исимару, С.Блум,

А.Г.Шереметьев. Следует также отметить работы российских учёных С.Н.Кириллова, В.В.Белова, М.В.Тарасенкова, С.Н.Кузнецова, Р.П.Краснова, Н.Е. Мирошникову, С.Ю.Полякова, А.Г. Самойлова, В.Л. Мартынова, Е.Р. Милютину и др. Эти работы легли в основу разработки действующего прототипа ПООКПИ, предложенного в рамках государственной программы для технологической платформы «Освоение океана» в 2012-2013 гг. (патент RU 2526207 С2).

Первые исследования по этой теме были проведены в 1995 году и показали, что теоретически, при реализации подводного оптического канала, возможно обеспечить скорость передачи данных до 10 Мбит/с на дальности 20 метров и до 1 Мбит/с на дальности 30 метров. Уже в 2005 году были теоретически рассчитаны дальности передачи данных со скоростью 4,4 Мбит/с для морской воды различных типов. В 2006 году была показана возможность организовать ПООКПИ дальностью свыше 100 метров со скоростью передачи данных до 10 Мбит/с. В 2007 году продемонстрирована возможность передачи данных со скоростью до 1 Гбит/с и дальностью более 2 метров. В 2013 году в рамках государственной программы «Освоение океана» Рязанским государственным радиотехническим университетом совместно с АО «Мостком» проведены исследования, в результате которых был создан экспериментальный образец ПООКПИ, обеспечивающий скорость передачи более 100 Мбит/с при вероятности битовой ошибки не более $BER \leq 10^{-9}$, при этом натурные испытания были проведены в бассейне длиной 25 метров. Результаты эксперимента показали принципиальную возможность функционирования разработанного образца ПООКПИ на дальности до 120 метров. Отметим, что существующие коммерческие системы подводной оптической связи фирмы Ambalux corp. (США) обеспечивают скорость передачи данных до 10 Мбит/с на дальности до 40 метров при погружении до 60 м.

Предметом исследования является повышение дальности передачи потоков видеоданных в реальном масштабе времени по подводному открытому оптическому каналу передачи информации.

Цель работы и основные задачи. Цель работы – решение задачи построения подводного открытого оптического канала передачи информации, предназначенного для передачи потоков видеоданных в реальном масштабе времени в интересах управления автономными обитаемыми подводными аппаратами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать процедуру оценки ослабления оптического сигнала в морской воде.

2. Разработать математическую модель ПООКПИ, учитывающую специфику среды распространения, шумы и помехи, особенности оптического приёмника.

3. Обосновать использование в ПООКПИ помехоустойчивого кодирования, исследовать его эффективность и разработать рекомендации по применению.

4. Обосновать выбор обратного канала в системе с ПООКПИ и разработать рекомендации по его проектированию.

5. Разработать структуру ПООКПИ с обратным каналом и рекомендации по проектированию такой системы.

Научная новизна. В ходе настоящей работы получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана процедура расчета коэффициента ослабления оптического излучения в морской воде для видимого диапазона длин волн от 400 нм до 700 нм, с учетом мутности среды распространения. Обобщены и модифицированы существующие методы, добавлен учёт угла рассеяния лазерного излучения в водной среде. Показано, что за счет рассеяния геометрические потери возрастают на величину до 13,5 дБ на расстоянии 100 м. Процедура расчета рассеяния учитывает эффекты частиц, разделяя их на малые (диаметром до 1 мкм) и большие (диаметром свыше 1 мкм). Выполнена аппроксимация коэффициентов молекулярного поглощения воды и коэффициентов поглощения хлорофилла полиномами 8-го и 6-го порядков.

2. Разработана математическая модель ПООКПИ, действующая в диапазоне длин волн 400-700 нм, учитывающая особенности распространения оптического излучения под водой, специфику среды распространения и параметры оптического приёмника и передатчика, в том числе внутренние шумы фотоприёмника, выполненная на основе полупроводникового фотодетектора. Проведено моделирование ПООКПИ для различных типов морской воды с концентрациями хлорофилла от 0,03 до 12 мг/м³. Результатом модели является вероятность битовой ошибки BER, вычисляемая в диапазоне от 10^{-10} до 0,5.

3. Выполнено исследование эффективности использования блоковых корректирующих кодов, обнаруживающих и исправляющих ошибки применительно к подводному оптическому каналу передачи информации. Обосновано применение кодов Рида – Соломона и исследована их эффективность для различных типов морской воды. Пока-

зано, что использование кодов Рида – Соломона в ПООКПИ обеспечивает увеличение максимальной дальности передачи данных не менее чем на 33,3% при полосе канала 100 МГц, не менее чем на 36,4% при полосе канал 1 ГГц и не менее 45,5% при полосе канала 10 ГГц.

4. Выработаны рекомендации по применению корректирующих кодов на основе многокритериального подхода (с учётом требуемого качества видеоизображения, дальности, электрической полосы пропускания ПООКПИ, типа морской воды и кодовой скорости) для передачи видеоизображений в реальном масштабе времени. Показано, что в случае применения 16-ричных кодов Рида – Соломона при полосе канала 100 МГц код РС (15,3,12) обеспечит один видеопоток стандартной четкости 720x480@15 на дальности до 160 метров. Канал с электрической шириной полосы в 1 ГГц может обеспечить от одного [код РС(15,1,14)] до трех [РС(15,3,12)] видеопотоков формата 1280x1024@42,2 на дальности до 128 метров.

5. Обоснован выбор гидроакустической связи в качестве обратного канала ПООКПИ повышающего стабильность его работы, с одновременным использованием в качестве канала управления автономного необитаемого подводного аппарата. Рассчитаны его характеристики для различных типов морской воды с концентрациями хлорофилла от 0,03 до 12 мг/м³ и полос пропускания оптического канала 100 МГц, 1 ГГ и 10 ГГц, с учетом предельных дальностей ПООКПИ.

6. Предложена структура ПООКПИ с обратным гидроакустическим каналом и даны рекомендации по его практической реализации на существующей компонентной базе, позволяющие построить действующий образец с предельной рабочей глубиной до 6000 метров и дальностью передачи данных до 160 метров.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные в ходе исследований результаты внедрены и применяются в АО «Мостком» для расчета энергетического бюджета ПООКПИ, а также используются рекомендации по построению общей схемы системы с ПООКПИ и применению корректирующего кодирования. Кроме того, результаты исследований использованы в АО «Моринсис-Агат-КИП» для разработки системы с ПООКПИ на основе полупроводникового лазера, также используются рекомендации по применению ПООКПИ в морских водах различной замутненности, а математическая модель ПООКПИ применяется в технических проектах. Помимо этого, материалы диссертации используются в учебном процессе Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина в рамках

преподавания учебной дисциплины «Оптические системы передачи». Всё вышеперечисленное подтверждено актами о внедрении.

Методология и методы исследования. Решение поставленных задач проводилось на основе математических и статистических методов анализа с использованием методов компьютерного моделирования. В основе математической модели ПООКПИ лежат аналитические и эмпирические зависимости. Результаты диссертации подтверждены вычислительными экспериментами и согласуются с экспериментальными данными, приведенными в различных источниках.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель подводного открытого оптического канала передачи информации с кодоимпульсной модуляцией по интенсивности, учитывающая специфику распространения оптического излучения в морской воде, параметры оптической приёмной и передающей систем, позволяет оптимизировать характеристики приемо-передающего канала в диапазоне длин волн от 300 до 700 нм с учётом типа морской воды с концентрациями хлорофилла от 0,03 до 12 мг/м³.

2. Рекомендации по применению в подводном открытом оптическом канале передачи информации с кодоимпульсной модуляцией по интенсивности, показывают, что применение 16-ричных кодов Рида – Соломона позволяет увеличить дальность передачи данных на 30% – 45% в зависимости от электрической ширины полосы канала в диапазоне (0,1...10 ГГц) при полосе канала 100 МГц, не менее чем 36,4% при полосе канала 1 ГГц и не менее чем 45,5% для заданных условий моделирования в разных типах морской воды с концентрациями хлорофилла от 0,03 до 12 мг/м³.

3. Выбор и обоснование параметров обратного гидроакустического канала для подводного открытого оптического канала передачи информации позволяют разработать гибридную структуру системы и реализовать её аппаратно на существующей компонентной базе, позволяющей функционировать на дальности до 160 метров.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов обусловлена корректным применением математических преобразований, подтверждена результатами компьютерного моделирования и натурными экспериментами, сходимостью в частных случаях с известными примерами из литературы.

Апробация результатов. Основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

- XXI Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (РГРТУ, 2016);
- XXII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (РГРТУ, 2017);
- Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» (РГРТУ, 2018);
- XXIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (РГРТУ, 2018);
- International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) (Vladivostok, 2018);
- III Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства» (РГРТУ, 2018);
- Международная научно-практическая конференция ICIT-2019 «Информационно-коммуникационные технологии в науке и производстве» (СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2019);
- II Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» (РГРТУ, 2019);
- XXIV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (РГРТУ, 2019);

В 2020 году результаты диссертационной работы за высокие результаты в научно-исследовательской деятельности удостоены премии Губернатора Рязанской области "Молодой учёный года" (7 февраля 2020 года, присуждена распоряжением Губернатора Рязанской области от 04 февраля 2020 г. № 25-рг).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 22 работы, из них 2 в журналах из списка ВАК, 3 индексируются в базах Scopus и Web of Science и 17 в иных печатных изданиях и сборниках.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Общий объём работы составляет 162 страницы, содержащих 52 рисунка и 20 таблиц. Список использованной литературы включает 97 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены общие сведения о проблематике исследования, освещена история вопроса. Показаны актуальность темы исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы.

Первая глава диссертации посвящена построению математической модели ПООКПИ с учётом специфики среды распространения оптических сигналов. Предложена процедура расчета коэффициента ослабления $c(\lambda)$ оптического излучения морской водой на базе однопараметрической модели, в основе которой лежит измерение концентрации хлорофилла C_{cl} (рисунок 1).

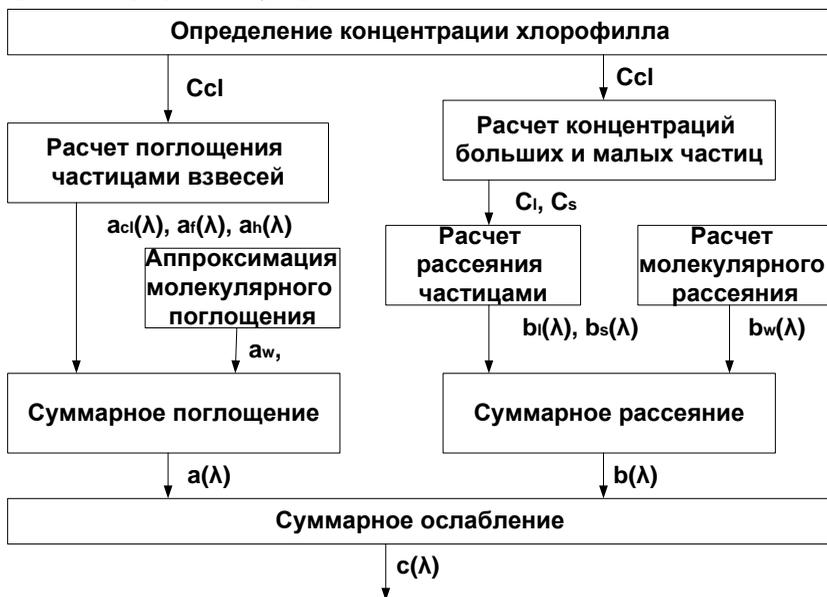


Рисунок 1 – Процедура расчета коэффициента ослабления

Данная процедура учитывает сложный характер ослабления, связанный с тем, что вода является мутной средой, а также различные факторы, оказывающие влияние на распространение оптического сигнала, в том числе коэффициенты поглощения взвесей, таких как хлорофилл $a_{cl}(\lambda)$, фульвовиковая кислота $a_f(\lambda)$, гуминовые кислоты $a_h(\lambda)$, кроме того, учитывается коэффициент молекулярного поглощения

$a_w(\lambda)$. С другой стороны, учитываются потери на рассеяние, в том числе молекулярное рассеяние $b_w(\lambda)$, коэффициенты рассеяния на больших $b_l(\lambda)$ и малых частицах $b_s(\lambda)$, которые связаны с их концентрациями $C_l(\lambda)$ и $C_s(\lambda)$ в морской воде. Результатом является суммарное ослабление $c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$, где $a(\lambda)$ – суммарный коэффициент поглощения, а $b(\lambda)$ – суммарный коэффициент рассеяния. Обобщенная математическая модель ПООКПИ с КИМ-ИМ (кодоимпульсная модуляция по интенсивности) позволяет рассчитать мощность $P_{ПрМ}$, падающую на чувствительную площадку фотоприёмника:

$$P_{ПрМ} = P_{ПрД} \frac{D_{ПрМ}^2}{(D_{ПрД} + 2L_m \cdot tg(\theta_{div}))} 10^{\left(\frac{c_{dB}(\lambda)L_m}{10}\right)} \tau_{ПрД} \tau_{ПрМ},$$

где $P_{ПрД}$ – оптическая мощность передатчика, Вт; $D_{ПрМ}$ – диаметр приёмной апертуры, м; $D_{ПрД}$ – диаметр передающей апертуры, м; L_m – дальность передачи данных, м; $c_{dB}(\lambda)$ – суммарное ослабление, дБ/м; $\tau_{ПрД}$ – коэффициент пропускания передающей оптической системы; $\tau_{ПрМ}$ – коэффициент пропускания приёмной оптической системы; θ_{div} – угол рассеяния лазерного излучения в морской воде, зависящий от расстояния и определяемый по формуле:

$$\theta_{div}^2 = \frac{2\sqrt{\pi}\mu^2 f_c^2}{n_w^2 D_c} L_m.$$

где μ – среднее квадратичное отклонение коэффициента преломления; f_c – относительная концентрация частиц; n_w – коэффициент преломления морской воды; D_c – средний радиус частиц, м.

На основании физических свойств, а также в результате аппроксимации Пуассоновского распределения нормальным и ряда математических преобразований получены и обоснованы функции плотности вероятностей (ФПВ) для смеси шумов:

$$W_n(i_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left(-\frac{(i_n - \langle i_n \rangle)^2}{2\sigma_n^2}\right),$$

где σ_n^2 – дисперсия шума; i_n – шумовой ток; $\langle i_n \rangle$ – среднее значение шумового тока. Кроме того, обоснованы ФПВ смеси сигнал+шум:

$$W_{s+n}(i_{s+n}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_n^2 + \sigma_s^2)}} \exp\left(-\frac{(i_{s+n} - (\langle i_s \rangle + \langle i_n \rangle))^2}{2(\sigma_n^2 + \sigma_s^2)}\right),$$

где σ_s^2 – дисперсия сигнала; i_{s+n} – ток смеси сигнал+шум; $\langle i_s \rangle$ – среднее значение тока сигнала. Полученные ФПВ используются для определения вероятности битовой ошибки (BER).

В ПООКПИ с модуляцией КИМ-ИМ вероятность битовой ошибки определяется по формуле:

$$P_e^B = \frac{1}{2} \left(1 - \int_{I_{II}}^{\infty} (W_{s+n}(i) + W_n(i)) di \right),$$

где I_{II} – пороговое значение фототока.

В качестве примера был рассмотрен ПООКПИ с передатчиком на основе синего лазерного диода NDB4116 с мощностью излучения 100 мВт и фотоприёмником на основе фотодиода S5973-02 с пиком чувствительности на длине волны 450 нм. При использовании такого ПООКПИ с модуляцией КИМ-ИМ на дистанции от 10 до 120 м вероятность ошибочного приема составит от $6,6 \cdot 10^{-11}$ до 0,01. Возможно увеличение дальности за счёт снижения скорости передачи данных, однако нужно учитывать, что электрическая ширина полосы пропускания канала должна обеспечивать возможность передачи видеоизображений в реальном масштабе времени.

Во второй главе исследован вопрос применения помехоустойчивого кодирования, а именно корректирующих кодов, обнаруживающих и исправляющих ошибки. Проведен сравнительный анализ блочных кодов применительно к задаче передачи видеоизображения в ПООКПИ в реальном масштабе времени. Получены значения предельных дальностей передачи данных для воды типа «прозрачное море» (при сохранении данных в главе 1 условий моделирования) для различных кодов Рида – Соломона для подводного оптического канала с шириной полосы 100 МГц, 1 ГГц и 10 ГГц при допустимых значениях битовой ошибки $BER \leq 10^{-6} \dots 10^{-8}$ (таблицы 1, 2).

Таблица 1 – Дальность передачи видеоданных при использовании 8-ричных кодов

Код РС	Электрическая полоса пропускания канала	Дальность передачи данных, м	
		$BER = 10^{-6}$	$BER = 10^{-8}$
РС (7,3,4)	100 МГц	152	142
	1 ГГц	120	112
	10 ГГц	96	87
РС (7,1,6)	100 МГц	158	152
	1 ГГц	126	120
	10 ГГц	98	93

Таблица 2 – Дальность передачи видеоданных при использовании 16-ричных кодов

Код РС	Электрическая полоса пропускания канала	Дальность передачи данных, м	
		$BER = 10^{-6}$	$BER = 10^{-8}$
РС (15,9,6)	100 МГц	153	147
	1 ГГц	117	96
	10 ГГц	95	90
РС (15,7,8)	100 МГц	157	152
	1 ГГц	125	120
	10 ГГц	97	93
РС (15,5,10)	100 МГц	160	155
	1 ГГц	127	123
	10 ГГц	99	95
РС (15,3,12)	100 МГц	163	158
	1 ГГц	130	126
	10 ГГц	102	98
РС (15,1,14)	100 МГц	165	160
	1 ГГц	133	128
	10 ГГц	103	100

Использование 16-ричных кодов Рида – Соломона (РС) дает значительный выигрыш в достижимом расстоянии. Например, код РС(15,9,6) позволяет увеличить дальность передачи видеоданных на 52

метра, по сравнению с каналом без кодирования, при электрической полосе пропускания 100 МГц, для кода РС(15,1,14) выигрыш возрастёт до 65 метров, по сравнению с ПООКПИ без коррекции ошибок.

Анализ таблиц 1 и 2 даёт основание предположить, что существует предел, до которого можно увеличивать дальность передачи данных в ПООКПИ путём снижения кодовой скорости. Для оценки этого предела был произведён расчёт предельного расстояния передачи данных с помощью кода РС(255,1,254). Этот код имеет кодовую скорость 0,004, что позволяет передавать видеопоток со скоростью 13 Мбит/с по ПООКПИ с электрической шириной полосы пропускания 10 ГГц. Расчёт показывает, что для канала 100 МГц дальность составит 182 м, для канала 1 ГГц – 148 м и для канала 10 ГГц – 108 м. Полученные дальности передачи данных можно охарактеризовать как предел возможностей передачи видеоизображения в ПООКПИ при заданных параметрах моделирования. Дальнейшее увеличение дальности потребует либо наращивания мощности фотопередатчика, либо увеличения чувствительности фотоприёмника, либо иных технических решений, связанных с ростом энергопотребления, массогабаритных показателей и стоимости аппаратной части.

В третьей главе проведен сравнительный анализ и обосновано использование гидроакустического канала (ГАК) в качестве обратного для ПООКПИ. Структурная схема такой системы представлена на рисунке 2.

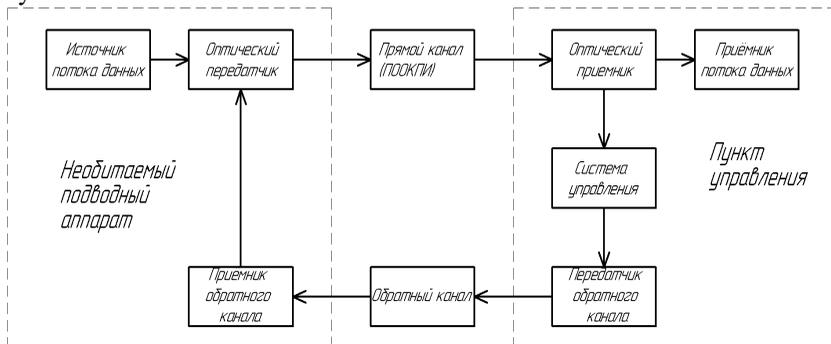


Рисунок 2 – Структурная схема ПООКПИ с обратным каналом

Рассмотрены типы используемых в подводной среде каналов передачи информации: гидроакустический, оптический и радиочастотный, и проведен их сравнительный анализ.

Проведенный расчёт параметров гидроакустического канала показал, что оптимальная частота акустической несущей $f_{\text{ОПТ}}$ соответствует коэффициенту пространственного затухания $\alpha_{\text{ГЛК}}$ от 38 до 40 дБ/км, рассчитанному по формуле Торпа. Использование данной формулы целесообразно при решении поставленной задачи, так как расстояние передачи данных незначительное, а работа АНПА с системой передачи данных на основе ПООКПИ предполагается в условиях большой глубины. При этом акустические свойства морской воды не связаны с её оптическими свойствами, т.е. на малых расстояниях в водах типа «прибрежные воды» обеспечивается надежная передача данных с потерями при распространении 15,8 дБ – 19,9 дБ. В морской воде типа «прозрачное море» теряется от 37,2 дБ до 50 дБ акустической энергии, в «чистом океане» – от 29 дБ до 35,2 дБ на дальностях работы ПООКПИ, соответствующих вероятности битовой ошибки $BER \leq 10^{-8}$.

На основании анализа гидроакустических каналов с различными параметрами можно утверждать, что при применении наиболее эффективного 16-ричного кода РС(15,1,14) оптимальные акустические частоты, рассчитанные с учётом предельного расстояния передачи данных ПООКПИ для разных типов вод, равны:

«прозрачное море» – 210,4 – 287,8 кГц;

«чистый океан» – 479,5 – 574 кГц;

«прибрежные воды» – 1618,1 – 1877,7 кГц.

Кроме того, в данной главе обоснованы рекомендации по параметрам модемов и антенн гидроакустического канала для работы в качестве обратного канала ПООКПИ в водах различных типов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы были получены следующие результаты:

1. Разработана процедура расчета коэффициента ослабления, основанная на однопараметрической модели корреляции концентрации хлорофилла, содержащегося в фитопланктоне, с параметрами воды, влияющими на поглощение и рассеяние. К таким параметрам относятся концентрации фульвиковых и гуминовых кислот, концентрации больших (более 1 мкм в диаметре) и малых (менее 1 мкм в диаметре) частиц. Кроме того, учитываются молекулярное поглощение, которое в интересах данной работы было аппроксимировано функциональной зависимостью на основе табличных данных, и молекулярное рассеяние, носящее

релеевский характер. Была получена путём аппроксимации функциональная зависимость для усреднённого значения поглощения хлорофилла.

2. Разработана математическая модель ПООКПИ с модуляцией КИМ-ИМ, учитывающая специфику среды распространения. Обоснованы законы распределения шумов фотоприёмника. Модель достаточно универсальна, подходит для различных типов фотоприёмников, может применяться в разных типах морских вод. Результатом использования модели являются зависимости мощности сигнала на чувствительной площадке фотоприёмника или вероятность битовой ошибки от расстояния между оптическим приёмником и оптическим передатчиком.

3. Исследован вопрос применения помехоустойчивого (корректирующего) кодирования с использованием кодов, исправляющих и обнаруживающих ошибки применительно к подводному открытому оптическому каналу передачи информации. Рассчитаны предельные дальности передачи данных при выбранных параметрах моделирования на основании выражений для энергетического выигрыша канала (ЭВК). Обосновано использование кодов Рида – Соломона, рассчитаны предельные дальности передачи данных для различных кодов РС и написаны рекомендации по их применению.

4. Обоснован выбор ГАК в качестве обратного для ПООКПИ. Показано, что обратный ГАК влияет на стабильность работы оптического канала, при этом он может одновременно выполнять функцию канала управления АНПА; рассчитаны оптимальные акустические частоты для применения в ПООКПИ, работающих в разных типах воды и передающих информацию с разными кодовыми скоростями, и другие характеристики ГАК, применяемого в качестве обратного канала.

5. Разработана структурная схема системы передачи данных, включающей в себя ПООКПИ с обратным ГАК. Даны рекомендации по её проектированию и использованию компонентной базы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. Кириллов С.Н. Определение характеристик подводного открытого оптического канала передачи информации на больших глубинах [Текст] / С. Н. Кириллов, Л. В. Аронов // Вестник РГРТУ, 2018. № 1 (63). С. 40-48.

2. Кириллов С.Н. Пропускная способность подводного оптического канала передачи информации с кодоимпульсной модуляцией по

интенсивности [Текст] / С. Н. Кириллов, Л. В. Аронов // Вестник РГРТУ 2020. № 4 (74). С. 3-13. DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-3-13.

Работы, входящие в базы данных Web of Science и Scopus:

3. Kirillov S.N. Wireless System of High-Speed Underwater Optical Communication for Transmission for Videodata from a Board of a Submersible [Текст] / S.N. Kirillov, V.T. Dmitriev, L.V. Aronov // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2018, P.4

4. Kirillov S. Improved Quality Video Transmission by Optical Channel from Underwater Mobile Robots [Текст] / S. Kirillov, V. Dmitriev, L. Aronov, P. Skonnikov, A. Baukov // Studies in Systems, Decision and Control, vol 199, Springer, 2019. P. 227-239

5. Kirillov S. Adaptive software-configurable system development to receive, transmit and process information [Текст] / S. Kirillov, A. Lisnichuk, A. Batishchev, L. Aronov, A. Baukov // 2020 International Scientific and Technical Conference Modern Computer Network Technologies (MoNeTeC). Moscow, Russia, 2020. P. 62-67.

Работы, опубликованные в других изданиях:

6. Аронов Л. В. Статистическая модель подводного оптического канала передачи информации [Текст] / Л. В. Аронов, С. Н. Кириллов // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов – Рязанский государственный радиотехнический университет, 2014. 268 с. , С. 93 – 94.

7. Аронов Л. В. Разработка подводной беспроводной оптической линии связи для роботизированных комплексов [Текст] / Л. В. Аронов, С. Н. Кириллов // Материалы I научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета. Рязань : РГРТУ , 2015 . 64 с. , С. 40 – 41

8. Кириллов С. Н. Открытый оптический канал связи в подводных роботизированных системах [Текст] / С. Н. Кириллов, Л. В. Аронов // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 18-й Международной науч.-техн. конф.: Горячая-линия Телеком, 2015. – 332 с., с. 59-61

9. Аронов Л.В. Канал связи на основе когерентного источника оптического излучения [Текст] / Л. В. Аронов // Новые информационные технологии в научных исследованиях материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и

специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет. 2016. С. 117-118.

10. Аронов Л.В. Процедура расчета энергетического бюджета подводного открытого оптического канала передачи информации [Текст] / Л. В. Аронов // Новые информационные технологии в научных исследованиях материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет. 2017. С. 84-86.

11. Кириллов С.Н. Имитационное моделирование подводного канала передачи информации на основе источника когерентного оптического излучения [Текст] / С. Н. Кириллов, Л. В. Аронов // Методы и средства обработки и хранения информации : Межвузовский сборник научных трудов / под ред. Б.В. Кострова; Рязанский государственный радиотехнический университет. 2018. С. 191-195.

12. Кириллов С.Н. Моделирование переноса излучения в подводном открытом оптическом канале передачи информации методом Монте-Карло [Текст] / С. Н. Кириллов, Л. В. Аронов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2018 [текст]: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 10 т. Т.1./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2018; Рязань. 328 с. С. 187-193.

13. Аронов Л.В. Моделирование отношения сигнал-шум подводного открытого оптического канала передачи информации [Текст] / Л. В. Аронов // Информационные технологии, межвузовский сборник научных трудов. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2018. С. 7-10

14. Аронов Л.В. Обнаружение сигнала в подводном открытом оптическом канале передачи информации при воздействии внешних шумов [Текст] / Л.В. Аронов // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах межвуз. Сб. науч. Тр. / под ред. Ю.Н. Паршина . Рязань: РГРТУ, 2018. С. 70-74

15. Аронов Л.В. Обнаружение сигнала на фоне шумов в подводном открытом оптическом канале передачи информации [Текст] / Л. В. Аронов // Новые информационные технологии в научных исследованиях материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Том 1. Рязанский государственный радиотехнический университет 2018. С. 114-115

16. Кириллов С.Н. Обнаружение оптического сигнала на фоне шумов фотодетектора [Текст] / С.Н. Кириллов, Л.В. Аронов // Актуальные проблемы современной науки и производства Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. 2018. С. 188-191.

17. Аронов Л.В. Геометрические потери в подводном канале передачи информации на основе источника когерентного оптического излучения [Текст] / Л. В. Аронов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019 : сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 10 т. Т.1./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2019; Рязань. 206с. С. 118-121.

18. Аронов Л.В. Шумовые характеристики подводного открытого оптического канала передачи информации [Текст] / Л. В. Аронов // Новые информационные технологии в научных исследованиях материалы XXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань : ИП Коняхин А.В. (BookJet), 2019. с. 116-117

19. Аронов Л.В. Оценка предельной дальности передачи информации в подводном открытом оптическом канале при использовании кодов Рида-Соломона [Текст] / Л. В. Аронов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2020 [Текст]: сб. тр. III междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.1 / под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2020; Рязань. 208 с. С. 192-196.

20. Аронов Л.В. Повышение предельной дальности передачи информации в подводных открытых оптических каналах с помощью кодирования [Текст] / Л.В.Аронов // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сб. науч. ст. по материалам IV Всерос. науч.практ. конф.: в 2 ч. Ч. 1 / редкол.: В. Г. Андронов (отв. ред.) [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск,2020. 208 с. С. 196-199.

21. Аронов Л.В. Обратный канал в системе с подводным открытым оптическим каналом передачи видеоинформации [Текст] / Л. В. Аронов //Новые информационные технологии в научных исследованиях. материалы XXV Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2020. С. 69-70.

22. Аронов Л.В. Сравнение предельной дальности кодоимпульсной и позиционной модуляций по интенсивности в подводном лазерном канале [Текст] / Л. В. Аронов // Актуальные проблемы современной науки и производства. материалы V Всероссийской научно-технической конференции. Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина. Рязань, 2020. С. 80-87.

Аронов Леонид Вячеславович

**СИНТЕЗ И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ПО
ПОДВОДНОМУ ОТКРЫТОМУ ОПТИЧЕСКОМУ КАНАЛУ
ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __. __.21. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ _____

Рязанский государственный радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.