

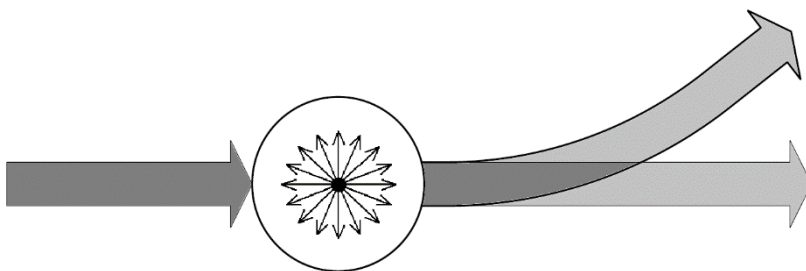
7942

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Ф. УТКИНА**

ИЗУЧЕНИЕ ПОДВОДНОГО БЕСПРОВОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Методические указания
к лабораторной работе



Рязань 2024

УДК 621.372.8

Изучение подводного беспроводного оптического канала передачи данных: методические указания к лабораторной работе / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост. Л.В. Аронов. Рязань, 2024. 12 с.

Содержат описание лабораторной работы. Продолжительность работы 4 часа, домашняя подготовка к работе – 4 часа.

Предназначены для проведения лабораторных работ в лаборатории устройств СВЧ и антенн имени лауреата Государственной премии, заслуженного деятеля науки и техники, доктора технических наук, профессора Василия Ивановича Поповкина при изучении дисциплины «Оптические системы передачи» для направления подготовки бакалавров 11.04.01 Инфокоммуникационные технологии и системы связи.

Табл. 5. Ил. 7. Библиогр. : 16 назв.

Оптические системы передачи, модуляция, лазерная связь, подводная связь

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра РУС Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой доц. В.Т. Дмитриев)

Изучение подводного беспроводного оптического
канала передачи данных

Составитель А р о н о в Леонид Вячеславович

Редактор М.Е. Цветкова

Корректор И.В. Черникова

Подписано в печать 30.08.2024. Формат бумаги 60х84 1/16 .

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ИЗУЧЕНИЕ ПОДВОДНОГО БЕСПРОВОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Освоение океана – интенсивно развивающееся направление человеческой деятельности, прокладываются подводные инженерные коммуникации, функционируют буровые нефте- и газодобывающие платформы, ведутся геологоразведочные работы и научные исследования. Работа на глубине является опасной для обслуживающего персонала, требует подготовки и связана с повышенным риском. В этих условиях развивается использование автономных необитаемых подводных аппаратов.

Управление подводными роботизированными системами требует канала передачи данных, ширина которого достаточна для трансляции нескольких видеопотоков в реальном масштабе времени. При этом классифицировать их можно следующим образом:

1) видеоизображение стандартной чёткости, наиболее распространенный видеоформат для трансляции в интернете 720x480@15 (максимальное количество кадров в секунду – 15);

2) видеоизображение 1280x1024@42,2 (максимальное количество кадров в секунду – 42,2);

3) видеоизображение 1920x1080@30,1 (максимальное количество кадров в секунду – 30,1);

4) видеоизображение высокой чёткости 4096x2048@30 (максимальное количество кадров в секунду – 30).

Видеопотоки передаются с бортовых камер автономного необитаемого подводного аппарата на борт пункта управления. К бортовой аппаратуре передачи данных предъявляется ряд дополнительных требований, в частности массогабаритные показатели, энергопотребление и т.д. Из существующих подводных каналов передачи информации: акустического, радиочастотного и оптического, только подводный беспроводной оптический канал обладает требуемыми характеристиками.

Первые исследования по этой теме были проведены в 1995 году и показали, что скорость передачи данных составляет до 10 Мбит/с на дальности 20 метров и до 1 Мбит/с на дальности 30 метров. В 2005 году рассчитаны дальности передачи данных со скоростью 4,4 Мбит/с для морской воды различных типов. В 2006 году была показана возможность организовать подводный беспроводной оптический канал связи (ПБОКС) дальностью свыше 100 метров со скоростью передачи

данных до 10 Мбит/с. В 2007 году продемонстрирована возможность передачи данных на скорости до 1 Гбит/с и дальностью более 2 метров. В 2013 году, «Рязанским государственным радиотехническим университетом совместно с АО «Мостком» проведены исследования, в результате которых была показана принципиальная возможность функционирования разработанного образца ПООКПИ на дальности до 120 метров.

Морская вода является мутной средой, что означает, что ослабление оптического излучения в ней имеет сложную природу и обусловлено двумя независимыми физическими явлениями: поглощением и рассеянием (рис. 1).

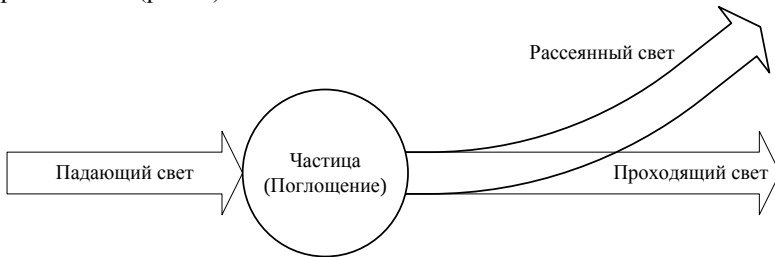


Рис. 1. Физическая природа ослабления излучения в морской воде

Оптические свойства океана зависят от сочетания, концентрации и морфологии частиц и растворенных веществ. Распространение излучения оптического диапазона в океанской воде носит сложный характер и подвержено множеству влияний, обусловленных типом океанической воды (рис. 2).

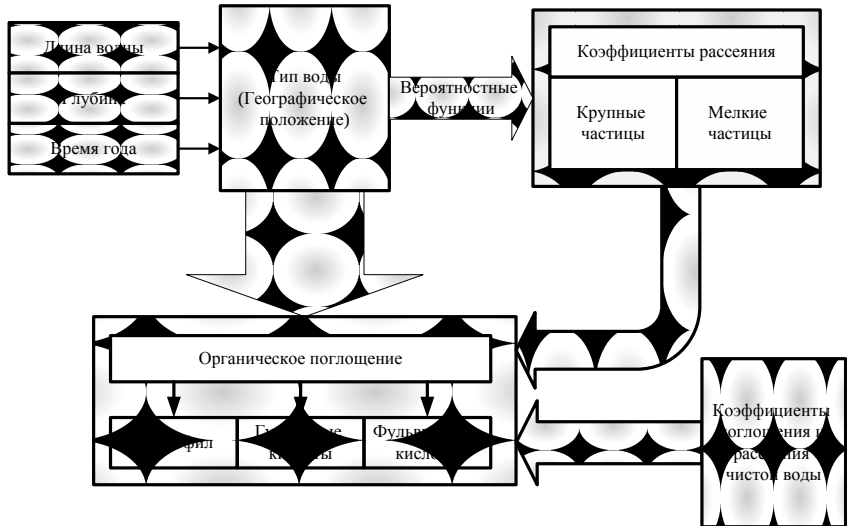


Рис. 2. Модель ослабления излучения оптического диапазона

Обычно для расчетов используется однопараметрическая модель поглощения-рассеяния, основанная на измерении концентрации хлорофилла в морской воде. Данная модель учитывает в том числе молекулярное поглощение и рассеяние. Средние значения и стандартные отклонения молекулярного поглощения воды измерены во всем видимом диапазоне длин волн и не зависят от концентрации органических и иных взвесей в воде.

Морская вода представляет собой водный раствор минеральных солей, таких как NaCl , MgCl_2 , Na_2SO_4 , CaCl_2 , KCl . Это сочетание обуславливает сложный спектр поглощения оптического излучения. При этом в отличие от атмосферных оптических линий связи значительная величина коэффициента поглощения наблюдается в инфракрасной части (типичное значение 10^4 м^{-1}), а в видимой части спектра оптического излучения (400 – 700 нм) происходит его значительное снижение (рис.3).

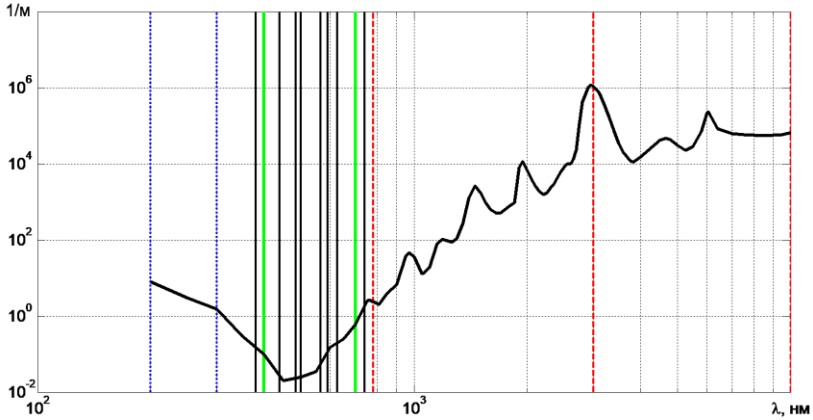


Рис. 3. Поглощение оптического излучения чистой водой в интервале длин волн 200 - 10000 нм

Расчёты показывают, что оптимальной, по критерию минимума затухания, длиной волны для прозрачной морской воды является длина волны 445 нм.

Кроме потерь на трассе распространения, вызванных рассеянием и поглощением лазерного излучения в морской воде, присутствуют также так называемые геометрические потери. Эти потери вызваны расходимостью лазерного луча в среде распространения (рис. 4).

Энергия лазера сосредоточена в узком луче, расширяющемся с некоторым углом расходимости θ_{div} , который для передающих оптических систем составляет единицы мрад. Этот угол зависит от диаметра передающей апертуры оптического передатчика и рассеивающих свойств среды распространения (рис. 4).

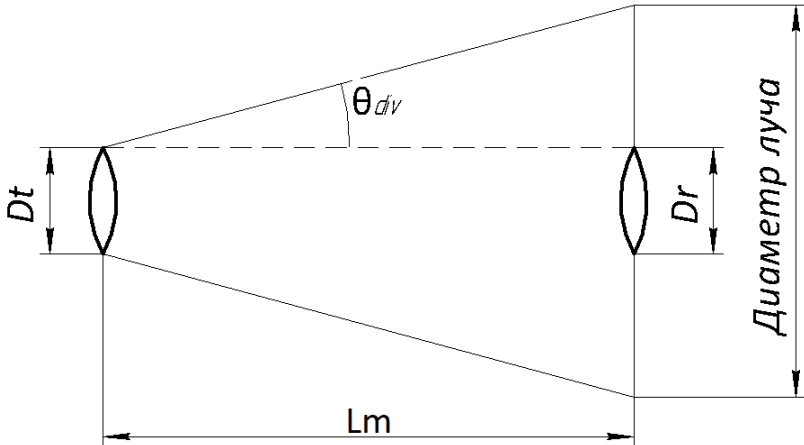


Рис. 4. Иллюстрация геометрических потерь

По мере удаления от источника излучения диаметр светового пятна, создаваемого лазерным лучом в точке приёма, расширяется, и на определенном расстоянии между фотоприёмником и оптическим передатчиком его размер превысит размер приёмной апертуры, в результате чего часть энергии оптического излучения будет проходить мимо фотоприёмника. Уменьшение энергетического бюджета, вызванное данным явлением, называется геометрическими потерями и определяется как отношение площади передающей апертуры к площади сечения лазерного луча в точке приёма.

Ослабление оптического сигнала в морской воде носит комплексный характер и обусловлено двумя независимыми физическими явлениями: поглощением и рассеянием. Однопараметрическая модель учитывает молекулярное рассеяние и поглощение. Молекулярное рассеяние носит релеевский характер. Поглощение и рассеяние на частицах коррелируют с концентрацией хлорофилла в морской воде и определяются на основании эмпирических формул. Блок-схема процедуры расчета энергетического бюджета ПООКПИ показана на рис.5.

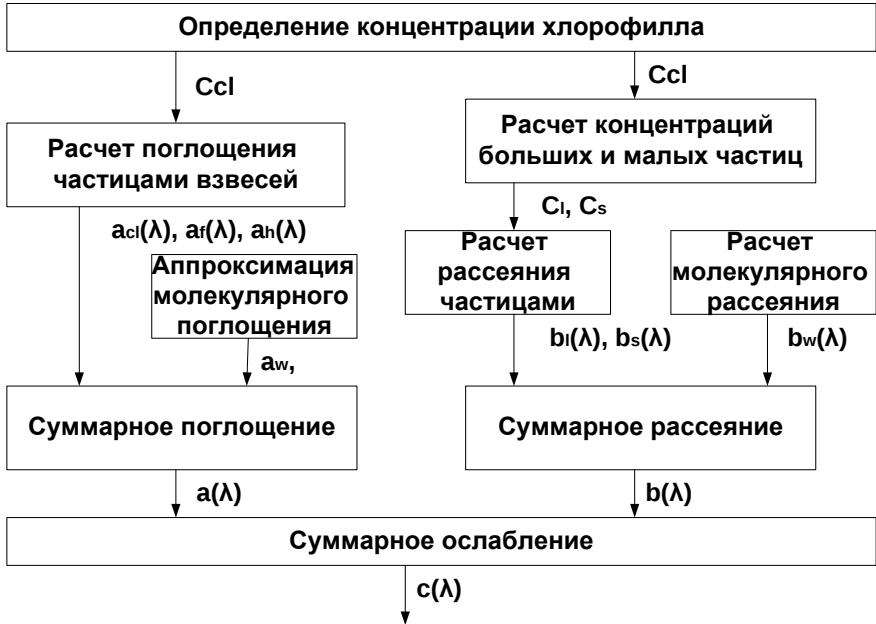


Рис. 5. Процедура расчета коэффициента ослабления

В процедуре расчета энергетического бюджета ПООКПИ исходными данными являются: длина волны, тип воды по Н.Г. Жерлову (или концентрация хлорофилла), мощность передатчика, чувствительность приемника и расстояние между приемной и передающей системами (табл. 1).

Таблица 1. Классификация океанских вод по Жерлову

Тип воды	Концентрация хлорофилла, $\text{мг}/\text{м}^3$	
	[1]	[2]
Прозрачное море	0,03	0,005
Чистый океан	0,4	0,31
Прибрежные воды	3	0,83
Мутные бухты	12	5,9

Процедура расчета поделена на ряд последовательных этапов:

- 1) определение концентрации больших (более 1 мкм) и маленьких (менее 1 мкм) частиц;
- 2) определение коэффициентов поглощения большими и маленькими частицами;
- 3) расчет коэффициентов поглощения хлорофиллом, частицами и органическими взвесями;

- 4) расчет коэффициента молекулярного рассеяния;
- 5) расчет коэффициента молекулярного поглощения;
- 6) суммирование коэффициентов поглощения и коэффициентов рассеяния с учетом концентраций больших и малых частиц;
- 7) расчет затухания мощности передатчика на заданном расстоянии;
- 8) расчет требуемой мощности передающей системы и оценка возможности технической реализации с учётом существующих ограничений на потребляемую мощность, элементную базу и т.д.

В беспроводных оптических системах передачи информации наиболее распространена кодоимпульсная модуляция по интенсивности (КИМ-ИМ). Средняя вероятность ошибки на двоичную единицу, для данного вида модуляции вычисляется по формуле [3]:

$$P_e^B = p(1 - P_{SN}^B) + (1 - p)P_N^B, \quad (1)$$

где p – априорная вероятность передачи двоичной единицы;

P_{SN}^B – вероятность того, что смесь полезного сигнала с аддитивными шумами превысит пороговый уровень I_{II} ;

P_N^B – вероятность того, что шум превысит пороговый уровень I_{II} .

В случае равновероятной передачи «нулей» и «единиц» формула (1) приобретет вид:

$$P_e^B = \frac{1}{2}(1 - P_{SN}^B + P_N^B). \quad (2)$$

При этом необходимо учитывать собственные шумы фотоприёмника и фоновые шумы среды распространения.

ЦЕЛИ РАБОТЫ

Изучить особенности распространения оптического сигнала в мутных средах на примере морской воды и овладеть понятиями о закономерностях взаимосвязи между дальностью передачи сигнала, вероятностью битовой ошибки, скоростью передачи сигнала и степенью его ослабления.

Приобрести навыки работы в среде программирования Octave.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА «ПОДВОДНЫЙ БЕСПРОВОДНОЙ ОПТИЧЕСКИЙ КАНАЛ СВЯЗИ С МОДУЛЯЦИЕЙ КИМ-ИМ»

Программа предназначена для компьютерного моделирования подводного беспроводного оптического канала связи с модуляцией КИМ-ИМ (кодоимпульсная модуляция по интенсивности). Запуск тре-

бует предустановленного на компьютере Octave – распространяемого по лицензии GPL.

Программа «Подводный беспроводной оптический канал связи с модуляцией КИМ-ИМ» (Авторское свидетельство № 2023680394) состоит из основной программы: OneRayChannel22021103.m; и файлов подпрограмм:

- DivAngle.m (расчет угла рассеяния);
- POOKPI_att.m (расчет коэффициента ослабления);
- POOKPI_BER_PCM.m (расчет вероятности битовой ошибки для кодоимпульсной модуляции по интенсивности);
- POOKPI_noise.m (расчёт шумов в подводном беспроводном оптическом канале);
- POOKPI_pow.m (расчёт мощности на чувствительной площадке фотоприёмника);
- POOKPI_RS_BER.m (расчет вероятности битовой ошибки при использовании кода Рида_Соломона).

Для работы с программой необходимо запустить **Octave**, затем в меню «Файл» выбрать «Открыть» и в появившемся диалоговом окне найти и открыть файл **OneRayChannel22021103.m** в каталоге, указанном преподавателем.

В появившемся окне редактора переменных найти раздел программы «Ввод исходных данных» (рис. 6).

```

%%BВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
Nlas=1;%Номер передающего лазера
%1- NDB4116 (синий 430-470)
%2- NDG4216 (зелёный 500-540)
%3- QLF063A/QLF063B (красный 620-700)
%4- NDA4116 (голубой 470-500)
WaterType=1;%Тип воды (мутность океана)
% 1 - прозрачное море, 0.03 мг/м3
% 2 - чистый океан, 0.4 мг/м3
% 3 - прибрежные воды, 3 мг/м3
% 4 - мутные бухты, 12 мг/м3
BitRate=4;%Скорость передачи данных, Мбит/с
%Dля видеопотока стандартной чёткости 720x480@15 - 4Мбит/с
n=1;%Размер блока кода Рида-Соломона
k=1;%Число информационных символов
Lmmin=100;%Начальная дальность, м
Lmmax=200;%Конечная дальность, м
Nr=10;%Число точек на графике

```

Рис. 6. Фрагмент программы моделирования, содержащий входные переменные

Перед запуском программы необходимо установить значения переменных, обозначающих исходные данные моделирования (табл. 2)

Таблица 2. Входные параметры моделирования

№	Переменная	Описание
Основные параметры физического канала		
1	Nlas	Номер передающего лазера из списка
2	WaterType	Тип воды. В соответствии с классификацией Н.Г.Жерлова, характеризующий мутность океана, выраженную через концентрацию хлорофилла
3	BitRate	Скорость передачи данных, Мбит/с
Параметры помехоустойчивого кодирования		
4	n	Размер блока кода Рида - Соломона (при $n=1$ – сигнал передается без кодирования)
5	k	Число информационных символов в блоке (не превышает n)
Параметры выходных графиков		
6	Lmmin	Начальное расстояние от оптического передатчика, для которого проводится моделирование, м
7	Lmmax	Конечное расстояние от оптического передатчика, для которого проводится моделирование, м
8	Np	Число точек на выводимых графиках

ВАЖНО!!! Перед непосредственно запуском требуется ознакомиться с назначением входных переменных моделирования, их расположением в программе и интерфейсом среды программирования Octave.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Запустить программу «Подводный беспроводной оптический канал связи с модуляцией КИМ-ИМ».
2. Установить параметры помехоустойчивого кодирования $n=1, k=1$ (соответствует режиму «**без кодирования**»).
3. Выбрать номер передающего лазерного диода в соответствии с вариантом (*Nlas*), указанным преподавателем (табл. 3).

Таблица 3. Варианты работы

№	Тип лазерного диода	Скорость передачи данных, Мбит/с
1	NDB4116	4
2	NDG4216	4
3	NDA4116	4

4	NDB4116	20
Окончание таблицы 3		
5	NDG4216	20
6	NDA4116	20

4. Установить скорость передачи данных в соответствии с вариантом (переменная BitRate)

5. Запустить программу на выполнение, и построить графики зависимости мощности оптического сигнала на фотоприёмнике и вероятности битовой ошибки (BER) от расстояния для трёх типов морской воды (1-3 по Н.Г. Жерлову) согласно табл. 4.

Таблица 4. Зависимость BER и принятой мощности от расстояния

BER	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
Расстояние, м							
Принятая мощность, дБм							

При этом для удобства работы верхняя и нижняя границы, устанавливаемые переменными L_{min} и L_{max} , выбираются таким образом, чтобы зависимость вероятности битовой ошибки (BER) от расстояния имела плавный изгиб, охватывающий значения от 10^{-10} до 10^{-4} (рис. 7).

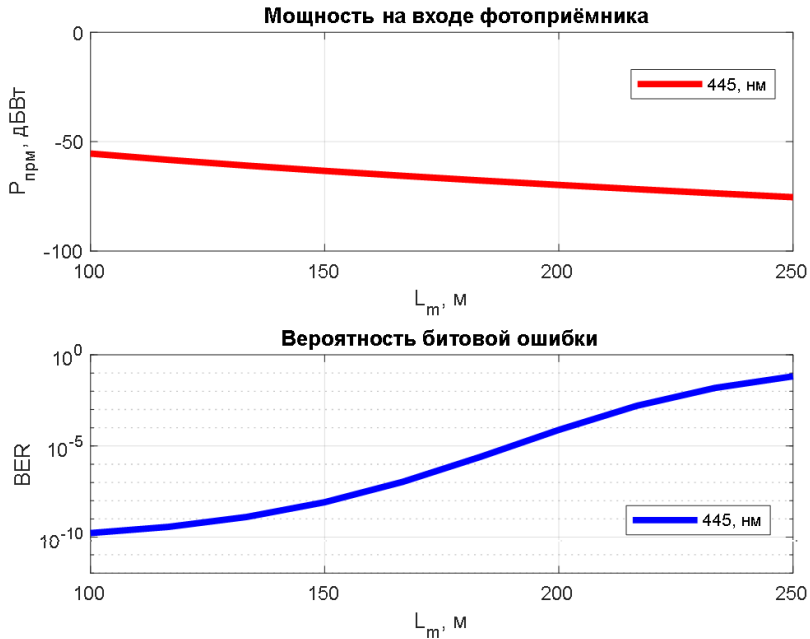


Рис. 7. Результат работы программы

6. На основе данных п. 3 построить графики зависимости вероятности битовой ошибки от принятой мощности для трёх типов воды в одной системе координат.

Таблица 5. Зависимость BER от принятой мощности

	Тип воды	BER						
		10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
Принятая мощность, дБм	1							
	2							
	3							

Сделать выводы.

7. Повторить п.6, увеличив скорость передачи данных в 2 раза.

Сделать выводы.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения о математической модели и программе моделирования.
3. Результаты в виде таблиц и графиков.
4. Выводы.

Отчет оформляется каждым студентом индивидуально.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Распространение оптического излучения в мутных средах, в том числе в морской воде. Поглощение и рассеяние оптического излучения в морской воде.
2. Потери энергии в подводном оптическом канале передачи информации на основе источника когерентного оптического излучения (лазера).
3. Ослабления оптического излучения в разных типах вод. Классификация морских и океанских вод по системе Н.Г. Жерлова. Выбор рабочей длины волны оптического передатчика.
4. Фотодетекторы. Критерии качества фотодетекторов.
5. Лазеры оптических систем передачи информации. Оптимальный выбор лазера с учётом специфики подводных систем передачи информации.
6. Анализ оптического передающего устройства.
7. Шумы, сопровождающие прием излучения в водной среде. Фоновый оптический шум и его особенности с учётом среды распространения.
8. Методы имитационного моделирования передачи оптического сигнала в водной среде.
9. Физические принципы модуляции лазерного излучения. Электрооптические модуляторы.
10. Методы модуляции оптических сигналов.
11. Методы демодуляции оптических сигналов.
12. Процесс детектирования оптического сигнала.
13. Приемные устройства подводных оптических систем передачи информации.
14. Оптическая система передачи информации с кодоимпульсной модуляцией (КИМ) по интенсивности.
15. Оптическая система передачи информации с кодоимпульсной модуляцией (КИМ) по поляризации.
16. Оптическая система передачи информации с квантованной позиционно-импульсной модуляцией по интенсивности.
17. Оптическая система передачи информации КИМ-АМ на поднесущей с модуляцией по интенсивности.
18. Виды подводных оптических систем передачи информации: с прямой видимостью, отражательная, «вода-воздух».
19. Оптимальное проектирование подводных открытых оптических систем передачи информации.

20. Особенности работы открытых оптических систем передачи информации на больших глубинах.
21. Наведение в подводных открытых оптических системах передачи информации. Методы поиска и захвата.
22. Наведение в подводных открытых оптических системах передачи информации. Построение системы слежения и наведения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Abd El-Naser A. Mohamed Underwater wireless optical communications for short range typical ocean water types [Текст] / Abd El-Naser A. Mohamed, Hamdy A. Sharshar, Ahmed Nabih Zaki Rashed, Enab Salah El-dien // Canadian journal on electrical and electronics engineering. – 2012 . – No. 7, vol. 3 – p. 344-361.
2. Chadi G. Monte-Carlo-Based Channel Characterization for Underwater Optical Communication Systems [Текст] / Chadi Gabriel, Mohammad-Ali Khalighi¹, Salah Bourennane, Pierre Léon, and Vincent Rigaud // Journal of Optical Communications and Networking . – 2013 . – Vol. 5, Iss. 1, p. 1-12.
3. Curtis D. Mobley Terrestrial optics [Текст] / Curtis D. Mobley // Applied Electromagnetics and Optics Laboratory, SRI International, Menlo Park , California.
4. Jaruwatadilok S. Underwater wireless optical communication channel modeling and performance evaluation using vector radiative transfer theory [Текст] / S. Jaruwatadilok // IEEE Journal on selected areas in communications . – 2008 . – No.9, vol. 26 – p. 1620-1627.
5. Kaushal H. Underwater optical wireless communication [Текст] / H. Kaushal, G. Kaddoum // IEEE Access, volume 4, 2016, p. 1518-1547.
6. Laura J. Johnson The underwater optical channel [Текст] / Laura J. Johnson // Departament of engineering University of Warwick. – 2012 – p. 18.
7. Mazin A.A.A. Characteristics of optical channel for underwater optical wireless communication system [Текст] / Ali A. Ali Mazin // IOSRJournal of electrical and electronics engineering – 2015 – Volume 10, – p. 9.
8. Pope R. M. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements [Текст] / R. M. Pope, E. S. Fry // Applied Optics . – 2008 . – Vol. 36 – p. 8710-8723.
9. William M. Irvine Infrared optical properties of water and ice spheres [Текст] / William M. Irvine, James B. Pollack // Icarus . – 1968 . – No. 8 – p. 324-360.

10. Yura H.T. Small-angle scattering of light by ocean water [Текст] / ARPA order No. 189-1 , Santa-Monica, California, 1970, p. 27.
11. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах, т. 1 [Текст]/ А. Исимару. – М. : Мир. , 1981. 285 с.
12. Кириллов С. Н. Разработка модели распространения оптического сигнала в водной среде для подводных систем передачи информации [Текст] / С. Н. Кириллов, С. А. Балюк, С. Н. Кузнецов, А. С. Есенин // Вестник РГРТУ. – 2012. – № 2. – С. 3-8.
13. Пратт В.К. Лазерные системы связи. Пер. с англ. под ред. А.Г. Шереметьева. [Текст] М.: Радио и связь, 1993. 232 с.
14. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, исп. : Пер. с англ. [Текст] / Б. Склад. – М. : Издательский до "Вильямс", 2003. – С. 264.
15. Шереметьев А. Г. Статистическая теория лазерной связи [Текст] / А. Г. Шереметьев. – М. : "Связь", 1971. – С. 264.
16. Шифрин К. С. Введение в оптику океана [Текст] / К. С. Шифрин . – Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. – 280 с.