

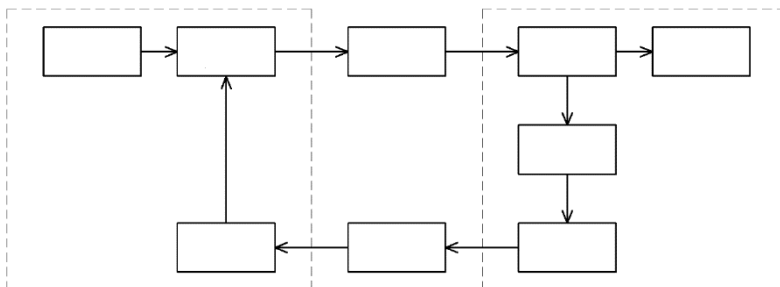
7943

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Ф. УТКИНА

ИЗУЧЕНИЕ КОДОВ РИДА – СОЛОМОНА В БЕСПРОВОДНОМ ОПТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

Методические указания к лабораторной работе



Рязань 2024

УДК 621.372.8

Изучение кодов Рида – Соломона в беспроводном оптическом канале связи: 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. 2. Библиогр. : 12 назв.

Оптические системы передачи, модуляция, лазерная связь, подводная связь, помехоустойчивое кодирование, коды Рида - Соломона

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

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

Изучение кодов Рида – Соломона
в беспроводном оптическом канале связи

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 № 4
ИЗУЧЕНИЕ КОДОВ РИДА – СОЛОМОНА
В БЕСПРОВОДНОМ ОПТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Беспроводные оптические каналы передачи информации, находящиеся под воздействием мешающих факторов, в условиях подводной среды имеют ряд специфических особенностей. Среда распространения оптического излучения имеет стабильные во времени параметры, позволяющие считать сигнал на выходе фотодетектора кусочно-стационарным в широком смысле (имеющим инвариантную во времени дисперсию и математическое ожидание), однако ослабление сигнала на трассе распространения достигает значительных величин, в результате чего возникает искажение принятой информации. Основным параметром, характеризующим потерю информации, является вероятность битовой ошибки (вероятность ошибки на двоичный символ).

Одним из возможных способов увеличить дальность подводного открытого оптического канала передачи данных является использование помехоустойчивого кодирования, в частности кодов с исправлением ошибок. Помехоустойчивые коды с исправлением ошибок (корректирующие коды) позволяют снизить вероятность битовой ошибки в канале передачи данных.

В настоящее время существует множество помехоустойчивых кодов, имеющих отличия в структуре, способах кодирования/декодирования и пр. Основной подход состоит в делении их на блочные и сверточные.

Блочные коды характеризуются избыточностью передаваемой информации, при этом сообщение состоит из блока, в пределах которого происходит декодирование, длиной n , в котором содержится k информационных и r проверочных символов. Исходная скорость передачи данных R_0 при применении помехоустойчивых видов кодирования снижается за счет избыточности до величины:

$$R = R_0 v_k,$$

где $v_k = \frac{k}{n}$ – кодовая скорость.

При этом избыточность кодирования равна

$$g = \frac{r}{n}.$$

Исправление t_d ошибочных символов на входе декодера требует количества проверочных символов, равного $r = 2t_d$, а кодовое расстояние

(расстояние Хемминга) определяется по формуле $d = 2t_d + 1$. Это расстояние определяет число позиций, в которых разрешенные комбинации сочетания двоичных последовательностей, составляющих блоки, отличаются друг от друга. Таким образом, на выходе кодера формируются только разрешенные последовательности символов.

Сверточные коды являются непрерывными. В отличие от блочковых кодов в них используется последовательная обработка фрагментов информации конечной длины. Это означает, что символы на выходе свёрточного кодера зависят не только от очередного символа на входе, но и от символов, поступивших до него и хранящихся в памяти устройства. Множество двоичных последовательностей, образуемых свёрточным кодером, составляет свёрточный код.

Помехоустойчивое кодирование позволяет при той же вероятности битовой ошибки и дальности снизить энергетические затраты на передачу данных. Значение, на которое снижаются энергозатраты, называется энергетическим выигрышем кодирования (ЭВК). Эта величина зависит от алгоритма декодирования. Если декодер имеет жёсткое решение, т.е. на выходе демодулятора возможны лишь два значения «0» или «1», то ЭВК вычисляется по формуле [10]:

$$\text{ЭВК} = 10 \lg \left(g \frac{d+1}{2} \right).$$

В случае применения алгоритмов мягкого декодирования, когда на выходе демодулятора формируется многоуровневый сигнал, ЭВК вычисляется по формуле:

$$\text{ЭВК} = 10 \lg (gd).$$

Алгоритмы жесткого декодирования не способны в полной мере использовать потенциал корректирующих кодов. Принятие демодулятором жестких решений при декодировании сопряжено с потерей информации о принятых сигналах, поэтому в современных системах передачи информации используются мягкие алгоритмы декодирования. С другой стороны, проектирование «мягкого» декодера сопряжено с техническими трудностями, а выигрыш может быть не столь значителен.

При увеличении дальности вследствие затухания и различных мешающих факторов, в том числе собственных шумов приёмника, уменьшается отношение сигнал-шум. Это приводит к возрастанию вероятности битовой ошибки P_e^B . Принимая во внимание работу канала в таких жёстких условиях, выберем границу допустимой вероятности ошибки $P_e^B \leq 10^{-6}$. Ширина потока видеоданных может существенно

различаться, например, в системах цифрового спутникового телевизионного вещания ширина полосы частот составляет 27 МГц, в кабельных телевизионных системах – 8 МГц, а для наземного вещания используются стандартные полосы 6, 7, 8 МГц. В конкретных прикладных задачах ширина полосы может отличаться в зависимости от требуемого разрешения, частоты кадров и стандарта сжатия видео. Сравнительные характеристики 8-ричных 16-ричных блоковых кодов рассчитаны и приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Характеристики 8-ричных блоковых кодов для подводного открытого оптического канала с шириной полосы 100 МГц ($R_0=33$ Мбит/с) и 1 ГГц ($R_0=333$ Мбит/с)

n	k	v_k	R, Мбит/с		ЭВК, дБ	
			R0		Декодирование	
			33 Мбит/с	333 Мбит/с	Жесткое	Мягкое
7	5	0,714	23,57	237,86	-2,43	-0,67
7	3	0,429	14,14	142,71	2,34	4,56
7	1	0,143	4,71	47,57	5,35	7,78

Таблица 2. Характеристики 16-ричных блоковых кодов для подводного открытого оптического канала с шириной полосы 100 МГц ($R_0=33$ Мбит/с) и 1 ГГц ($R_0=333$ Мбит/с)

N	k	v_k	R, Мбит/с		ЭВК, дБ	
			R0		Декодирование	
			33 Мбит/с	333 Мбит/с	Жесткое	Мягкое
15	13	0,867	28,60	288,60	-5,74	-3,98
15	11	0,733	24,20	244,20	-0,97	1,25
15	9	0,600	19,80	199,80	2,04	4,47
15	7	0,467	15,40	155,40	4,26	6,81
15	5	0,333	11,00	111,00	6,02	8,65
15	3	0,200	6,60	66,60	7,48	10,17
15	1	0,067	2,20	22,20	8,73	11,46

Приведенные в таблицах результаты показывают, что существуют варианты корректирующих блоковых кодов, которые приводят к энергетическому проигрышу и показывают предельные возможности данных кодов. Основной вывод, который можно сделать из этих таблиц: скорость размнивается на энергетический выигрыш, т.е., увеличивая дальность, мы теряем скорость передачи данных. При этом в полной мере раскрыть возможности блоковых кодов возможно только с использованием «мягких» алгоритмов декодирования с применением многопороговых декодеров. Применительно к 8-ричным блоковым кодам это позволяет добиться увеличения ЭВК на 2,22 – 2,43 дБ по сравнению с

жестким декодированием, а в случае 16-ричных блоковых кодов 2,43 – 2,73 дБ. Однако и «мягкое» декодирование имеет недостаток, а именно рост вычислительных затрат. Это необходимо учитывать в случае ограниченности вычислительных и аппаратных ресурсов, так как видеоизображение должно передаваться в реальном масштабе времени с минимальной задержкой.

Одним из способов расчета реального ЭВК может быть пересчет вероятности битовой ошибки без кодирования P_e^B в вероятность битовой ошибки с учетом кодирования P_{eK}^B . Тогда энергетический выигрыш определяется как

$$\text{ЭВК} = \text{ОСШ}_{\text{БИ}}(P_e^B = P_{eK}^B) - \text{ОСШ}_K(P_e^B = P_{eK}^B),$$

где $\text{ОСШ}_{\text{БИ}}$ – ОСШ в канале без избыточности;

ОСШ_K – ОСШ в канале с кодированием.

Данная формула позволяет получить значение ЭВК с учётом структуры конкретного помехоустойчивого кода и алгоритма декодирования, учитывая также зависимость от уровня шумов.

Вероятность ошибки символа на выходе декодера в канале без избыточности определяется по формуле:

$$P_e^S = 1 - (1 - P_e^B)^m.$$

При использовании декодера в канале с помехоустойчивым кодированием, в том числе с блоковыми кодами, вероятность ошибки символа P_e^S и бита P_e^B определяется в соответствии с особенностями применяемого метода кодирования.

Для выбора помехоустойчивого кода необходимо понимание задач, которые использование данного кода позволяет решить. Избыточные коды применяются для одной из трёх задач:

- обнаружение ошибок;
- исправление ошибок;
- обнаружение и исправление ошибок.

Простейшим блоковым кодом, применяемым в системах передачи данных, является код Хемминга. Это линейные блоковые коды, в которых длина блока $n = 2^m - 1$, а число информационных символов равно $k = 2^m - m - 1$. Кодовое расстояние кодов Хемминга равно $d = 3$, что позволяет обнаружить две или исправить одну ошибку. Существуют также расширенные коды Хемминга, способные исправлять

одну и обнаруживать две ошибки либо исправлять две. По причине малой корректирующей способности эти коды применяются только в составе каскадных схем кодирования.

Коды Боуза – Чоудхури – Хоквингема (БЧХ) являются разновидностью циклических кодов, длина блока которых равна $k = q^m - 1$, где m – любое целое число;
 q – число бит в символе.

Количество проверочных разрядов равно $r \leq \frac{m(d-1)}{2}$, а число информационных разрядов $k = n - r$.

Достоинством этих кодов является способность исправлять кратные ошибки. По эффективности они превосходят коды Хемминга, однако имеют недостатки:

- сложность декодирования кодов БЧХ с большой длиной блока;
- уменьшение кодовой скорости приводит к снижению энергетической эффективности;
- коды БЧХ небольшой длины обладают слабой корректирующей способностью и применяются только в составе каскадных кодов по аналогии с кодами Хемминга.

Вероятность ошибки на выходе БЧХ декодера в двоичном символе P_s определяется по формуле:

$$P_s \leq \frac{1}{n} \sum_{i=t_d+1}^n (i+t_d) C_n^i (P_e^B)^{t_d} (1-P_e^B)^{n-i},$$

где $C_n^{t_d} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ – биномиальный коэффициент.

Вероятность ошибки в кодовом блоке:

$$P_B \leq \frac{1}{n} \sum_{i=t_d+1}^n C_n^i (P_e^B)^{t_d} (1-P_e^B)^{n-i},$$

а вероятность битовой ошибки при использовании двоичного символа равна $P_{eBCH}^B \approx P_s$.

При использовании БЧХ кодов с $q > 2$ вероятность битовой ошибки рассчитывается по формуле:

$$P_{eBCH}^B \approx \frac{q/2}{q-1} P_s.$$

Наиболее известной и распространенной кодовой конструкцией в цифровых системах передачи информации являются коды Рида – Соломона (РС), представляющие собой недвоичные блочные коды, относящиеся к подклассу кодов БЧХ. Код РС (n, k, r) имеет вид:

$$(2^m - 1, k, n - k + 1),$$

где $n = 2^m - 1$ – длина блока (m – натуральное число);

k – число информационных символов;

$r = n - k + 1$ – число проверочных символов.

Код Рида – Соломона (РС) является одним из немногих корректирующих кодов, которые экспериментально исследованы и применяются в подводных оптических системах передачи информации, показывая удовлетворительный результат.

Коды Рида – Соломона являются кодами с максимально достижимым кодовым расстоянием, равным $d = n - k + 1$.

Вероятность ошибки символа на выходе РС-декодера равна

$$P_s \leq \frac{1}{n} \sum_{i=t_d+1}^n \left(\frac{i+t_d}{n} \right) C_n^i (P_e^B)^{t_d} (1 - P_e^B)^{n-i},$$

а вероятность битовой ошибки:

$$P_{ePC}^B \approx \frac{2^{m-1}}{2^m - 1} P_s.$$

Сравнительный анализ показывает, что коды Рида – Соломона обладают наибольшей эффективностью среди блочных кодов. К его достоинствам относятся:

- способность исправлять $(n-k)/2$ случайных одиночных ошибок и пакеты ошибок длиной до $(n-k)$;
- наличие эффективных, мягких алгоритмов декодирования.

В качестве примеров использования можно привести код (255,223,32), используемый в системах космической связи НАСА, укороченные коды Рида – Соломона для систем цифровой записи компакт-дисков CD-ROM и DVD, наземные системы телевидения высокого разрешения HDTV, расширенные коды РС (128, 122, 7) для модемов кабельных линий, системы хранения информации с возможностью восстановления при повреждении, стандарт цифрового видеовещания DVB (204, 188) и многие другие. В волоконно-оптических системах передачи с SDH/WDM коды Рида – Соломона используются наиболее часто по сравнению с другими корректирующими кодами.

Работа подводного открытого оптического канала передачи информации в условиях сильной замутненности требует использования

корректирующих кодов с высоким ЭВК и мягких алгоритмов декодирования. В таких условиях становится возможным увеличить дальность передачи информации, не повышая мощности и не увеличивая диаметров приёмных и передающих линз, так как массогабаритные показатели и энергопотребление являются критическими параметрами для автономных необитаемых подводных аппаратов.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить влияние кодов Рида – Соломона на организацию беспроводной оптической связи в мутных средах на примере морской воды.
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 требует 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_row.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. 1).

ВВОД 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

%Для 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

Np=10;%Число точек на графике

Рис. 1. Фрагмент программы моделирования, содержащий входные переменные

Перед запуском программы необходимо установить значения переменных, обозначающих исходные данные моделирования (табл. 3)
Таблица 3. 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. Установить скорость передачи данных 4 Мбит/с (переменная BitRate).
4. Выбрать номер передающего лазерного диода в соответствии с вариантом (N_{las}), указанным преподавателем (табл. 4).

Таблица 4. Варианты работы

№ варианта	Тип лазерного диода	Кодовые скорости
1	NDB4116	5/7, 13/15, 11/15
2	NDG4216	3/7, 11/15, 9/15
3	NDA4116	1/7, 9/15, 7/15
4	NDB4116	5/7, 7/15, 5/15
5	NDG4216	3/7, 5/15, 3/15
6	NDA4116	1/7, 3/15, 1/15

5. Запустить программу на выполнение и построить графики зависимости мощности оптического сигнала на фотоприёмнике и вероятности битовой ошибки (BER) от расстояния для 1-го типа морской воды, результаты свести в табл. 5. Зависимости построить для передачи данных без кодирования и кодовых скоростей, указанных для соответствующего варианта.

Таблица 5. Зависимость BER от принятой мощности

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. 2).

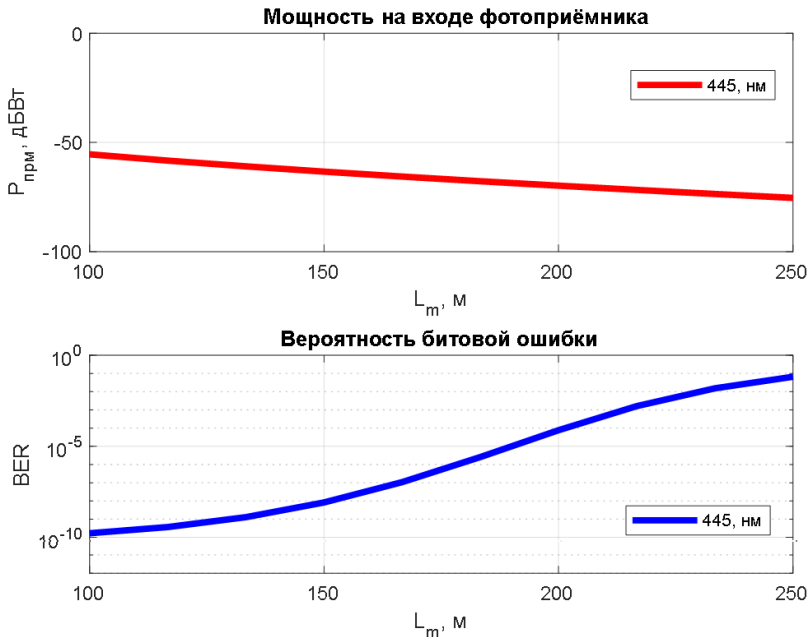


Рис. 2. Результат работы программы
6. Повторить п.3 для воды типа 2. Сделать выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. По каким параметрам производится классификация кодов?
2. Назначение помехоустойчивых кодов. Понятие кодовой скорости.
3. В чём состоит разница между блоковыми и свёрточными кодами?
4. Каким образом осуществляются обнаружение и исправление ошибок?
5. Почему реальный энергетический выигрыш кодирования меньше, чем рассчитанный по оценочным формулам?
6. Что такое энергетический выигрыш кодирования и как он зависит от способа декодирования?
7. Перечислите основные БЧХ коды и их недостатки.
8. Поясните суть кода Хэмминга.
9. Поясните понятие каскадного кода.
10. Что означает тот факт, что коды Рида – Соломона лежат на границе Синглтона?
11. Что такое мажоритарное декодирование? Как оно осуществляется для линейных кодов?

12. Что такое мажоритарное декодирование? Как оно осуществляется для циклических кодов?
13. Какое влияние оказывает помехоустойчивое кодирование на дальность связи?
14. Если понижать кодовую скорость, существует ли предел дальности связи при фиксированных параметрах канала передачи данных?
15. Чем определяется скорость передачи информации в условиях отсутствия помех?
16. Поясните разницу в терминах скорость передачи информации и скорость передачи сигналов.
17. Как вычисляется пропускная способность канала связи при наличии помех?
18. Чем определяется избыточность источника сообщений? Что такое информационная избыточность?
19. Поясните понятия «помехоустойчивость», «граница помехоустойчивости».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Аронов Л. В. Коды Рида – Соломона в подводном оптическом канале передачи информации с кодоимпульсной модуляцией по интенсивности [Текст] / Л. В. Аронов // Вестник РГРТУ – 2021. – № 4 (78). – С. 12-20. DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-12-20
3. Прайт В.К. Лазерные системы связи / пер. с англ. под ред. А.Г. Шереметьева. [Текст] М.: Радио и связь, 1993. 232 с.
4. 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.
5. 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.
6. Kaushal H. Underwater optical wireless communication [Текст] / H. Kaushal, G. Kaddoum // IEEE Access, volume 4, 2016, p. 1518-1547.

7. 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.

8. Золотарев В. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник : под ред. чл.-кор. РАН Зубарева Ю. Б. / В. В. Золотарев, Г. В. Овечкин. – М. : Горячая линия-Телеком, 2004. – 126 с.

9. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение [Текст] / пер. с англ. В. Б. Афанасьева. — М.: Техносфера, 2006. — 320 с.

10. Журавлёв В.Г. Помехоустойчивые коды : учеб. пособие [Текст] / В.Г. Журавлёв, Н.Ю. Куранова, Ю.Ю. Евсеева ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2013. – 96 с.

11. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки [Текст] / У. Питерсон, Э.Уэлдон — М.: Мир, 1976. – 593 с.

12. Березюк Н. Т. Кодирование информации (двоичные коды) [Текст] / Н. Т. Березюк, А. Г. Андрущенко, С. С. Мощицкий и др. Харьков: издательское объединение "Вища школа", 1978, – 252 с.