

РАДИОТЕХНИКА, РАДИОЛОКАЦИЯ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

УДК 621.371

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОДВОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С КОДОИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ

С. Н. Кириллов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-3673-5709, e-mail: kirillov.lab@mail.ru

Л. В. Аронов, старший преподаватель кафедры РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-9010-3836, e-mail: LVArronov@yandex.ru

Оценивается пропускная способность подводного открытого оптического канала передачи информации с кодоимпульсной модуляцией по интенсивности (КИМ-ИМ). Целью работы является обоснование статистической модели сигнала на выходе фотодетектора приёмника подводного открытого оптического канала передачи информации с учетом внутренних шумов фоточувствительного элемента, а также оценка целесообразности использования корректирующих кодов. Рассматриваются статистические характеристики шумов фотодетектора оптического приемника, предназначенного для работы в составе подводного открытого оптического (лазерного) канала передачи информации. Обосновывается статистическая модель, и определяется пропускная способность канала при отсутствии и наличии кода Рида – Соломона. Обоснована форма функции плотности вероятности, и рассчитаны статистические характеристики аддитивных шумов и смеси шумов и полезного сигнала. Получены вероятности ошибки приема двоичного сигнала при модуляции КИМ-ИМ в подводном открытом оптическом канале передачи информации, показано, что на дистанции от 10 до 100 м вероятность ошибочного приема составляет от $0,23 \cdot 10^{-9}$ до $4,2 \cdot 10^{-1}$ с оптимальным порогом обнаружения от 1 до 0,056 мкА и шириной полосы канала от 100 до 1000 МГц. При заданных параметрах канала и мощности передатчика 0,1 Вт возможно обеспечить работу оптического канала передачи информации в прозрачном море на расстоянии до 100 м с полосой 1,6 МГц и вероятностью ошибки на двоичный символ не более 10^{-6} . Применение корректирующего кода Рида – Соломона с кодовой скоростью, равной 0,143 позволяет увеличить дальность передачи данных на 115 % для полосы пропускания 100 МГц и на 34 % для полосы пропускания 1 ГГц.

Ключевые слова: подводный оптический канал передачи информации, оптическая связь, открытый оптический канал, математическая модель, подводные системы передачи информации.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-3-13

Введение

Развитие подводных инженерных коммуникаций диктует необходимость построения роботизированных платформ, способных выполнять глубоководные работы. С одной стороны, это минимизирует риски для персонала, с другой – повышает экономическую эффективность, так как подводные роботизированные платформы не нуждаются в системах жизнеобеспечения и медицинском сопровождении, а управление ими не требует от оператора сложной и длительной подготовки. Однако в данной сфере существует ряд проблем, например вопрос организации передачи данных с видеокамер подводного роботизированного комплекса. Сравнительный анализ различных подводных каналов передачи информации: акустического, радиочастотного и оптического, проведенный в работах [1, 2], показывает, что наиболее полно удовлетворяет заданным требованиям открытый оптический канал передачи информации на основе когерентного источника излучения (полупроводникового лазера). Та-

кой канал обладает рядом достоинств, таких как низкое энергопотребление, ширина полосы канала, дающая возможность одновременной передачи нескольких потоков видеоданных, минимальные, по сравнению с остальными каналами, массогабаритные показатели и т.д. [1, 3].

Одной из проблем в процессе работы подводного открытого оптического канала передачи информации является значительное ослабление сигнала на трассе распространения, что затрудняет обнаружение полезного сигнала на фоне собственных шумов фотодетектора приёмника.

Эффективное обнаружение сигнала на фоне шумов требует построения статистической модели фотодетектора приёмника подводного открытого оптического канала передачи информации. При этом в качестве фотодетектора в этом случае наиболее целесообразно использовать фотодиод, чувствительный в синей области видимого спектра [1]. Кроме того, для увеличения дальности требуется использовать корректирующие коды, обнаруживающие и исправляющие ошибки.

Цель работы

В интересах оценки пропускной способности в реальном масштабе времени обосновать статистическую модель сигнала на выходе фотодетектора приёмника подводного открытого оптического канала передачи информации с учетом внутренних шумов фоточувствительного элемента, а также оценить целесообразность использования корректирующих кодов.

Теоретическая часть

Процесс передачи сигнала по подводному открытому оптическому каналу передачи информации сопровождается шумами различной природы. Данный канал предназначен для передачи данных в пределах прямой видимости, следовательно, сигнал на выходе оптического приемника можно представить в виде

$$y(t) = \gamma \cdot x(t) + n(t),$$

где $x(t)$ – сигнал на выходе оптической системы передатчика; γ – множитель ослабления, учитывающий потерю мощности на трассе распространения и потерю мощности в оптической системе приёмника и передатчика (потери в коллимирующих линзах); $n(t)$ – смесь аддитивных шумов. Модель фотодетектора на основе фотодиода представлена на рисунке 1.

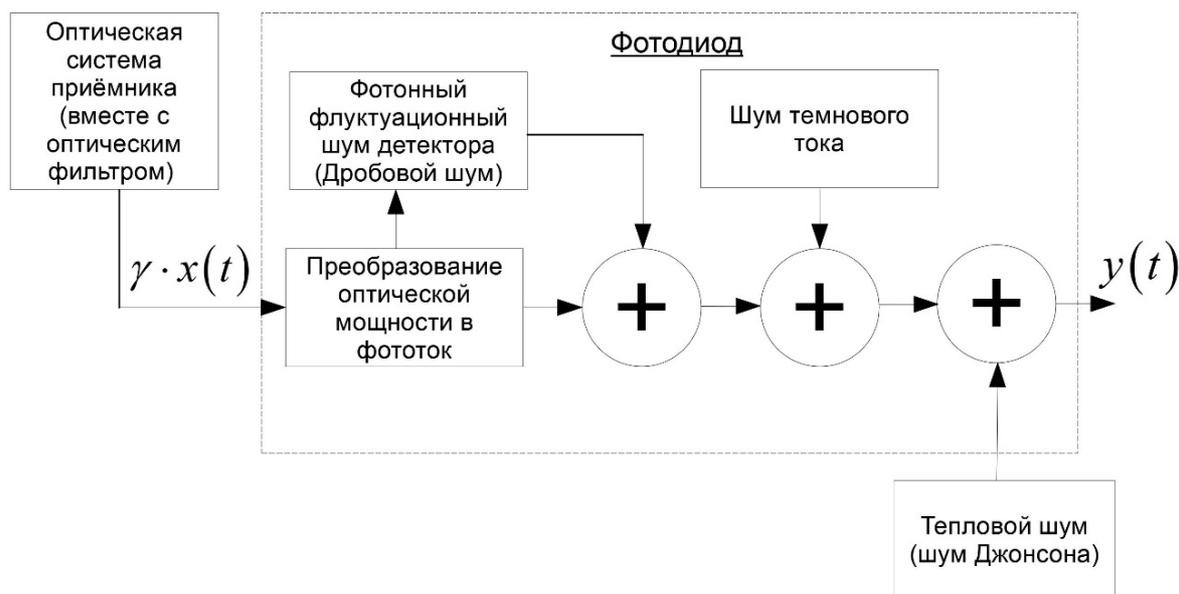


Рисунок 1 – Модель фотодетектора с источниками шумов
Figure 1 – Photodetector model with noise sources

Основным источником шумов в данном случае являются собственные шумы фотодетектора, состоящего из оптической системы на основе линз и зеркал и фоточувствительного элемента. Когерентное оптическое излучение, используемое для передачи данных в подводных оптических системах передачи информации, обладает существенным достоинством по сравнению с традиционным радиоканалом, т.к. оптические передатчики и приемники имеют узкую диаграмму направленности без боковых лепестков. Это свойство позволяет в ряде случаев пренебречь наличием фонового излучения в среде распространения, а также повышает защищенность линии передачи данных от преднамеренных помех.

Ослабленная падающая интенсивность оптического передатчика принимается оптической системой приемника и, преобразуясь в принятую оптическую мощность $P_{\text{прм}}(t) = \gamma \cdot P_{\text{прд}}(t)$, попадает на чувствительный слой фотодиода. Полезный сигнал, среднее значение которого определяется как $\langle i(t) \rangle = S_{\phi} P_{\text{прм}}(t)$, где S_{ϕ} – чувствительность фотоприемника, приводимая в техническом описании фотодиода или определяемая по формуле [4]

$$S_{\phi} = \eta q_e \lambda / hc,$$

где η – квантовая эффективность; q_e – элементарный заряд; λ – рабочая длина волны; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме. Мощность полезного сигнала на выходе фотоприемника пропорциональна квадрату фототока, который равен [5]

$$\langle i^2(t) \rangle = (S_{\phi} P_{\text{прм}}(t))^2,$$

а флуктуации фототока полезного сигнала, как показано в [6], описываются нормальным законом распределения:

$$W_s(i_s(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s^2}} \exp\left(-\frac{(i_s(t) - \langle i(t) \rangle)^2}{2\sigma_s^2}\right), \quad (1)$$

где σ_s^2 – дисперсия полезного сигнала, зависящая от флуктуаций параметров канала передачи информации.

Фотонный флуктуационный шум детектора (дробовый шум, генерационно-рекомбинационный шум) зависит от ширины полосы частот канала передачи информации и возникает в результате флуктуаций эмиссии оптического излучения даже в случае, если средняя оптическая мощность постоянна. Дисперсия дробового шума определяется по формуле [4, 5]:

$$\sigma_{\text{др}}^2 = 2q_e R_0 P_{\text{прм}} B, \quad (2)$$

где B – ширина полосы частот канала передачи информации, Гц; $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд.

Распределение вероятности для дробового шума описывается законом Пуассона, но при большой интенсивности сигнала возможна аппроксимация функции плотности вероятности (ФПВ) законом Гаусса с математическим ожиданием $\langle i_{\text{др}} \rangle = \sigma_{\text{др}}^2$ [6]:

$$W_{\text{др}}(i_{\text{др}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{др}}^2}} \exp\left(-\frac{(i_{\text{др}} - \langle i_{\text{др}} \rangle)^2}{2\sigma_{\text{др}}^2}\right). \quad (3)$$

Эмиссия темновых электронов инвариантна во времени и подчиняется распределению Пуассона [6], и вероятность эмиссии k_e электронов определяется по формуле:

$$P(\mu_{D,\tau} = k_e) = \frac{(\mu_{D,\tau})^{k_e} \exp(-\mu_{D,\tau})}{k_e!},$$

где $\mu_{D,\tau} = \frac{\tau \cdot I_D}{q_e}$ – среднее число темновых электронов, эмитируемых фотодиодом с темновым током I_D за период времени τ . Темновой шум неизбежен в любых полупроводниковых фотоприемниках, при этом среднее значение темнового тока I_D указывается в техническом описании конкретного полупроводникового прибора. По аналогии с дробовым шумом ФПВ темнового шума можно аппроксимировать нормальным распределением с математическим ожиданием $\langle i_D \rangle = \sigma_D^2$, где дисперсия темнового шума σ_D^2 равна [4]

$$\sigma_D^2 = 2q_e I_D B. \quad (4)$$

ФПВ в этом случае имеет вид

$$W_D(i_D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_D^2}} \exp\left(-\frac{(i_D - \langle i_D \rangle)^2}{2\sigma_D^2}\right). \quad (5)$$

Тепловые шумы (шумы Джонсона) обусловлены тепловыми флуктуациями носителей заряда в резистивных элементах. Мощность теплового шума (шум Джонсона), обусловленного температурой фотоприемника, оценивается по формуле [6]:

$$\sigma_T^2 = \frac{4kTB}{R_L}, \quad (6)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана; T – температура фотодетектора, К; R_L – сопротивление нагрузки, Ом.

Интенсивность теплового шума зависит от ширины полосы частот передаваемого сигнала.

Управление роботизированным подводным комплексом требует широкополосности передаваемого и принимаемого сигналов, которая обеспечивает передачу нескольких каналов видеоданных в реальном масштабе времени. В результате мощность шума может быть значительной и создавать существенные помехи приему сигналов. ФПВ тепловых шумов описывается нормальным законом распределения с нулевым математическим ожиданием [6]:

$$W_T(i_T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_T^2}} \exp\left(-\frac{i_T^2}{2\sigma_T^2}\right). \quad (7)$$

В интересах обнаружения оптического сигнала на фоне шумов необходимо оценить совместные ФПВ распределений шумов и сигнала на фоне шумов. Учитывая, что все представленные законы распределения нормальные или аппроксимированы нормальными, совместную ФПВ шумов можно найти по правилу суммы независимых гауссовских случайных переменных, при этом у результирующей ФПВ математические ожидания и дисперсии будут суммой математических ожиданий и дисперсий исходных случайных величин [6]. В этом случае для суммы шумовых токов $i_n = i_{DP} + i_D + i_T$ дисперсия равна

$$\sigma_n^2 = \sigma_{DP}^2 + \sigma_D^2 + \sigma_T^2 = B \left(2q_e (R_0 P_{PPM} + I_D) + \frac{4kT}{R_L} \right), \quad (8)$$

а математическое ожидание

$$\langle i_n \rangle = \sigma_{DP}^2 + \sigma_D^2 = 2q_e B (R_0 P_{PPM} + I_D). \quad (9)$$

ФПВ аддитивных шумов имеет вид

$$W_n(i_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left(-\frac{(i_n - \langle i_n \rangle)^2}{2\sigma_n^2}\right), \quad (10)$$

а ФПВ смеси сигнал+шум равна

$$W_{s+n}(i_{s+n}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_n^2 + \sigma_s^2)}} \exp\left(-\frac{(i_{s+n} - (\langle i_s \rangle + \langle i_n \rangle))^2}{2(\sigma_n^2 + \sigma_s^2)}\right). \quad (11)$$

Полученные ФПВ для смеси аддитивных шумов и смеси сигнал+аддитивные шумы позволяют получить статистическое описание фотодетектора оптического приёмника. При этом на глубинах свыше 200 метров можно пренебречь влиянием фоновых излучений, а параметры воды являются высокостабильными, практически не меняясь с течением времени [1, 3].

Результаты численного моделирования

При передаче информации по подводному открытому оптическому каналу, наименьшее затухание обеспечивается на длинах волн синего цвета. [1]. Выберем в качестве фотодетектора фотодиод S5973-02 с пиком чувствительности равным $S_\phi = 0,35$ А/Вт на длине волны 450 нм, и темновым током $I_D = 0,1 \cdot 10^{-9}$ А. Сопротивление нагрузки R_L примем равным 10 кОм. В этом случае среднеквадратическое отклонение тока теплового шума составит 22,7-227,7 нА при полосе частот канала передачи информации от 100 МГц до 10 ГГц. Температура его принята равной 25 °С, что соответствует нормальным условиям. На передающей стороне возьмем лазерный светодиод NDB4116 с мощностью излучения $P_{\text{лрд}} = 100$ мВт. Проведем моделирование ФПВ смеси аддитивных шумов и смеси сигнал+аддитивные шумы на расстояниях 10 м и 50 м в прозрачной морской воде (ослабления на трассе распространения 34 дБ и 50 дБ при диаметре приемной апертуры 5 см) [7]. Полученные ФПВ смеси аддитивных шумов, построенные по формуле (10), для подводного открытого оптического канала передачи информации с полосой 100 МГц, 1 ГГц и 10 ГГц и протяженностью трассы 10 м показаны на рисунке 2.

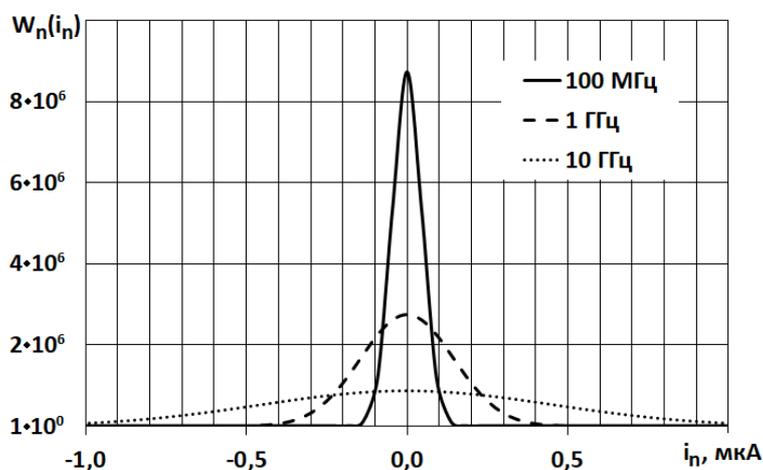


Рисунок 2 – ФПВ смеси токов аддитивных шумов для канала с полосой 100 МГц, 1 ГГц и 10 ГГц (протяженностью трассы 10 м)
Figure 2 – Probability density function of additive noise mixture currents for a channel with bandwidth of 100 MHz, 1 GHz, and 10 GHz (10 m path length)

Среднеквадратические отклонения шумов для ширины полосы подводного открытого оптического канала передачи информации 1 ГГц: дробового шума $\sigma_{\text{др}} = 66,8$ нА, темнового шума $\sigma_D = 0,18$ нА и теплового шума $\sigma_T = 128,3$ нА. Дробовой шум зависит от уровня принимаемой мощности и при увеличении протяженности трассы распространения до 100 м станет равен $\sigma_{\text{др}} = 4,2$ нА. Таким образом, дробовой шум снижается с увеличением протяженности трассы, а основной вклад вносится тепловыми шумами, причем расширение полосы частот оптического канала приводит к увеличению разброса значений шумового тока.

Проанализируем ФПВ смеси полезного сигнала с аддитивными шумами для протяженности трассы распространения 10 м и 100 м в прозрачном море (рисунки 3, 4).

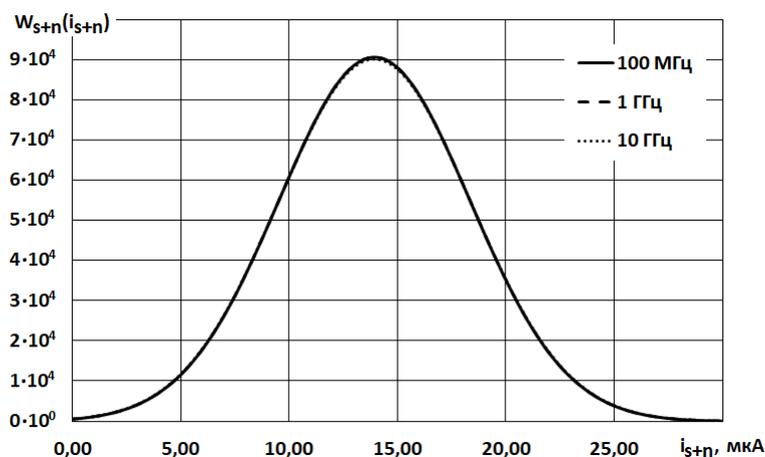


Рисунок 3 – ФПВ смеси сигнала и аддитивных шумов для канала с полосой 100 МГц, 1 ГГц и 10 ГГц (протяженностью трассы 10 м)
Figure 3 – Probability density function of additive noise mixture and signal currents for a channel with bandwidth of 100 MHz, 1 GHz, and 10 GHz (10 m path length)

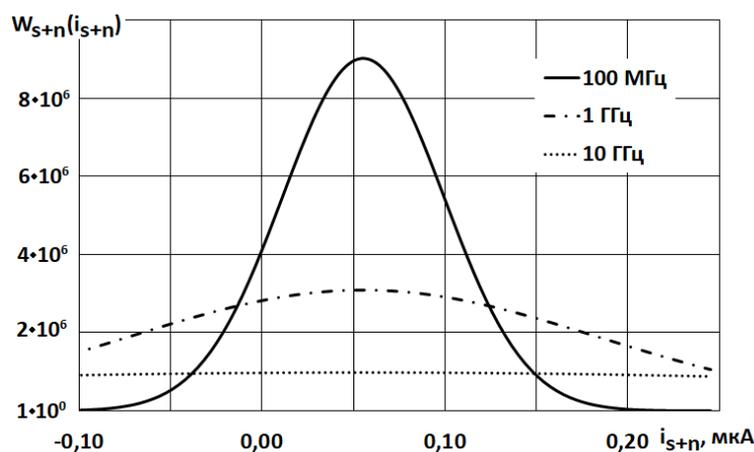


Рисунок 4 – ФПВ смеси сигнала и аддитивных шумов для канала с полосой 100 МГц, 1 ГГц и 10 ГГц протяженностью трассы 100 м
Figure 4 – Probability density function of additive noise mixture and signal currents for a channel with bandwidth of 100 MHz, 1 GHz, and 10 GHz (100 m path length)

Анализ зависимостей на рисунках 3, 4 показывает, что увеличение протяженности трассы (и соответственно увеличение ослабления) приводит к ожидаемому уменьшению среднего значения мощности принятого сигнала, при этом абсолютное значение среднеквадратического отклонения также уменьшается. Стабильность параметров морской воды, характерная для прозрачного моря на глубинах свыше 200 метров, позволяет пренебречь разбросом значений сигнала вследствие флуктуаций коэффициента передачи канала.

Сравнение рисунков 3 и 4 показывает, что на небольших расстояниях, в данном случае 10 метров, ФПВ смеси сигнала и аддитивных шумов для различных полос пропускания канала сливаются, так как основным компонентом смеси здесь является полезный сигнал. С увеличением расстояния начинают преобладать шумовые компоненты, имеющие зависимость от полосы пропускания канала. При этом увеличение полосы приводит к увеличению мощности шумовых составляющих смеси сигнала и аддитивных шумов.

Как правило, в оптических приемных системах связи решение о наличии сигнала принимается, если превышен заранее установленный порог решения, оптимальный выбор кото-

рого осуществляется на основании отношения правдоподобия. Критерием оптимума здесь служит минимум вероятности ошибки на двоичную единицу (вероятность битовой ошибки).

Для кодоимпульсной модуляции по интенсивности (КИМ-ИМ), широко используемой в оптических системах передачи информации, средняя вероятность ошибки на двоичную единицу вычисляется по формуле [6]:

$$P_e^B = p(1 - P_{SN}^B) + (1 - p)P_N^B, \quad (12)$$

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 превышения шумами порогового уровня I_{II} .

В случае равновероятной передачи «нулей» и «единиц» формула (12) приобретет вид

$$P_e^B = \frac{1}{2}(1 - P_{SN}^B + P_N^B). \quad (13)$$

С учетом формул (10) и (11) получим вероятность ошибки на двоичную единицу подводного открытого оптического канала передачи информации при использовании модуляции КИМ-ИМ:

$$P_e^B = \frac{1}{2} \left(1 - \int_{I_{II}}^{\infty} (W_{s+n}(i) + W_n(i)) di \right). \quad (14)$$

Значения оптимального порога обнаружения I_{II} для различных протяженностей трассы распространения оптического сигнала с шириной полосы канала 100 МГц и 1 ГГц, вычисленные по формуле (14), сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения вероятности ошибки и оптимального порога обнаружения для разной протяженности трассы распространения

Table 1 – BER and optimal detection threshold for different lengths of propagation path

Длина трассы, м		10	20	30	40	50	100	
Ослабление, дБ		34	40	44	47	50	58	
Ширина полосы пропускания канала	1 ГГц	P_e^B	$5 \cdot 10^{-10}$	10^{-8}	10^{-6}	$1,3 \cdot 10^{-4}$	10^{-2}	0,42
		I_{II} , мкА	1	0,9	0,6	0,5	0,3	0,056
	100 МГц	P_e^B	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$5,7 \cdot 10^{-8}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	0,1
		I_{II} , мкА	0,9	0,44	0,26	0,22	0,2	0,056

Увеличение протяженности трассы распространения приводит к уменьшению среднего уровня полезного сигнала, вследствие чего при неизменном пороге обнаружения возрастает вероятность пропуска сигнала $(1 - P_{SN}^B)$. С другой стороны, на дальних расстояниях полезный сигнал сильно «зашумлен», в результате растет вероятность превышения шумом порогового значения тока I_{II} . Это приводит к возрастанию вероятности ошибки P_e^B . Практически можно считать, что при заданных параметрах моделирования приемлемая вероятность ошибки ($\approx 10^{-6}$) обеспечивается на расстояниях до 30 – 50 м при передаче видеоданных модуляцией КИМ-ИМ без дополнительного помехоустойчивого кодирования.

Учитывая, что скорость передачи данных R_0 связана с электрической шириной полосы пропускания канала B зависимостью:

$$R_0 \leq \frac{B}{3},$$

реальная скорость передачи данных составит примерно 330 Мбит/с на дальности до 27 м или 33 Мбит/с на дальности до 45 м.

Сужение полосы канала позволяет уменьшить вероятность ошибки на двоичную единицу, но приводит к уменьшению скорости передачи данных. Обеспечение приемлемой вероятности ошибки при передаче видеопотока на расстояние до 100 м требует уменьшения по-

лосы канала до 1,6 МГц при заданных параметрах моделирования. Альтернативным способом увеличить дальность работы подводного открытого оптического канала передачи информации является использование лазерных передатчиков большей мощности. Например, повышение мощности в 10 раз, с 0,1 до 1 Вт даст возможность обеспечить передачу потока видеоданных на 100 м по каналу с полосой 160 МГц с вероятностью ошибки на двоичную единицу 10^{-6} .

Применение корректирующего кодирования

Корректирующие коды с обнаружением и исправлением ошибок характеризуются избыточностью передаваемой информации. В блоковых кодах сообщение состоит из блока длиной n , в котором содержится k информационных и r проверочных символов.

Исправление t ошибочных символов на входе декодера требует количества проверочных символов не менее $r = 2t_d$, а кодовое расстояние определяется по формуле $d = 2t_d + 1$ [8, 9].

Энергетический выигрыш кодирования (ЭВК) для жесткого декодирования оценивается по формуле [9]:

$$\text{ЭВК} = 10 \lg \left(g \frac{d+1}{2} \right), \quad (15)$$

где $g = r/n$ – избыточность кодирования.

ЭВК для алгоритмов мягкого декодирования вычисляется по формуле [9]:

$$\text{ЭВК} = 10 \lg (gd). \quad (16)$$

Скорость передачи данных при применении помехоустойчивых видов кодирования снижается за счет избыточности:

$$R = R_0 v_k,$$

где $v_k = k/n$ – кодовая скорость.

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 Боуза – Чоудхари – Хоквингема (БЧХ). Данный класс кодов используется для систем цифровой записи «компакт-дисков» CD-ROM и DVD, в наземных системах телевидения высокого разрешения HDTV, для модемов кабельных линий, в системах хранения информации с возможностью восстановления при повреждении, в стандарте цифрового видеовещания DVB и др. [8].

Результаты расчета предельных расстояний передачи данных, полученные с учетом формул (15) и (16), при использовании 8-ричных кодов Рида – Соломона при допустимой вероятности битовой ошибки не более 10^{-6} показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Предельные расстояния передачи информации при использовании 8-х кодов Рида – Соломона для подводного открытого оптического канала

Table 2 – Information transmission distance limit when using 8 Reed-Solomon codes for underwater wireless optical channel

Полоса пропускания канала	Код Рида-Соломона	Кодовая скорость, v_k	Предельное расстояние, м (от алгоритма декодирования)	
			Жесткий	Мягкий
100 МГц	(7,3,4)	0,429	56	68
	(7,1,6)	0,143	72	88
1 ГГц	(7,3,4)	0,429	34	42
	(7,1,6)	0,143	48	58

Использование кодирования сопровождается увеличением расстояния и снижением скорости передачи данных. Так, при применении кода РС(7,3,4) пропускная способность канала уменьшится с восьми до трёх видеопотоков $720 \times 480 @ 15$ (где 720×480 – количество точек по

горизонталю и вертикали, а 15 – скорость воспроизведения видеоизображения, кадров/с) для канала с шириной полосы пропускания равной 100 МГц, а канал с шириной полосы пропускания 1 ГГц не сможет обеспечить передачу видеопотока высокой чёткости 4096x2048@30, однако останется возможность передавать до семи видеопотоков 1280x1024@42,2 или 2 – 3 видеопотока 1920x1080@30,1. Использование кода РС(7,1,6) позволит передать лишь один видеопоток 720x480@15 для канала с электрической шириной полосы, равной 100 МГц, а для канала 1 ГГц – два видеопотока 1280x1024@42,2.

Заклучение

Обоснована статистическая модель шумов фотодетектора оптического приемника, предназначенного для работы в составе подводного открытого оптического канала передачи информации на основе когерентного источника оптического излучения. При моделировании был взят синий лазерный диод NDB4116 с мощностью излучения 100 мВт, а на приемной стороне использовался фотодиод S5973-02 с пиком чувствительности на длине волны 450 нм.

Согласно проведенному расчету, при использовании модуляции КИМ-ИМ на дистанции от 10 до 100 м вероятность ошибочного приема составит от $0,23 \cdot 10^{-9}$ до 0,42 с оптимальным порогом обнаружения от 1 до 0,056 мкА. Обеспечение вероятности ошибки на двоичный символ не более 10^{-6} в прозрачном море при передаче данных на расстояние до 100 м возможно, если ширина полосы канала не более 1,6 МГц для мощности передатчика 0,1 Вт. Увеличение мощности передатчика до 1 Вт позволяет расширить полосу канала передачи информации до 160 МГц. Применение корректирующих кодов с кодовой скоростью $v_k = 0,143$ позволяет увеличить дальность передачи данных до 115 % для полосы пропускания 100 МГц и до 34 % для полосы пропускания 1 ГГц. Оптимальный с точки зрения вероятности ошибки порог обнаружения пересчитывается в каждом конкретном случае исходя из параметров канала и фотодетектора с использованием полученной модели. Таким образом, возможными способами увеличения эффективной дистанции являются:

- применение помехоустойчивых видов кодирования;
- увеличение мощности передатчика;
- улучшение различимости полезного сигнала на фоне шумов за счет снижения скорости передачи (и соответствующего сужения полосы канала).

Кроме вышперечисленных способов, возможны также увеличение диаметра приемной апертуры и применение фотодетекторов с улучшенными шумовыми характеристиками. В рамках данной работы они не рассматривались, так как их техническая реализация не всегда осуществима.

Оптимальным с точки зрения аппаратных затрат решением является использование помехоустойчивого кодирования. Полученные результаты расчета показывают, что использование кода РС(7,1,6) с кодовой скоростью 0,143 позволяет увеличить дальность передачи данных с 27 до 58 м при полосе пропускания канала 1 ГГц и с 45 до 68 м при полосе пропускания канала 100 МГц. Увеличение предельной дальности при этом сопровождается уменьшением скорости передачи данных, однако в отличие от мощности, диаметра приёмной апертуры и других аппаратных параметров кодовую скорость (вид кодирования) можно адаптивно изменять в процессе работы, что делает возможным создание когнитивной системы передачи информации на основе подводного открытого оптического канала.

Библиографический список

1. Кириллов С. Н., Аронов Л. В. Определение характеристик подводного открытого оптического канала передачи информации на больших глубинах // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 63. С. 40-48.
2. Кириллов С. Н., Балюк С. А., Кузнецов С. Н., Есенин А. С. Разработка модели распространения оптического сигнала в водной среде для подводных систем передачи информации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 40. С. 3-8.

3. **Kaushal H.** Underwater optical wireless communication [Текст] / H. Kaushal, G. Kaddoum // IEEE Access, volume 4, 2016, pp. 1518-1547.
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. **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.
6. **Прагт В.К.** Лазерные системы связи. Пер. с англ. под ред. А.Г. Шереметьева. [Текст]. М.: Радио и связь. 1993. 232 с.
7. **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.
8. **Морелос-Сарагоса Р.** Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение [Текст] / Р.Морелос-Сарагоса / пер. с англ. В. Б. Афанасьева. М.: Техносфера, 2006. 320 с.
9. **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.

UDC 621.371

BANDWIDTH CAPACITY OF THE UNDERWATER WIRELESS OPTICAL TELECOMMUNICATION CHANNEL WITH INTENSITY CODE-PULSE MODULATION

S. N. Kirillov, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-3673-5709, e-mail: kirillov.lab@mail.ru
L. V. Aronov, Senior lecturer, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0001-9010-3836, e-mail: LVArroNov@yandex.ru

Underwater wireless optical communication channel capacity with pulse-code modulation by intensity (PCM) is estimated. The aim is to substantiate signal statistical model at receiver photodetector output of underwater wireless optical communication channel, taking into account the internal noise of photosensitive element, as well as to assess the feasibility of using correction codes. The statistical characteristics of optical receiver photodetector noise designed to operate as part of underwater wireless optical (laser) communication channel are considered. The statistical model is substantiated and the channel capacity is determined in absence and presence of Reed-Solomon code. The form of probability density function has been substantiated and the statistical characteristics of additive noise as well as the mixture of noise and useful signal have been calculated. The probabilities of binary signal reception error during PCM modulation in underwater wireless optical communication channel are obtained; the results have shown that at a distance of 10 to 100 m the probability of erroneous reception is from $0,23 \cdot 10^{-9}$ to $4,2 \cdot 10^{-1}$ s with high detection threshold from 1 to $0,056 \mu\text{A}$ and channel bandwidth from 100 to 1000 MHz. With given channel parameters and transmitter power of 0,1 W, it is possible to ensure the operation of optical communication channel in clear sea, at the distance of up to 100 m, with 1,6 MHz bandwidth and error probability per binary symbol of no more than 10^{-6} . Using Reed-Solomon correction code with code rate of 0.143 data transmission range is increased by 115 % for 100 MHz bandwidth and by 34 % for 1 GHz bandwidth.

Key words: underwater optical wireless communication channel, optical communication, free space optical channel, mathematical model, underwater communications systems.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-3-13

References

1. **Kirillov S. N., Aronov L. V.** Opredelenie karakteristik podvodnogo otkrytogo opticheskogo kanala peredachi informacii na bol'shikh glubinah. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2018, no. 63, pp. 40-48. (in Russian).
2. **Kirillov S. N., Balyuk S. A., Kuznecov S. N., Esenin A. S.** Razrabotka modeli rasprostraneniya opticheskogo signala v vodnoj srede dlya podvodnykh sistem peredachi informacii. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2012, no 40, pp. 3-8. (in Russian).
3. **Kaushal H.** Underwater optical wireless communication [Tekst] / H. Kaushal, G. Kaddoum. *IEEE Access*, volume 4, 2016, pp. 1518-1547.
4. **Jaruwatadilok S.** Underwater wireless optical communication channel modeling and performance evaluation using vector radiative transfer theory [Tekst] / S. Jaruwatadilok. *IEEE Journal on selected areas in communications*. 2008. No. 9, vol. 26, pp. 1620-1627.
5. **Mazin A.A.A.** Characteristics of optical channel for underwater optical wireless communication system [Tekst] / Ali A. Ali Mazin. *IOSR Journal of electrical and electronics engineering*. 2015, vol. 10, p. 9
6. **Pratt V.K.** *Lazernye sistemy svyazi*. Per. s angl. pod red. A.G. SHERemet'eva. [Tekst]. Moscow: Radio i svyaz'. 1993, 232 p. (in Russian).
7. **Aronov L.V.** Modelirovanie otnosheniya signal-shum podvodnogo otkrytogo opticheskogo kanala peredachi informacii [Tekst] / L. V. Aronov. *Informacionnye tekhnologii, mezhvuzovskij sbornik nauchnykh trudov*. Ryazan': Ryazanskij gosudarstvennyj radiotekhnicheskij universitet. 2018, pp. 7-10. (in Russian).
8. **Morelos-Saragosa R.** *Iskusstvo pomekhustojchivogo kodirovaniya. Metody, algoritmy, primenenie* [Tekst] / R. Morelos-Saragosa / per. s angl. V. B. Afanas'eva. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 320 p. (in Russian).
9. **Zhuravlyov V. G.** *Pomekhustojchivyye kody: ucheb. posobie* [Tekst] / V.G. Zhuravlyov, N.Yu. Kuranova, Yu.Yu. Evseeva; Vladim. gos. un-t im. A. G. i N. G. Stoletovyh. Vladimir: Izd-vo VIGU, 2013. 96 p. (in Russian).