

## ПОДВОДНЫЙ БЕСПРОВОДНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ КАНАЛ С ДВУХЦВЕТНОЙ СХемой ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

*Дмитриев В.Т., к.т.н., доцент, зав. кафедрой РУС РГРТУ, e-mail: vol77@rambler.ru*  
*Аронов Л.В., к.т.н., доцент кафедры РУС РГРТУ, e-mail: aronov.l.v@rsreu.ru*

### UNDERWATER WIRELESS OPTICAL CHANNEL WITH BI-COLOR DATA TRANSMISSION SCHEME

*Dmitriev V.T., Aronov L.V.*

*The article proposes to use a two-color data transmission scheme based on NDB4116 and NDA4216 semiconductor laser LEDs in an underwater wireless optical channel to increase the range. Computer modeling has shown that the gain in distance ranges from 1.6 % to 5.6 % for given initial data, however, a twofold increase in throughput is possible. It is proposed to use this property to increase the rarefaction of video data streams transmitted over an underwater wireless optical channel, and also to use an optical transmitter based on a 473 nm laser as a service or reverse low-speed channel. Brief recommendations are given to improve the efficiency of the proposed scheme.*

**Key words:** underwater optical wireless communication channel, optical wireless communication, free space optic, underwater communication, optical communication line.

**Ключевые слова:** подводный оптический канал передачи информации, оптическая связь, беспроводной оптический канал, подводная связь, оптические линии связи.

#### Введение

Основным недостатком подводного беспроводного канала передачи данных является значительная величина коэффициента ослабления, который, с учётом геометрических потерь и мутности воды может достигать нескольких дБ/м [1]. В результате с увеличением дальности передачи данных падает пропускная способность подводного канала, при этом увеличение концентрации хлорофилла и органических взвесей также приводит к дополнительному ослаблению, и как следствие, снижению скорости передачи данных. Основное назначение беспроводного оптического канала на основе полупроводникового лазера в условиях морской среды – передача потоков видеоданных в реальном масштабе времени. Например, для целей управления автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) достаточно скорости до 3 кбит/с, что может быть обеспечено обычным гидроакустическим каналом передачи данных, с помощью серийно производимых модемов и аппаратуры акустической связи. [2]. Однако дистанционное управление подводными беспилотниками требует наличия высокоскоростного канала, обеспечивающего передачу потоков видеоданных в реальном масштабе времени, в интересах передачи информации с бортовых камер АНПА на пункт управления, в роли которого может выступать буй, маяк или другой погруженный подводный аппарат, пилотируемый или необитаемый [3].

Скорость передачи видеопотока стандартной чёткости с разрешением 720x480@15 (максимальное количество кадров в секунду – 15) составляет не менее

*В статье предложено использовать двухцветную схему передачи данных на основе полупроводниковых лазерных светодиодов NDB4116 и NDA4216 в подводном беспроводном оптическом канале, в увеличении дальности. Компьютерное моделирование показало, что выигрыш по расстоянию составляет от 1,6 % до 5,6 % при заданных исходных данных, однако при этом возможен двухкратный рост пропускной способности. Предложено использовать это свойство для увеличения разрежения передаваемых по подводному беспроводному оптическому каналу потоков видеоданных, а также использовать оптический передатчик на основе 473 нм лазера в качестве служебного или обратного низкоскоростного канала. даны краткие рекомендации по повышению эффективности предложенной схемы.*

4 Мбит/с. Применяя помехоустойчивое кодирование возможно обеспечить передачу данных с заданной скоростью на расстояние до 180 метров, однако следует учитывать, что уменьшение кодовой скорости связано с расширением полосы канала, в результате на фотоприёмнике уменьшается отношение сигнал-шум, поэтому данный метод работает в определённых рамках, применительно к условиям распространения сигнала и у учётом вида кодирования [4]. Очевидный способ, увеличение мощности ограничен излучаемой мощностью серийно выпускаемых полупроводниковых лазеров, оптической прочностью линз оптической системы и требованиями по энергоэффективности, связанными с ограниченными возможностями бортового источника питания. Таким образом для увеличения дальности передачи потоков видеоданных нужны аппаратные технические решения, одним из которых может быть использование многоцветной схемы передачи данных. При этом поток видеоданных разбивается на два потока, которые передаются отдельно лазерами разных длин волн, а на приёмном конце принятые потоки объединяются в один.

**Целью работы** является исследование двухцветной схемы передачи данных в подводном беспроводном

оптическом канале, определение максимальной дальности передачи без кодирования и сравнение со стандартной одноцветной схемой.

**Структурная схема двухцветного подводного беспроводного оптического канала**

Рассмотрим возможную структуру подводного беспроводного оптического канала передачи данных с двумя полупроводниковыми лазерами разных длин волн. Схема подразумевает необходимость размещения на борту АНПА двух оптических передатчиков, которые целесообразно сделать с отдельными линзами. Приёмная часть также должна включать два оптических приёмника с отдельными линзами, при этом вследствие расхождения и рассеяния, при достаточно большом расстоянии, оба приёмника окажутся в зоне пятна, образованного пересечением лучей оптических передатчиков (рис. 1).

В общем случае угол рассеяния лазерного пучка в морской воде зависит от ряда параметров: глубины, температуры, солёности, длины волны и т.д. Расчёты показывают, что на расстоянии  $L = 50$  м средний угол рассеяния составит  $\theta = 0,9^\circ$ , а радиус пятна, образованного срезом лазерного луча на данном расстоянии составляет  $R_{\text{луч}} = 1,58$  м [5, 6]. Таким образом, если взять линзы диаметром 5 см и расположить их в пределах 5 см друг от друга, оба оптических приёмника окажутся в зоне одновременного действия двух оптических передатчиков. Однако в таком случае необходимо до-

полнительно добавить светофильтры на соответствующие длины волн, при этом структурная схема примет вид, показанный на рис. 2.

В качестве источников излучения выберем лазерные светодиоды NDB4116 и NDA4216 с мощностью оптического излучения 100 мВт, имеющих близкую длину волны, 445 нм и 473 нм соответственно. Эти длины волны соответствует синему диапазону и близки к оптимальному значению для прозрачного моря [6]. Основной технической проблемой для, представленной на рис. 2 является необходимость разделения на приёмной стороне двух близко расположенных оптических несущих. Выполнить это возможно с помощью светофильтров, например, серийно производимых GCC-2021. К достоинствам данных устройств можно отнести узкополосность: полуширина спектра подавления составляет  $10 \pm 2$  нм, при максимальном отклонении длины волны  $\pm 2$  нм от центральной. Коэффициент подавления составляет 0,01 %, а коэффициент прохождения светофильтра не менее  $\tau_{\text{сф}} \geq 0,85$ . Таким образом вносимые потери мощности не превышают 0,7 дБ.

С учётом того, что разнос длин волн, выбранных лазерных светодиодов составляет 28 нм. Для более подробного анализа представим параметры лазерных светодиодов и соответствующих им светофильтров в виде табл. 1.

Проанализируем данные табл., светофильтр GCC-202101 имеет центральную длину волны 442 нм, с учётом возможного отклонения характеристик его полоса может составлять 430-454 нм, а светофильтр GCC-202102 с

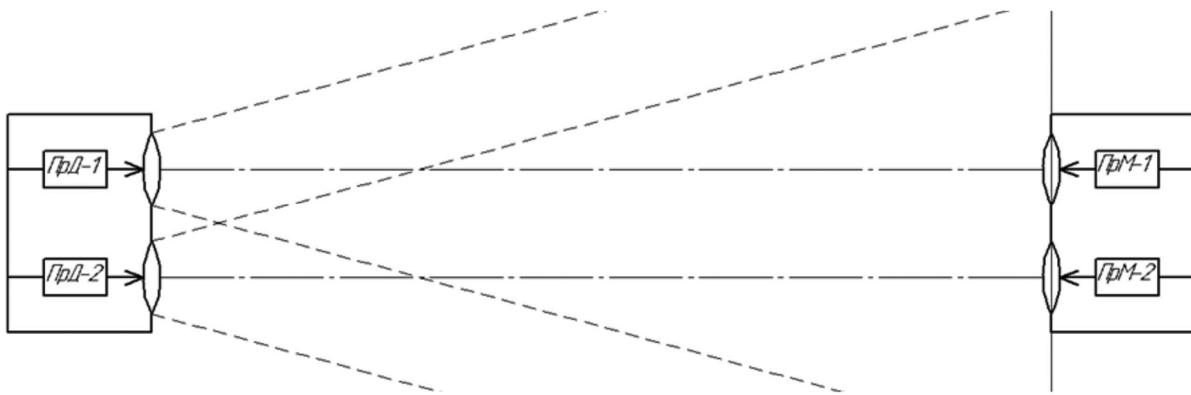


Рис. 1. Ход лучей и относительное расположение приемников и передатчиков

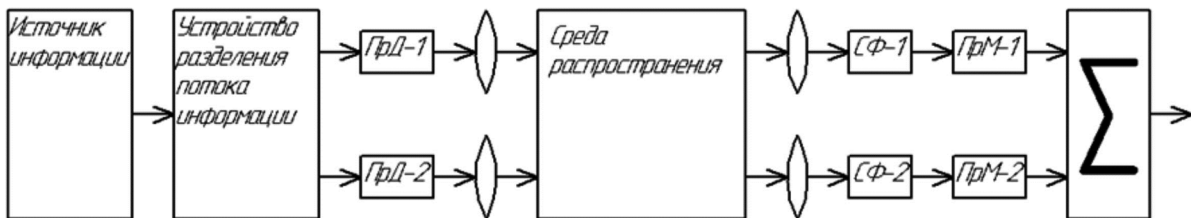


Рис. 2. Структурная схема подводного беспроводного оптического канала передачи данных на основе двух полупроводниковых лазеров с разными длинами волн

Таблица 1. Классификация океанских вод по Н.Г. Жерлову

Светодиод	Длина волны $\lambda$ , нм			Светофильтр	
	min	средняя	max	Марка	$\lambda$ , нм
NDB4116	440	445	450	GCC-202101	442
NDA4116	468	473	478	GCC-202102	470

центральной длиной волны 470 нм может иметь разброс 458-482 нм. Таким образом минимальное возможное расстояние между полосами светофильтров по половинной ширине спектра составит 4 нм. Оба светофильтра включают в себя весь возможный разброс длин волн для соответствующего лазерного светодиода. При этом минимально возможное расстояние между границами спектров полупроводниковых лазеров NDB4116 и NDA4216, исходя из их характеристик, составит 18 нм. Эту величину можно считать защитным интервалом т.к. фактически большего сближения спектров оптических сигналов в данном случае невозможно.

### Выбор исходных данных моделирования и расчёт предельной дальности

В качестве фотоприёмника выбран фотодиод S5973-02, обладающий равномерной кривой чувствительности во всём видимом диапазоне длин волн (рис. 3).

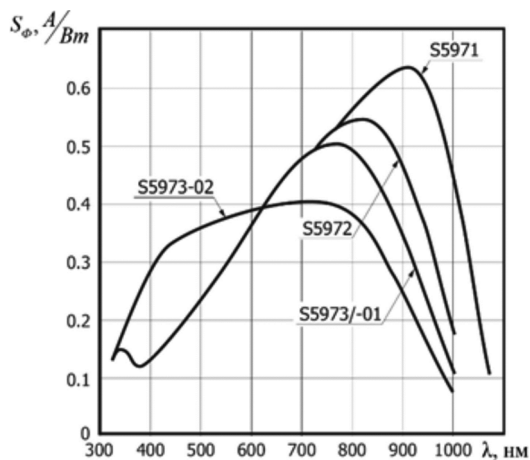


Рис. 3. Кривая чувствительности фотодиодов семейства S597x

Характеристики фоточувствительности приведены при температуре р-п – перехода  $T = 298K$ . Кроме того фотодиод S5973-02 способен обеспечить электрическую ширину полосы частот оптического приёмника до 1 ГГц и обладает наименьшим темновым током среди фотодиодов семейства S597x ( $I_D \leq 0,1nA$ ). Фоточувствительность на рабочих длинах волн лазерных светодиодов NDB4116 и NDA4216 в среднем равна

$S_\phi = 0,35 \text{ А/Вт}$ . Пороговая мощность,  $P_{ПОР}$  равна:

$$P_{ПОР} = \frac{I_D}{S_\phi} = \frac{0,1 \cdot 10^{-9}}{0,35} \approx 0,3 \text{ нВт или } -95 \text{ дБВт}$$

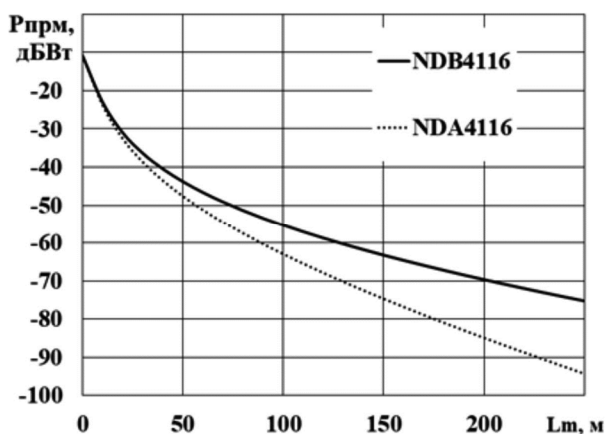
Коэффициенты пропускания линз оптической системы передатчика и приёмник примем равными 0,9, сопротивление нагрузки (входное сопротивление трансимпедансного усилителя)  $R_L = 10 \text{ кОм}$ , а диаметр линз оптического приёмника и оптического передатчика – 0,05 м.

Скорость передачи данных  $R_0$  связана с шириной полосы пропускания канала  $B$  [7]:  $R_0 \leq B / 3$ .

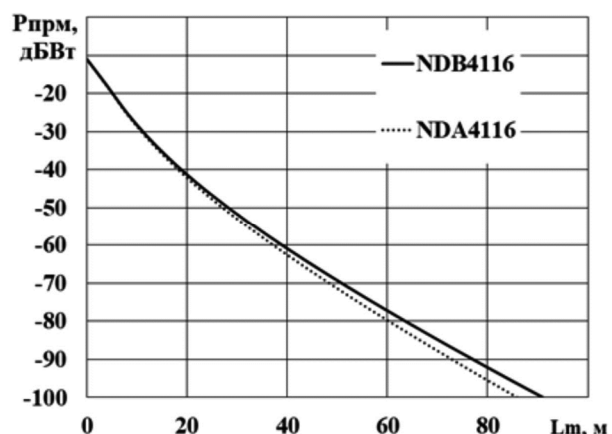
При передаче видеоизображения стандартной чёткости 720x480@15 (разрешение 720x480 точек, максимальное количество кадров в секунду – 15) требуемая пропускная способность канала передачи данных 4 Мбит/с. Проведем расчёт принятой мощности, согласно методике и алгоритму изложенному в работах [3, 4] (рис. 4). Анализ полученных результатов показывает, что в воде типа «прозрачное море» лазерный светодиод NDB4116 который достигает пороговой мощности – 95 дБВт на расстоянии более 250 метров. А NDA4116 – на расстоянии 225 метров. В воде типа «чистый океан», при замутненности 0,3 мг/м<sup>3</sup> оба лазерных светодиода способны обеспечить пороговую мощность на расстоянии 80±3 метра, т.е. зависимость затухание от расстояния примерно одинаковая. Нужно учитывать, что обеспечение скорости передачи данных требует мощности существенно превышающей порог чувствительности фотодетектора оптического приёмника.

Приняв допустимую величину вероятности битовой ошибки  $BER \leq 10^{-6}$  оценим предельную дальность для оптических передатчиков на основе полупроводниковых лазеров NDB4116 и NDA4216 при текущих параметрах моделирования для канала с кодоимпульсной модуляцией по интенсивности, используя методику расчёта описанную в работе [3]. Результаты расчёта вероятности битовой ошибки при фиксированной скорости 4 Мбит/с приведены на рис. 5.

В «прозрачном море» дальность связи составит 190 м для полупроводникового лазера NDB4116 и 123 м для полупроводникового лазера NDA4216. Таки образом, на длине волны 445 нм дальность передачи данных



а) «прозрачное море»



б) чистый океан

Рис. 4. Принятая мощность для вод

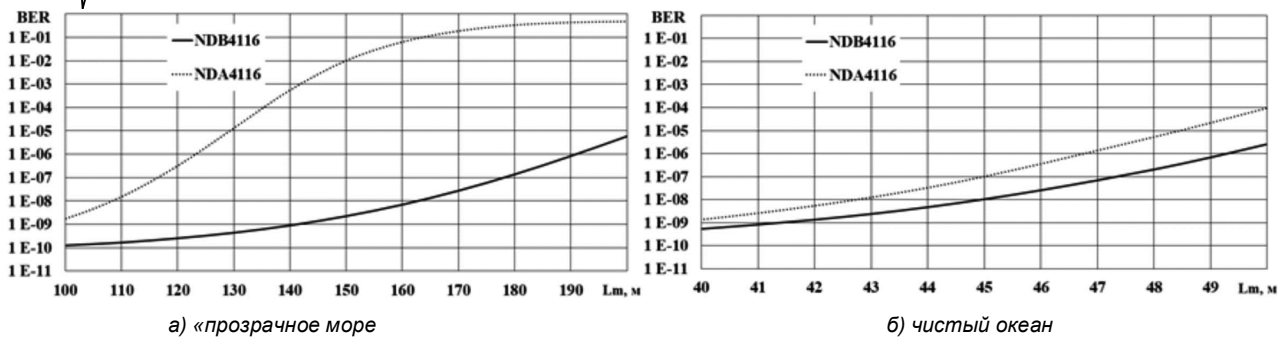


Рис. 5. Вероятность битовой ошибки для скорости 4 Мбит/с в воде

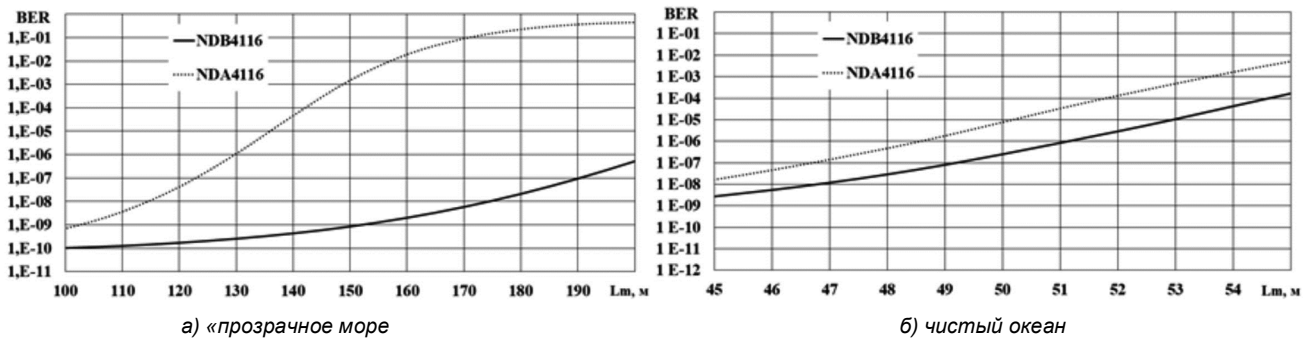


Рис. 6. Вероятность битовой ошибки для скорости 2 Мбит/с в воде

на 54 % выше, чем на длине волны 473 нм, при заданных параметрах моделирования. В воде типа «чистый океан» дальность действия подводного беспроводного оптического канала передачи данных будет различаться на 6,5 %, а формы зависимостей вероятности битовой ошибки от расстояния близки между собой, при этом дальность связи уменьшится в 2,6 раза. Аналогичные закономерности при приёме наблюдаются и для скорости 2 Мбит/с (рис. 6).

Здесь уменьшение скорости в 2 раза даёт увеличение дальности на 1,6 % для полупроводникового лазера NDB4116 и 5,6 % м для полупроводникового лазера NDA4216 в воде типа «прозрачное море». В случае более мутной воды типа «чистый океан», выигрыш по расстоянию составит 3 % и 5,4 % соответственно.

### Заключение

Результаты исследований, проведенных в настоящей статье, показывают, что уменьшению скорости не даёт значимого выигрыша по расстоянию, кроме того характеристики канала с расщеплённым видеопотоком существенно отличаются в прозрачной и замутнённой воде. Однако возможно использовать обе ветви двухцветного канала для увеличения скорости передачи данных, и как следствие, увеличения разрешения передаваемого видеоизображения. В сочетании с другими методами увеличения дальности связи, в частности применением помехозащищённого кодирования [4, 8] данный метод может быть более эффективен, но этот вопрос нуждается в отдельных исследованиях.

В случае низкой мутности воды, близких к типу «прозрачное море» канал 473 нм может играть роль служебного канала для передачи дополнительной телеметрической и служебной информации, а также возможно использование его в качестве обратного служебного канала. Это потребует минимальных аппаратных затрат в виде введения светофильтров, что приведёт также к снижению энергетического бюджета примерно на 0,7 дБ. Однако, что касается двухцветной схемы передачи, то в

текущем виде она способна дать увеличение пропускной способности, но не дальности. Причем для мутной воды возможно двукратное увеличение пропускной способности подводного беспроводного оптического канала передачи данных.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

### Литература

- Kirillov S. Improved Quality Video Transmission by Optical Channel from Underwater Mobile Robots / S. Kirillov, V. Dmitriev, L. Aronov, P. Skonnikov, A. Baukov. Studies in Systems, Decision and Control, vol. 199, Springer, 2019, pp. 227-239.
- Вершинин А.С. Сравнительный анализ гидроакустических модемов / А.С. Вершинин. Молодой ученый. 2015. № 12 (92). С. 156-161. URL: <https://moluch.ru/arc-hive/92/19982/> (дата обращения: 27.04.2021)
- Кириллов С.Н. Пропускная способность подводного оптического канала передачи информации с кодоимпульсной модуляцией по интенсивности. Вестник РГРТУ. 2020. № 4 (74). С. 3-13. DOI:10.21667/1995-4565-2020-74-3-13к.
- Аронов Л.В. Коды Рида-Соломона в подводном оптическом канале передачи информации с кодоимпульсной модуляцией по интенсивности. Вестник РГРТУ 2021. № 4 (78). С. 12-20. DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-12-20
- Аронов Л.В. Геометрические потери в подводном канале передачи информации на основе источника когерентного оптического излучения. Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 10 т. / под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2019; Рязань. С. 118-121.
- Кириллов С.Н. Определение характеристик подводного открытого оптического канала передачи информации на больших глубинах. Вестник РГРТУ 2018. № 1 (63). С. 40-48.
- Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. 3-е изд. М.: Высшая школа, 2000. 462 с.
- Кириллов С.Н. Алгоритм объективной оценки качества декодированного речевого сигнала на основе изменения спектральной динамики критических полос спектра / С.Н. Кириллов, В.Т. Дмитриев, Я.О. Картавенко. Вестник РГРТУ, 2011. №3 (37). С. 3-7.