

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.7>

УДК: 654.026

ОПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ БИМОДАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

Широков И.Б., Головин В.В., Редькина Е.А., Сердюк И.В., Овчаров П.П.

**Севастопольский государственный университет,
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33**

Статья поступила в редакцию 13 мая 2025 г.

Аннотация. В статье представлены результаты разработки прототипа оптического модуля подводного бимодального модема, предназначенного для организации беспроводной связи на глубинах до 100 метров. Применение подводной беспроводной оптической связи позволяет на небольших дистанциях организовать высокоскоростные беспроводные каналы связи для повышения эффективности работы беспилотных подводных аппаратов, выполняющих научно-исследовательские или инженерные задачи. Разработанный модуль состоит из трех плат – платы цифровой обработки сигналов, платы приёмника и платы передатчика. Разработано программное обеспечение для ПЛИС, обеспечивающее формирование импульсного сигнала с позиционно-импульсной модуляцией из цифровой последовательности, поступающей со стороны модема, а также обратное преобразование сигнала, поступающего в ПЛИС со стороны блока приемника. Обмен данными с модемом реализован на основе протокола RS-232. В связи с этим реализована скорость передачи данных 115200 бит в секунду при расстоянии между оптическими модулями до 5 м. Разработана герметичная конструкция прототипа приёмо-передающего оптического модуля. В бассейне проведены успешные испытания работы приёмо-передающего

оптического модуля в составе бимодального модема с переключением передачи данных с акустического канала связи на оптический канал связи и обратно. В дальнейшем планируется улучшить программное обеспечения ППОМ в направлении применения помехоустойчивого кодирования и более глубокой интеграции цифровой обработки сигнала в приемном тракте ППОМ.

Ключевые слова: подводная беспроводная оптическая связь, бимодальный модем, светоизлучающий диод, фотодиод.

Автор для переписки: Головин Владислав Викторович, v_golovin@mail.ru

Введение

В связи со значительным увеличением объема информации, получаемой от различных подводных сенсорных систем, в том числе систем сбора изображений и видеоданных из океана, требуется передача больших массивов, накопленных данных в пункт сбора, и обработки информации. Прокладка кабельных донных сетей является крайне дорогостоящей. Кроме того, с увеличением различных видов подводной деятельности возрастает потребность в эффективной системе подводной связи, которая использует буи, суда, телеуправляемые и автономные беспилотные подводные аппараты. Для организации подводной связи широко применяются акустические системы, которые имеют несколько неустраняемых недостатков, включая низкую скорость передачи информации, зашумленность данных и сложность в обеспечении скрытности передачи сообщений. В связи с этим все активнее разрабатывается и внедряется оборудование для организации беспроводной подводной оптической связи (UWOC). Уникальными преимуществами UWOC является скрытность и высокая скорость передачи данных. Оптические системы связи компактнее и дешевле акустических систем. Основным недостатком UWOC является небольшая дальность действия, ограниченная дальностью оптического видения под водой.

В таблице 1 представлен сравнительный анализ ряда публикаций, посвященных разработке беспроводных подводных оптических систем

связи, основанных на использовании в качестве источников излучения остронаправленных лазеров или слабонаправленных светоизлучающих диодов в диапазоне длин волн 400-500 нм.

Таблица 1. Сравнительный анализ публикаций, посвященных разработке беспроводных подводных оптических систем связи.

Источник	Фотодетектор	Модуляция	Дистанция, м	Скорость передачи данных, Гбит/с	Ссылка
Лазерный диод (LD)	Лавинный фотодиод	QAM-OFDM	5,4	4,8	[1]
		OAM-OOK	2,96	3	[2]
		OOK	20	1,5	[3]
		OFDM	1,7	14,8	[4]
		NRZ-OOK	34,5	2,7	[5]
		OFDM	21	5,5	[6]
		NRZ-OOK	34,5	2,7	[7]
	PIN-фотодиод	16-QAM	3	0,05	[8]
		OOK	1,6	0,1	[9]
	Счетчик фотонов	32-PPM	35	12,5 млн. ед/сек	[10]
532 нм LED	Счетчик фотонов	256-PPM	120	3.32 бит/фотон	[11]
521 нм LED	2 PIN PD	64-QAM-DMT	1,2	2,175 Гбит/с	[12]
470 нм LED решетка	PMT	OOK	8	19 Гбит/с	[13]
RGBYC LED	PIN PD	64QAM-DMT bit-loading-DMT	1,2	14,81-15,17 Гбит/с	[14]
Blue LED	PIN PD	64 QAM DMT	1,2	3,075 Гбит/с	[15]
458 нм LED	PIN PD решетка (2×2)	32 QAM DMT	1,2	20,09 Гбит/с	[16]
LED решетка (4×4)	PIN PD	PS-bit loading DMT	1,2	20,09 Гбит/с	[17]
450 нм LED	PIN PD	16QAM OFDM	3	50 Мбит/с	[18]
450 нм LED решетка	APD	Видеотрансляция	10	1 Мбит/с	[19]
450 нм LED	APD	PAM4	5	1,25 Гбит/с	[20]
450 нм LED	APD	GS-8QAM OFDM	3,6	2,2 Гбит/с	[21]
448 нм LED	APD	OOK	118	25 Мбит/с	[22]
480 нм LED	APD	DPIM	30	1,2 Мбит/с	[23]
470 нм LED	APD	DPIM	50	2,28 Мбит/с	[24]
Blue LED	APD	NRZ-OOK	11,5	235 Мбит/с	[25]
445 нм LED	APD	2FSK	14,5	1 Мбит/с	[26]

Примечание: в таблице используются обозначения – лазерный диод (LD), светоизлучающий диод (LED), фотодиод (PD), лавинный фотодиод (APD).

В настоящее время все более широкое применение находят подводные оптические модемы, сравнительные характеристики которых показаны в таблице 2.

Таблица 2. Подводные оптические модемы и их характеристики.

Организация	Источник света	Скорость передачи данных	Дистанция, м	Ссылка
Dalian Univ. Of Technology (2018)	LD	100 Мбит/с	4,8	[27]
MIT Lincoln Lab. (2019)	LED	1 Гбит/с	20	[28]
Sonardyne's BlueComm 100/200	LEDs	1-10 Мбит/с	10/150	[29]
Nanjing Univ. of Posts and Telecommunications (2020)	LEDs	1 Мбит/с	10	[30]
KAUST (2020)	LD	1,2 Мбит/с	2	[31]
KAUST (2021)	LED	1,5 Мбит/с	0,6	[32]
KAUST (2022)	LED	2,5 Мбит/с	5	[33]

Системы связи UWOC работают с прямым или переотражённым беспроводным оптическим каналом (каналами, реализуемых в различных форматах MIMO). Системы UWOC развиваются в направлении совершенствования схемотехнической реализации отдельных узлов и применяемой компонентной базы, в направлении увеличения дальности и скорости передачи данных, в направлении увеличения помехозащищенности и мультиплексирования с другими методами передачи данных (на акустических волнах, на электромагнитных волнах длинноволнового радиодиапазона) [34].

В данной статье представлены результаты разработки приемно-передающего модуля беспроводной системы UWOC. Данный модуль может использоваться в составе беспроводного оптического моста для различных телекоммуникационных приложений.

1. Схемотехническая реализация приемного и передающего модулей

В статье [35] были представлены результаты разработки передающего оптического модуля на основе переключателей с TTL-логикой и приемного оптического модуля на основе двух модификации широкополосного операционного усилителя: с полосой пропускания 1,1 ГГц и 8 ГГц. Для беспроводного оптического канала протяженностью до 1 м произведен сравнительный анализ временных параметров переданных последовательностей

электрических импульсов со скважностью 2 и с частотой 1 МГц при использовании различных светоизлучающих диодов (BL-L524UBC, BL-L522UBC, BL-L502UBC, FYL-5013UBC, NL-5013UBC, GNL-5053UBC, GNL-5053UBC-TL, GN2-5013BGC, BL-L563UBC) и разных фотодиодов (BPX 65, BPW24R, ФД-263-01). Полученные при этом результаты позволили подобрать комплементарную пару светодиода и фотодиода, выявить ряд схемотехнических особенностей, в том числе касательно реализации источника питания и реализовать электрические принципиальные схемы для приемного и передающего блоков разрабатываемого прототипа.

На следующем этапе разработаны схемы узлов приемо-передающего оптического модуля (ППОМ) с цифровой обработкой сигнала на основе ПЛИС. Структурная схема ППОМ показана на рис. 1.

ППОМ обменивается данными с модемом по протоколу RS-232. Для этого в составе модуля ПЛИС (рис. 2) предусмотрена микросхема DD3 MAX3232, обеспечивающая требуемый формат сигнала на линии ППОМ-модем.

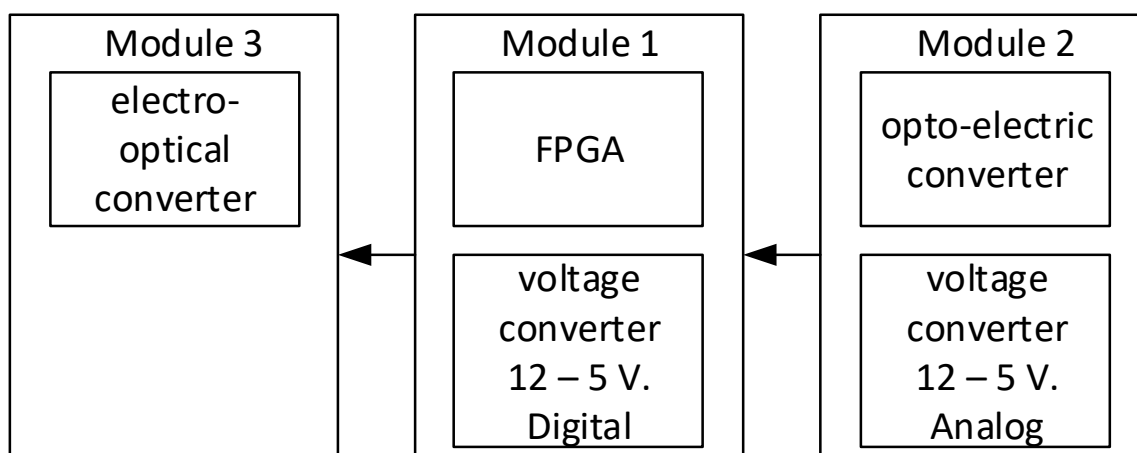


Рис. 1. Структурная схема ППОМ.

В канале передачи ППОМ с модема пакет данных поступает на вход 8 DD3 (Rx) модуля ПЛИС. На выходе 9 DD3 цифровой сигнал «UART_RxD» имеет уже логические уровни, соответствующие ПЛИС. Эта цифровая последовательность принимается ПЛИС на выделенном канале. Далее в процессе цифровой обработки сигнала выполняется позиционно-импульсная модуляция (PPM) цифровой последовательности данных. Применение PPM позволяет

получить максимальную пиковую мощность при небольшой средней мощности, что снижает видимость оптического сигнала в беспроводном канале связи и повышает его скрытность.

PPM-сигнал поступает на модуль драйвера светодиодов DD1 – микросхема MBI516 (рис. 3).

На выходах ПЛИС формируются следующие сигналы:

- «СК» – сигнал запуска (CLK) для MBI516;
- «LE» – служебный сигнал для MBI516, который определяет момент времени начала передачи PPM-сигнала на выходы драйвера с его входа «OE»;
- «DI» – передаваемые данные.

В каждом из выходных каналов управления MBI516 последовательно включено по 3 LED BL-L502UBC с длиной волны излучения 470 нм.

На приемной стороне ППОМ в Модуле-2 реализована электрическая принципиальная схема с фотодиодом (HL1) ФД-263-01 (рис. 4).

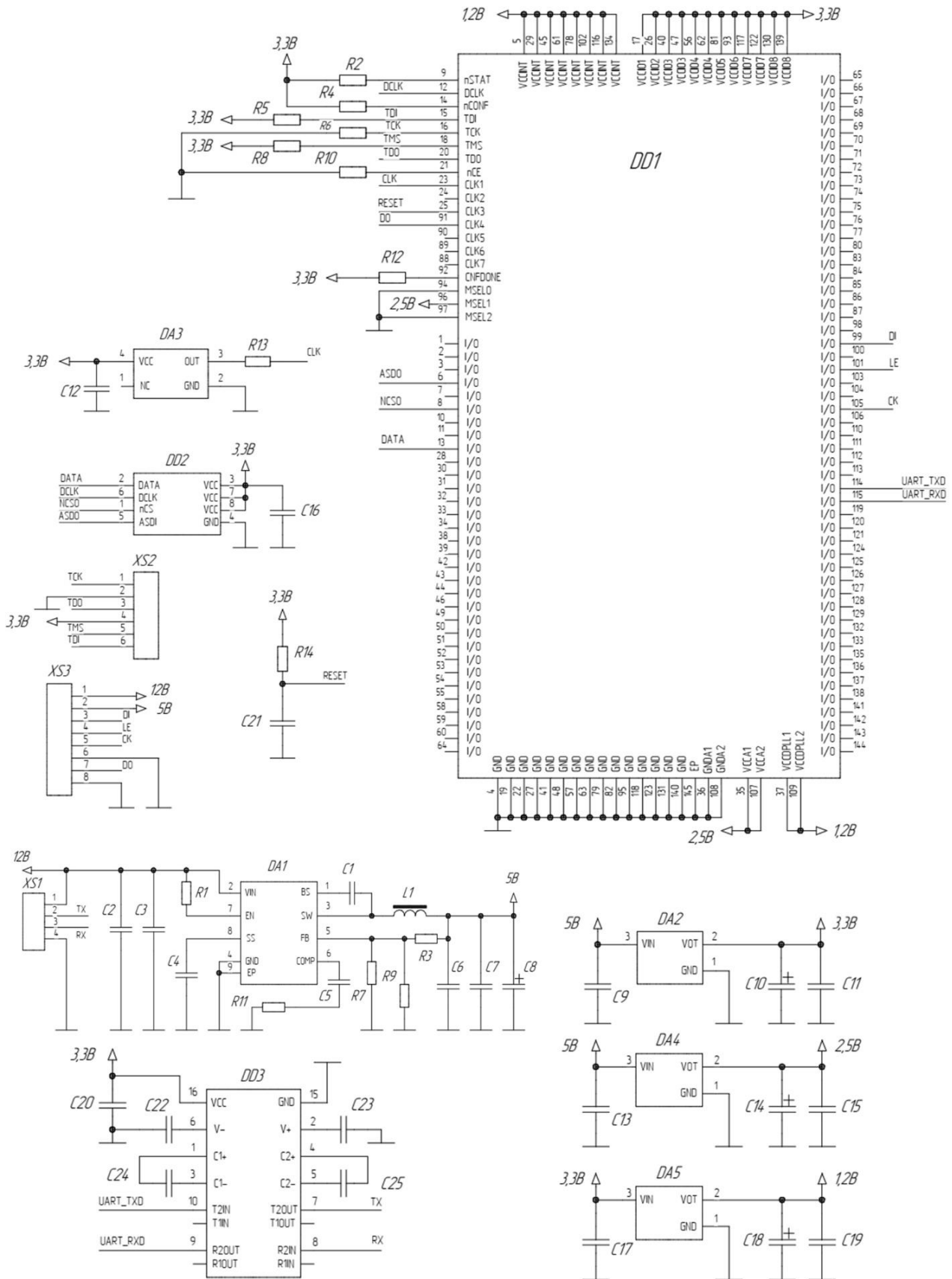


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема модуля ПЛИС.



Рис. 3. Электрическая принципиальная схема модуля драйвера светодиодов.

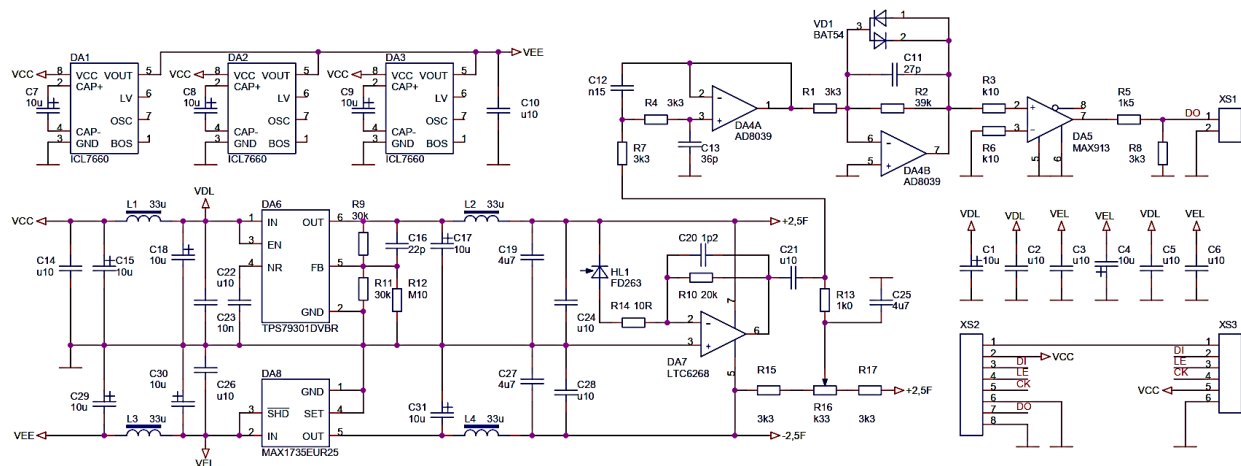


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема платы приемного оптического модуля.

Усиление фототока с выхода реализовано на операционных усилителях DA7 (LTC6268 с полосой усиления 500 МГц) и DA4A, B (AD8039 с полосой усиления 350 МГц). Далее по схеме высокоскоростной компаратор DA5 (MAX913) восстанавливает форму импульсов PPM-последовательности.

Восстановленная последовательность импульсов принятого сигнала передается на обработку ПЛИС, где детектируется PPM и восстанавливается передаваемая цифровая информационная последовательность (фрейм данных). Сформированный цифровой сигнал передается далее через микросхему MAX3232 в тракт модема.

2. Программное обеспечение приёмо-передающего оптического модуля

Реализация программного обеспечения для передающего и приёмного каналов системы беспроводной оптической подводной передачи данных основывается на том, что для работы с модемом применяется протокол RS-232. В передающем канале оптического модуля структурированный информационный фрейм поступает на ПЛИС, где он преобразуется в последовательность импульсов с бинарной модуляцией RPPM. В формируемой RPPM-последовательности логическая единица имеет длину в четыре бита и реализуется в виде последовательности бит «0010», а логический ноль – «0100». Каждая RPPM-последовательность логических символов длиной в один байт содержит стартовый и стоповый символ в виде последовательности бит «0001».

Для организации синхронизации в приёмо-передающем оптическом канале в начале передаваемой последовательности импульсов добавляются четыре синхронизирующих логических символа. Каждый из них реализован в виде последовательности бит «0110».

В приёмном тракте оптического модуля с компаратора на соответствующий вход ПЛИС поступает восстановленная принятая последовательность бит «DO». ПЛИС преобразует RPPM-последовательность в байт информации. С вывода ПЛИС «UART_TxD» информационная последовательности поступает на вход T2IN микросхемы MAX3232, с которой далее по протоколу RS-232 передается в сторону модема. На рис. 5 показана блок-схема функциональных программных модулей ПЛИС.

Для активизации драйвера светодиодов в канале передачи ППОМ, в передающей части программного модуля также предусмотрены буферные регистры для формирования тактовой последовательности из восьми единиц (CLK) и далее формирования логического сигнала (LE):

```
reg [19:0] buferCLK=20'b0000_0101_0101; // оживление драйвера – линия clk
reg [19:0] buferLE=20'b0111_0000_0000_0000; // сигнал LE.
```

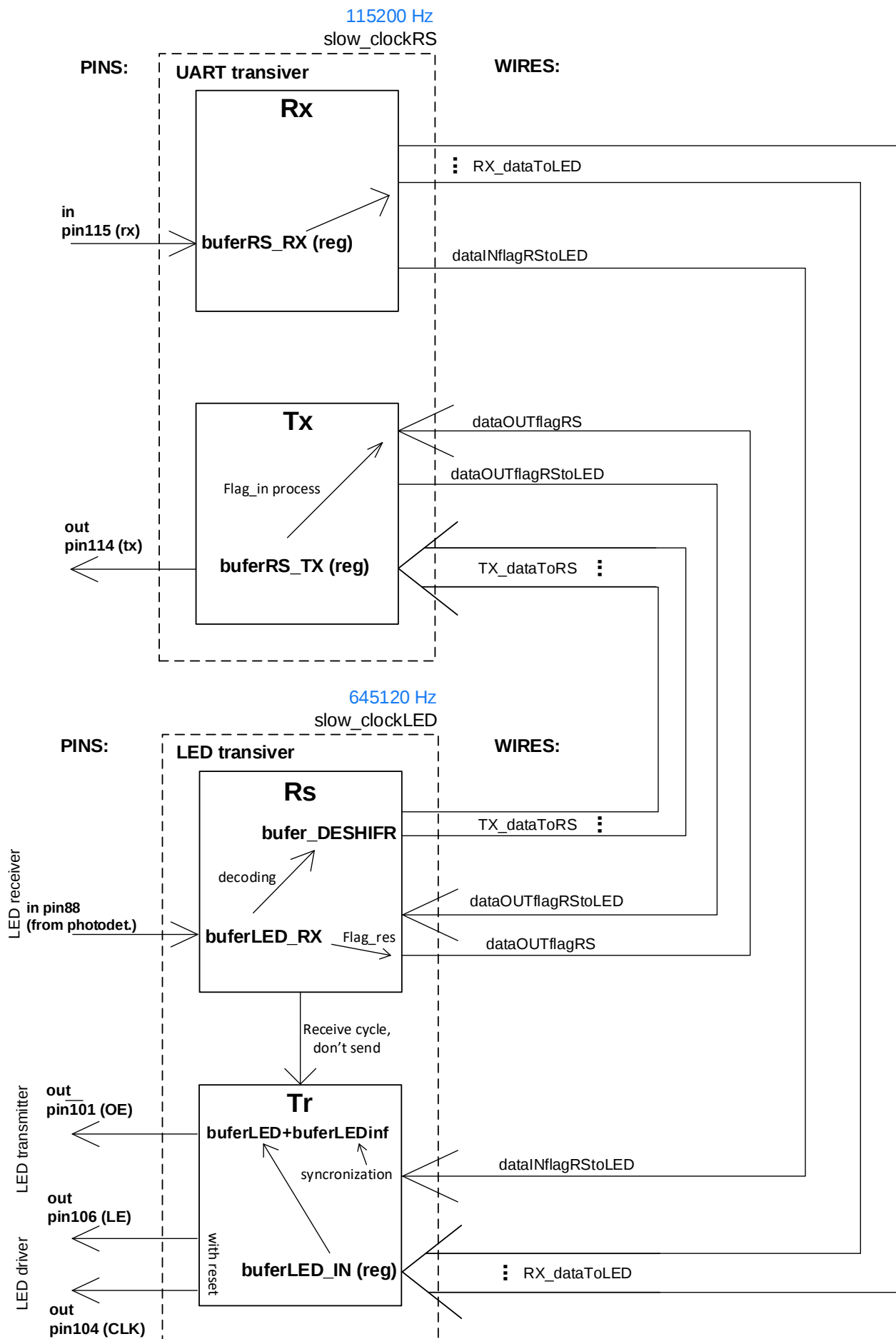


Рис. 5. Блок-схема функциональных программных модулей на ПЛИС.

Указанные сигналы реализованы согласно технической документации на восьмиканальный драйвер светодиодов MBI5167, как показано на временной диаграмме на рис. 6.

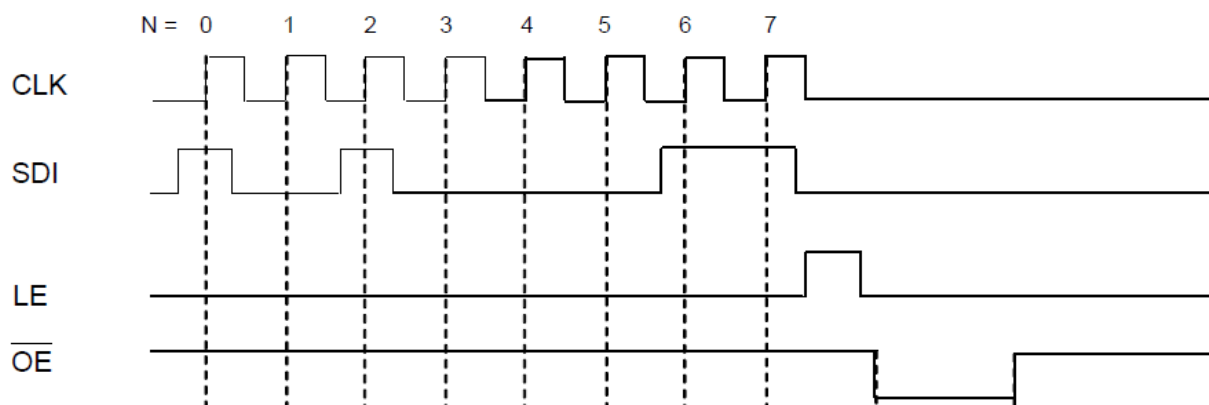


Рис. 6. Временная диаграмма активации работы драйвера MBI5167.

Программный модуль «UART transiver» содержит два буферных регистра:

– для приема цифровых данных со стороны модема (с выхода MAX3232)

а) сдвиговый регистр

```
reg [39:0] bufer_RX=40'b0000_0000_0000_0000_0000_0000_0000_0000_0000;
```

б) промежуточный приемный буфер

```
reg [31:0] bufer_RX_prom=32'b0000_0000_0000_0000_0000_0000_0000_0000;
```

– для передачи цифровых данных в сторону модема предусмотрен регистр

«дешифрованной информационной последовательности»

```
reg [7:0] bufer_DESHIFR=8'b0000_0000.
```

При инициализации буферные регистры обнулены.

Программные модули связаны между собой с помощью виртуальных «wires». Так, при приеме сигнала UART_RxD, в RX информационная последовательность записывается в wire RX_dataToLED, чтобы затем по флагу (wire dataINflagRStoLED) записаться (с фиксацией) в регистр передающего модуля buferLED_IN.

С другой стороны, при приеме PPM-последовательности со стороны фотодетектора, дешифрованная в ПЛИС последовательность данных записывается (фиксируется в регистр buferRS_TX) в wire TX_dataToRS по флагу (wire dataOUTflagRS).

Также по флагу (wire) dataOUTflagRStoLED формирование wire TX_dataToRS запрещено, что означает, что модуль «UART transiver» занят передачей данных со стороны модема в оптический канал.

Передача и прием данных в программном модуле «UART transiver» осуществляется с тактовой частотой 115200 бит в секунду, тогда как передача и прием данных в программном модуле «LED Transiver» осуществляется со скоростью в 4×2 раза больше (синхро-последовательность из 4 бит и 4 бит данных модулированного оптического сигнала). 4 бита в структуре PPM-сигнала соответствуют одному информационному биту.

Поскольку, как показали экспериментальные исследования, в канале связи оптический сигнал подвергается искажениям, причем удлиняется передний фронт и происходит уменьшение длительности оптического сигнала, то на входе приемника был реализован простейший корреляционный прием, при котором сигнал от компаратора принимается с тактовой частотой в 5 раз больше по сравнению с частотой передачи оптического бита (921600 Гц).

Размер входного сдвигового регистра соответствует приему двух формируемых на передаче синхропоследовательностей

```
reg [7:0] buferLED=8'b0110_0110,
```

то есть с учетом повышенной скорости приема он составляет $2 \times 4 \times 5 = 40$ бит.

В ходе корреляционного анализа входная последовательность из 40 бит умножается на маску maskLED с последующим суммированием всех бит

```
reg [39:0] maskLED=40'b00000_11111_11111_00000_00000_11111_11111_00000.
```

Таким образом, при возможном максимальном значении на выходе 20, порогом уверенного приема синхропоследовательности будет значение 16. Выбор меньшего значения порога, а также размера входного буфера (во сколько раз увеличивать скорость приема данных по сравнению со скоростью передачи оптического сигнала) должно быть определено экспериментальным образом, исходя из формы изменения сигнала и параметров компаратора.

Далее при превышении порога, происходит запуск начала анализа принимаемой последовательности (байта данных), причем анализ происходит

при накоплении во входном сдвиговом регистре $4 \times 10 \times 5 = 200$ бит (10 информационных бит, из которых 8 информационных бит, стартовый и стоповый биты).

Анализ переданного байта данных предполагает выполнение следующих действий:

– корреляционный анализ 20 первых и 20 последних бит, путем умножения на маску сигнала старт-стоп и последующим суммированием

```
reg [19:0] maskST=20'b11111_00000_00000_00000;
```

– если корреляционное значение больше либо равно пороговому значению (7), то производится параллельный анализ по 20 входных бит для анализа каждого информационного бита, при этом применяются одновременно маски оптического «0» и «1»:

```
reg [9:0] maskOPT1=10'b00000_11111_00000_00000;
```

```
reg [9:0] maskOPT0=10'b00000_00000_11111_00000.
```

Если в каком-то случае (для каждого информационного бита 1-8, в одной из веток анализа) корреляционное значение превышает порог 2, то принимается решение о приеме информационного бита «0» или «1», в противном случае формируется сигнал ошибки на приеме, который может быть передан в модем в так называемом бите четности.

Принятые значения информационных битов записывается в буфер buferRS_TX для дальнейшей ее передачи через модуль UART на модем.

3. Результаты макетирования и испытания прототипа ППОМ

Чертеж конструкции ППОМ показан на рис. 7.

В состав конструкции прототипа ППОМ входят:

- 1) стеклянное окно;
- 2) задняя металлическая крышка;
- 3) передняя металлическая крышка;
- 4) металлический фланец;
- 5, 13, 14) латунная стойка;

- 6) гидроизоляционная прокладка;
- 7) плата светодиодов с драйвером;
- 8) плата аналогового тракта приемника с компаратором;
- 9) плата ПЛИС с MAX3232;
- 10) металлический корпус;
- 11, 12, 16) винты;
- 15) водонепроницаемый глубоководный разъем.

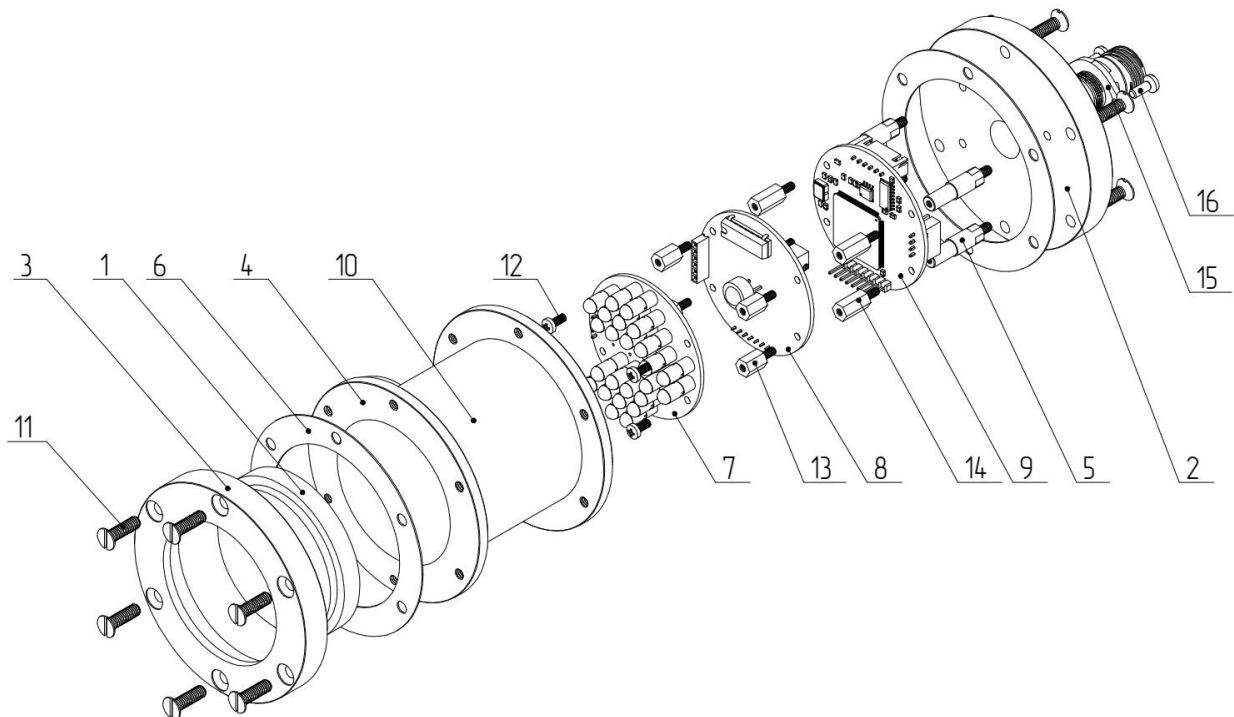


Рис. 7. Чертеж модульной конструкции ППОМ.

На внешней стороне стеклянного окна (1) предложено использовать матрицу пластмассовых линз, традиционно используемых в панельных светодиодных лампах дневного освещения для фокусировки или для равномерного рассеивания света лент светодиодов (рис. 8). Размер одной ячейки матрицы линз составляет 5×5 мм. В одном направлении линзы собирают свет от LED в небольшом секторе углов, в другом направлении – равномерно рассеивает его в широком секторе углов.



Рис. 8. Матрица пластмассовых линз для фокусировки или для равномерного рассеивания света лент светодиодов.

Исходный измерительный полигон показан на рис. 9. При включенном свете светодиодных ламп освещения с желтым спектром излучения отсутствуют помехи для работы двух ППОМ в беспроводном воздушном канале связи.



Рис. 9. Измерительный полигон для испытания ППОМ в беспроводном воздушном канале связи.

Результаты измерений осциллограмм сигналов на приемной стороне при передаче данных со скоростью 115200 бит в секунду при расстоянии между оптическими модулями 4,5 м показаны на рис. 10.



Рис. 10. Результаты измерений при передаче данных со скоростью 115,2 Кбит/с при расстоянии между оптическими модулями 4,5 м: желтый – выход МАХ3232, зеленый – выход компаратора.

Дальнейшие испытания ППОМ проводились в составе бимодального модема, один канал которого предполагает передачу данных по акустическому каналу, второй канал — по оптическому, то есть с помощью разработанного ППОМ. Макет прототипа бимодального модема показан на рис. 11.

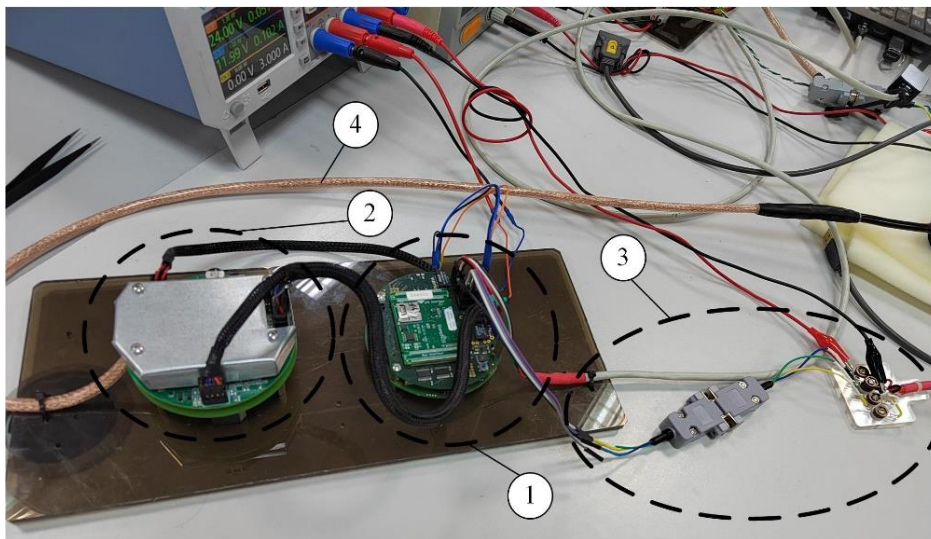


Рис. 11. Макет бимодального модема.

1 – модем; 2 – силовой блок; 3 – подключение оптического модуля;
4 – подключение акустического гидрофона.

Заключительный этап тестирования ППОМ в составе макета бимодального модема производился в бассейне с пресной водой (рис. 12). При испытании передачи данных между двумя модемами со скоростью 115 Кбит/с по подводному

беспроводному каналу связи на трассе протяженностью 2 метра и при дневном освещении получена устойчивая связь модемов.

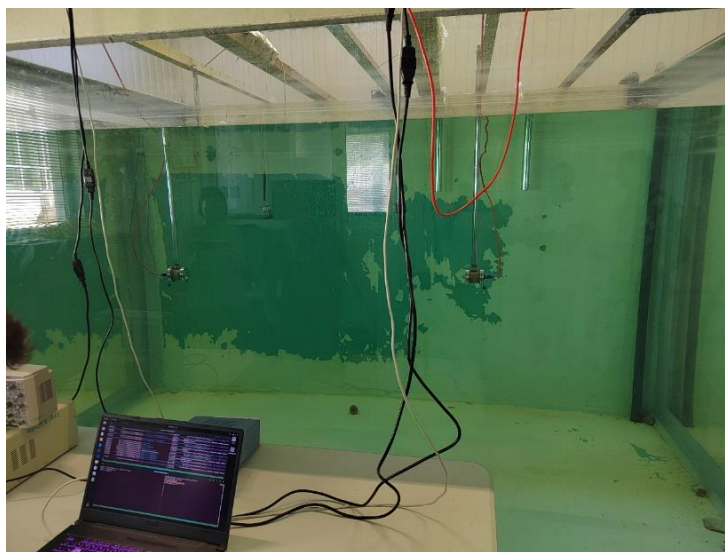


Рис. 12. Размещение в воде бассейна пары ППОМ и акустических гидрофонов.

Заключение

Разработан прототип ППОМ для организации подводной беспроводной связи по протоколу RS-232 и скоростью передачи данных 115 Кбит/с. В состав ППОМ входят модули светодиодов, аналогового тракта приемника и ПЛИС. В беспроводном канале связи передается RPM-сигнал. Габариты прототипа ППОМ цилиндрической формы составили $70 \times 77 \times 77$ мм. Линия питающего напряжения, нисходящий и восходящий каналы связи организованы между ППОМ и модемом по кабелю через глубоководный разъем.

Разработано программное обеспечение для ПЛИС, обеспечивающей формирование и дешифрацию RPM-последовательности для исходного цифрового сигнала.

На следующем этапе исследования планируется заменить внешний интерфейс RS-232 и повысить скорость обмена данными, для чего потребуется незначительная коррекция в периферийной компонентной базе.

В дальнейшем планируется разработать пластмассовый корпус ППОМ.

Также планируется дальнейшее развитие программного обеспечения ППОМ в направлении применения помехоустойчивого кодирования и более глубокой интеграции цифровой обработки сигнала в приемном тракте ППОМ.

Литература

1. Oubei H. M. et al. 4.8 Gbit/s 16-QAM-OFDM transmission based on compact 450-nm laser for underwater wireless optical communication //Optics express. – 2015. – vol. 23. – №. 18. – P. 23302-23309.
2. Baghdady J. et al. Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing //Optics express. – 2016. – vol. 24. – №. 9. – P. 9794-9805.
3. Shen C. et al. 20-meter underwater wireless optical communication link with 1.5 Gbps data rate //Optics express. – 2016. – vol. 24. – №. 22. – P. 25502-25509.
4. Huang Y. F. et al. Filtered multicarrier OFDM encoding on blue laser diode for 14.8-Gbps seawater transmission //Journal of Lightwave Technology. – 2017. – vol. 36. – №. 9. – P. 1739-1745.
5. Liu X. et al. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70 Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation //Optics express. – 2017. – vol. 25. – №. 22. – P. 27937-27947.
6. Chen Y. et al. 26 m/5.5 Gbps air-water optical wireless communication based on an OFDM-modulated 520-nm laser diode //Optics express. – 2017. – vol. 25. – №. 13. – P. 14760-14765.
7. Liu X. et al. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70 Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation //Optics express. – 2017. – vol. 25. – №. 22. – P. 27937-27947.
8. Wang J. et al. Underwater wireless optical communication system using a 16-QAM modulated 450-nm laser diode based on an FPGA //Applied Optics. – 2019. – vol. 58. – №. 16. – P. 4553-4559.

9. Li Y. et al. Design and implementation of underwater wireless optical communication system with high-speed and full-duplex using blue/green light //2018 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). – IEEE, 2018. – P. 99-103.
10. Han X. et al. Demonstration of 12.5 Ms/s 32-PPM Underwater Wireless Optical Communication System with 0.34 Photons/Bit Receiver Sensitivity //Photonics. – MDPI, 2023. – vol. 10. – №. 4. – P. 451.
11. Hu S. et al. 35.88 attenuation lengths and 3.32 bits/photon underwater optical wireless communication based on photon-counting receiver with 256-PPM //Optics express. – 2018. – vol. 26. – №. 17. – P. 21685-21699.
12. Wang F. et al. High speed underwater visible light communication system based on LED employing maximum ratio combination with multi-PIN reception //Optics Communications. – 2018. – vol. 425. – P. 106-112.
13. Han B. et al. Experimental demonstration of quasi-omni-directional transmitter for underwater wireless optical communication based on blue LED array and freeform lens //Optics communications. – 2019. – vol. 434. – P. 184-190.
14. Zhou Y. et al. Common-anode LED on a Si substrate for beyond 15 Gbit/s underwater visible light communication //Photonics Research. – 2019. – vol. 7. – №. 9. – P. 1019-1029.
15. Wang F. et al. 3.075 Gb/s underwater visible light communication utilizing hardware pre-equalizer with multiple feature points //Optical Engineering. – 2019. – vol. 58. – №. 5. – P. 056117-056117.
16. Li J. et al. Large-coverage underwater visible light communication system based on blue LED employing equal gain combining with integrated PIN array reception //Applied Optics. – 2019. – vol. 58. – №. 2. – P. 383-388.
17. Hu F. et al. 20.09-Gbit/s underwater WDM-VLC transmission based on a single Si/GaAs-substrate multichromatic LED array chip //2020 Optical fiber communications conference and exhibition (OFC). – IEEE, 2020. – P. 1-3.

18. Wang J. et al. Underwater wireless optical communication system using a 16-QAM modulated 450-nm laser diode based on an FPGA //Applied Optics. – 2019. – vol. 58. – №. 16. – P. 4553-4559.
19. Sait M. et al. The impact of vertical salinity gradient on non-line-of-sight underwater optical wireless communication //IEEE Photonics Journal. – 2021. – vol. 13. – №. 6. – P. 1-9.
20. Di Y., Shao Y., Chen L. K. Real-time wave mitigation for water-air OWC systems via beam tracking //IEEE Photonics Technology Letters. – 2021. – T. 34. – №. 1. – P. 47-50.
21. Shao Y. et al. Real-time 2.2-Gb/s water-air OFDM-OWC system with low-complexity transmitter-side DSP //Journal of Lightwave Technology. – 2020. – vol. 38. – №. 20. – P. 5668-5675.
22. Wang P., Li C., Xu Z. A cost-efficient real-time 25 Mb/s system for LED-UOWC: design, channel coding, FPGA implementation, and characterization //Journal of Lightwave Technology. – 2018. – vol. 36. – №. 13. – P. 2627-2637.
23. Doniec M. et al. AquaOptical: A lightweight device for high-rate long-range underwater point-to-point communication //Marine Technology Society Journal. – 2010. – vol. 44. – №. 4. – P. 55-65.
24. Doniec M., Rus D. BiDirectional optical communication with AquaOptical II //2010 IEEE International Conference on Communication Systems. – IEEE, 2010. – P. 390-394.
25. Wei Z., Mu X., Fu H. Wearable full-duplex digital transceiver for underwater optical wireless communications //2018 Conference on lasers and electro-optics Pacific Rim (CLEO-PR). – IEEE, 2018. – P. 1-2.
26. Li J. et al. A real-time, full-duplex system for underwater wireless optical communication: hardware structure and optical link model //IEEE Access. – 2020. – vol. 8. – P. 109372-109387.

27. Li Y. et al. Design and implementation of underwater wireless optical communication system with high-speed and full-duplex using blue/green light //2018 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). – IEEE, 2018. – P. 99-103.
28. Hardy N. D. et al. Demonstration of vehicle-to-vehicle optical pointing, acquisition, and tracking for undersea laser communications //Free-Space Laser Communications XXXI. – SPIE, 2019. – vol. 10910. – P. 205-214.
29. BlueComm® 200 UV – Optical Communications System. – Текст : электронный // Sonardyne: <https://www.sonardyne.com>. – URL: https://www.innova.no/wp-content/uploads/2019/02/Sonardyne_8361_BlueComm_200_UV-1.pdf (дата обращения: 25.01.2025).
30. Li J. et al. A real-time, full-duplex system for underwater wireless optical communication: hardware structure and optical link model //IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – P. 109372-109387.
31. Kong M. et al. AquaE-lite hybrid-solar-cell receiver-modality for energy-autonomous terrestrial and underwater Internet-of-Things //IEEE Photonics Journal. – 2020. – Т. 12. – №. 4. – P. 1-13.
32. Kong M. et al. Toward automatic subsea operations using real-time underwater optical wireless sensor networks //IEEE Photonics Journal. – 2021. – vol. 14. – №. 1. – P. 1-8.
33. Kong M. et al. Real-time optical-wireless video surveillance system for high visual-fidelity underwater monitoring //IEEE Photonics Journal. – 2022. – vol. 14. – №. 2. – P. 1-9.
34. Широков И.Б., Головин В.В., Редькина Е.А., Сердюк И.В., Овчаров П.П. Практические аспекты построения систем беспроводной подводной оптической связи для телекоммуникационных приложений // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2024. – Т. 16. – № 1. – P. 31-42.

35. Широков И.Б., Головин В.В., Редькина Е.А., Сердюк И.В., Овчаров П.П. Структура и элементная база приёмо-передающего модуля для организации подводной оптической беспроводной системы передачи данных. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.7>

Для цитирования:

Широков И.Б., Головин В.В., Редькина Е.А., Сердюк И.В., Овчаров П.П. Оптический модуль бимодального модема для организации подводной беспроводной связи. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.7>