

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.7>

УДК: 654.026

СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА ПРИЁМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПОДВОДНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

**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 14 ноября 2023 г.

Аннотация. В статье представлены результаты теоретического исследования беспроводного оптического канала связи и экспериментального исследования характеристик беспроводного оптического канала с учетом различной комплектации оптической компонентной базы в составе приемного и передающего модулей. Разработанная модель беспроводного подводного оптического канала связи с позиционно-импульсной модуляцией (4 бита на символ) цифрового потока данных со скоростью передачи 100 Мбит/с показала, что для организации канала связи на трассе 10 м требуется применение массива светоизлучающих диодов в количестве до 20 штук, при этом обеспечивается достаточно большой бюджет трассы с учетом дополнительных факторов, снижающих эффективность распространения света в морской воде. Для организации канала связи выбраны светоизлучающие диоды, так как они обладают достаточно широкой диаграммой направленности и позволяют реализовать относительно простую схему драйвера. Требуемая мощность оптического излучения реализуется за счет применения массива светодиодов. Разработаны принципиальные схемы драйвера светодиодов и блока питания для приемного и передающего модулей. Реализована измерительная установка в составе блоков оптического передатчика и приемника. Тестовый

сигнал – регулярная последовательность импульсов со скважностью 2 и частотой 1 МГц. В приемном модуле усиление сигнала с выхода pin-фотодиода реализовано с применением широкополосного операционного усилителя. Подобраны комплекты из трех pin-фотодиодов и 10 светоизлучающих диодов и проведены испытания, в ходе которых определили варианты оптических компонентов, обеспечивающих в беспроводном оптическом воздушном канале связи наилучшие временные характеристики выходного электрического сигнала по времени задержки, переднему и заднему фронту импульсов. Также выполнено измерение на воздушной трассе протяженностью 0,25-3 м при использовании в составе передающего модуля одного и двух светоизлучающих диодов. Экспериментально подтверждено, что для организации канала связи протяженностью до 10 м требуется порядка 15-20 светоизлучающих диодов. Дальнейшие исследования связаны с разработкой и испытанием драйвера для массива светодиодов и прототипа приемо-передающего модуля.

Ключевые слова: беспроводная подводная связь, оптическая связь в видимом диапазоне, драйвер светоизлучающего диода, модель беспроводного подводного оптического канала связи.

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

Введение

Развитие подводных телекоммуникационных технологий реализуется в направлении акустической связи (UAWC) [1], радиосвязи (URWC) [2], связи с помощью магнитной индукции (UWMIC) [3] и оптической беспроводной связи (UOWC) [4]. Последняя предоставляет ряд уникальных преимуществ: высокая скорость передачи цифровых данных, низкое энергопотребление, относительно низкая стоимость и компактность габаритов. Подводная передача оптических волн в полосе 450-500 нм (синий и зеленый) имеет наименьшее затухание для чистой морской воды или прозрачного океана (0,4 дБ/м) по сравнению с другими полосами, в этой полосе ограничен эффект ослабления, вызванный взаимодействием фотонов с молекулами воды и другими частицами.

Полоса 520-570 нм (желто-зеленая) подходит для прибрежных океанских или мутных портовых вод (11 дБ/м). Из-за сложности водной среды внедрение систем UOWC требует надежных подводных устройств. На производительность и срок службы устройств UOWC в значительной степени оказывают влияние течение, температурное давление и соленость морской воды, а энергопотребление передатчика системы с учетом емкости аккумуляторов определяет время автономной работы. Основным недостатком оптической связи является то, что дальность действия ограничена дистанцией около 1-100 метрами. Это ограничение определяется параметрами воды и взвешенными частицами в воде, где свет либо ослабляется, либо рассеивается. Другим недостатком является то, что оптическая связь обычно требует прямой видимости от передатчика к приемнику.

Практическая реализация различных подходов построения приемо-передающего оборудования UOWC с учетом существующих протоколов передачи данных представлена на рынке подводных оптических модемов, разработанных организациями KAUST [5,6], Нанкинский университет почты и телекоммуникаций [7], Sonardyne [8] и др.

В области проектирования UOWC остается много перспективных возможностей повышения производительности и дальности связи в связи с развитием доступной компонентной базы (светоизлучающих диодов (LED), фотодиодов (PD), схем реализации драйверов LED), компонентов аналогового и цифрового трактов, позволяющих реализовать высокую чувствительность, помехозащищенное кодирование и т.п.

В данной статье представлена модель в САПР оптического беспроводного канала связи, представлены результаты исследований различных LED и PD. Представлена схема драйвера LED на основе элементов с TTL логикой. Представлен прототип приемо-передающего модуля UOWC и результаты его испытаний.

1. Модель подводного беспроводного оптического канала связи в САПР OptiSystem

Среда распространения оптического сигнала – морская вода. Поглощение водой светового монохроматического потока, образующего пучок параллельных лучей, определяется по показательному закону:

$$F_k = F_0 \cdot 10^{-kx},$$

где F_k – световой поток, пропущенный слоем воды; F_0 – входящий поток монохроматического спектра; x – толщина слоя воды, через который проходит поток света, м; k – показатель поглощения слоя воды, 1/м.

График кривой поглощения для оптически чистой воды показан на рис. 1.

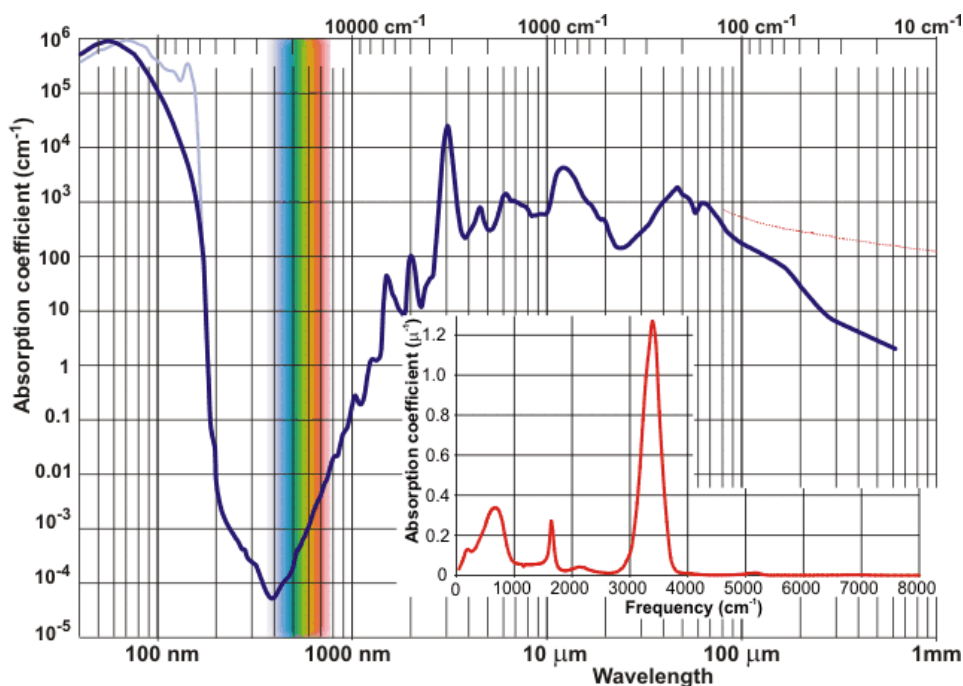


Рис. 1. График кривой поглощения для оптически чистой воды.

Требования, предъявляемые к светоизлучающему диоду (LED) и системе передачи данных:

- рабочая длина волны: 470 нм;
- номинальная мощность излучения LED: не менее 3-6 дБм;
- скорость передачи информационного потока данных: не менее 100 Мбит/с;
- протяженность трассы: не менее 5-10 м.

Модель беспроводного подводного оптического канала на трассе протяженностью 5 м показана на рис. 2.

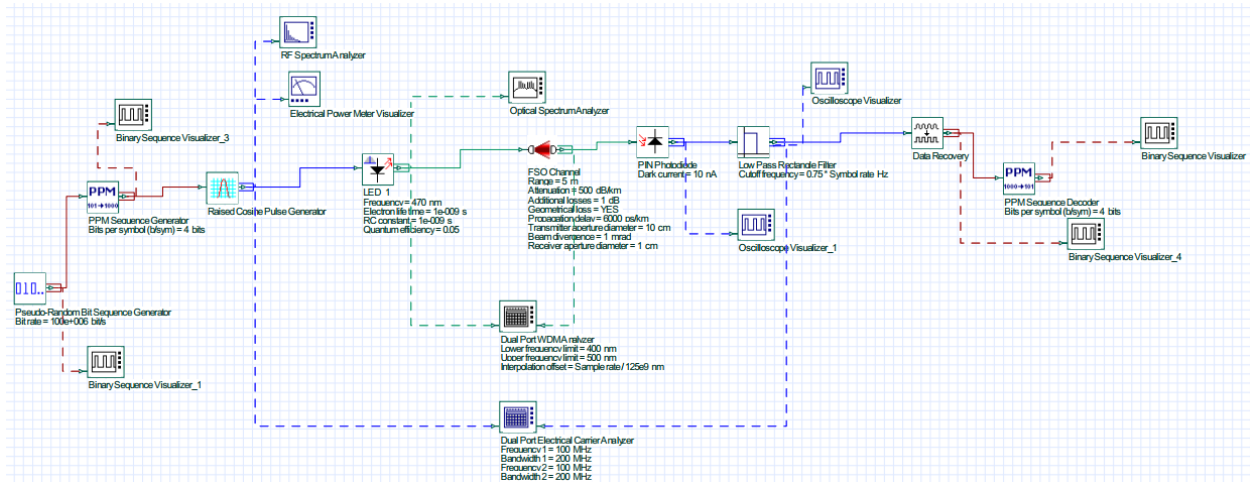


Рис. 2. Модель беспроводного подводного оптического канала в САПР Optisystem.

В состав модели входят следующие блоки:

- Pseudo-Random Bit Sequence Generator – генератор псевдослучайной последовательности бит;
- PPM Sequence Generator – генератор последовательности бит с модуляцией PPM (позиционно-импульсная модуляция);
- Raised Cosine Pulse Generator – генератор электрических импульсов;
- LED – светоизлучающий диод;
- PIN Photodiode – pin-фотодиод;
- Low Pass Rectangle Filter – фильтр нижних частот;
- Data Recovery – компаратор;
- PPM Sequence Decoder – декодер последовательности импульсов с популяцией PPM.

Используются измерительные модули:

- Binary Sequence Visualizer – осциллограф временных последовательностей электрических импульсов;
- RF Spectrum Analyzer – СВЧ анализатор спектра;
- Optical Spectrum Analyzer – оптический анализатор спектра;

- Oscilloscope Visualizer – осциллограф временных последовательностей оптических импульсов;
- Dual Port WDM Analyzer – оптический анализатор цепей;
- Dual Port Electrical Carrier Analyzer – электрический анализатор цепей.

Параметры настройки морского беспроводного канала связи показаны на рис. 3.

Disp	Name	Value	Units	Mode
Link settings				
<input checked="" type="checkbox"/>	Range	5 m		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	500 dB/km		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Additional losses	1 dB		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Geometrical loss	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Propagation delay	6000 ps/km		Normal
Transmitter settings				
<input checked="" type="checkbox"/>	Transmitter aperture diameter	10 cm		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Beam divergence	1 mrad		Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter loss	0 dB		Normal
Receiver settings				
<input checked="" type="checkbox"/>	Receiver aperture diameter	1 cm		Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver loss	0 dB		Normal

Рис. 3. Параметры настройки морского беспроводного канала связи.

В таблице 1 показаны параметры оптического анализатора цепей в оптической части модели. В таблице 2 показаны параметры модели между выходом генератора электрических импульсов в передающем тракте и выходом фильтра в приемном тракте.

Таблица 1. Параметры оптического анализатора цепей в оптической части модели с 1 LED на трассе протяженностью 5 м.

Длина волны, нм	Коэффициент передачи, дБ	Входное ОСШ, дБ	Мощность выходного сигнала, дБм	Выходное ОСШ, дБ
470	-26,8	37,9	-31,2	29,9

Таблица 2. Параметры модели между выходом генератора электрических импульсов в передающем тракте с 1 LED и выходом фильтра в приемном тракте на трассе протяженностью 5 м

Диапазон частот, МГц	Коэффициент передачи, дБ	Входное ОСШ, дБ	Мощность выходного сигнала, дБм	Выходное ОСШ, дБ
200	-101	115	-85	14

Данные результаты свидетельствуют о том, что с применением одиночного LED реализация беспроводного подводного оптического канала при неблагоприятных условиях распространения света на трассе протяженностью 5 м представляется крайне затруднительной. Поэтому необходимо рассматривать применение матрицы светодиодов. На рис. 4 показана модель беспроводного подводного оптического канала, организованная с применением 20 LED на трассе протяженностью 10 м. В представленной модели используются подсистемы (Subsystems), в которых для 10 LED с помощью входного электрического ответвителя и выходного оптического ответвителя реализуется прямая модуляция интенсивности и сложение мощностей излучения.

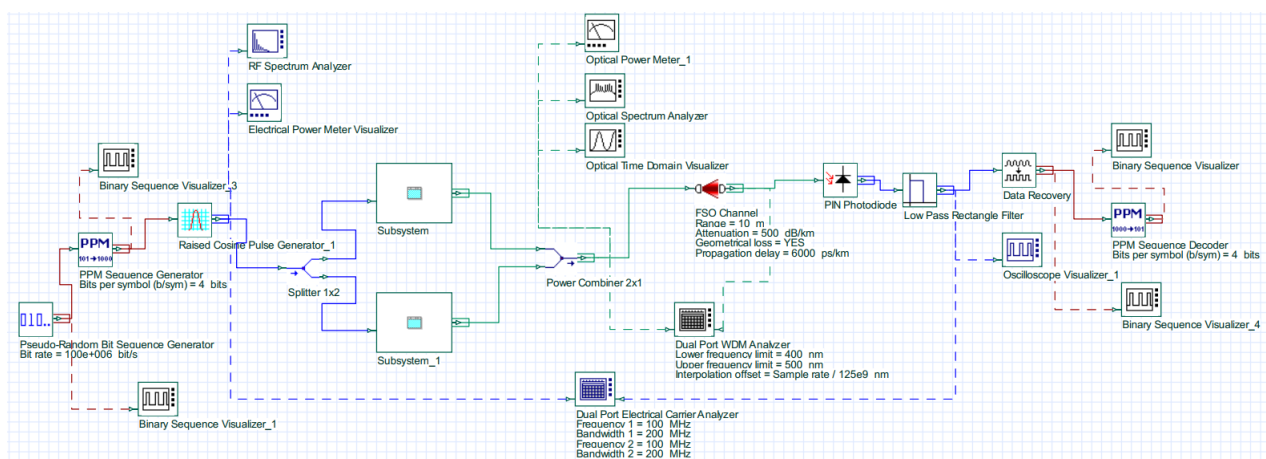


Рис. 4. Модель беспроводного подводного оптического канала, организованная с применением 20 LED на трассе протяженностью 10 м.

В таблице 3 показаны параметры оптического анализатора цепей в оптической части модели. В табл. 4 показаны параметры модели между выходом генератора электрических импульсов в передающем тракте и выходом фильтра в приемном тракте.

Таблица 3. Параметры оптического анализатора цепей в оптической части модели с 20 LED на трассе протяженностью 10 м.

Длина волны, нм	Коэффициент передачи, дБ	Входное ОСШ, дБ	Мощность выходного сигнала, дБм	Выходное ОСШ, дБ
470	-26,82	22,8	-19,4	21

Таблица 4. Параметры модели между выходом генератора электрических импульсов в передающем тракте с 20 LED и выходом фильтра в приемном тракте на трассе протяженностью 10 м.

Диапазон частот, МГц	Коэффициент передачи, дБ	Входное ОСШ, дБ	Мощность выходного сигнала, дБм	Выходное ОСШ, дБ
200	-82,9	112	-67,5	32,5

Полученные результаты показали, что массива из 20 LED может быть достаточно для организации широкополосного канала передачи данных по беспроводному подводному оптическому каналу на трассе протяженностью 10 м.

2. Измерительная установка для испытания LED и PD приёмо-передающего модуля подводной оптической системы передачи данных

Обобщенная функциональная схема установки для исследования характеристик светоизлучающих диодов и фотодиодов показана на рис. 5.

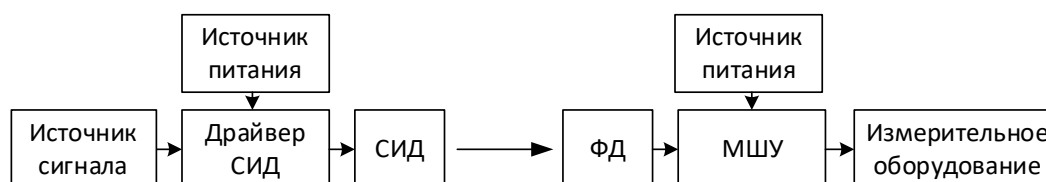


Рис. 5. Обобщенная функциональная схема установки для исследования характеристик прототипа системы оптической передачи данных.

Введенные обозначения: АКБ – аккумуляторная батарея;

СИД – светоизлучающий диод; ФД – фотодиод;

МШУ – малошумящий усилитель.

Вариант электрической принципиальной схемы драйвера светоизлучающего диода разработана на основе элементов с логикой TTL показана на рис. 6а. На рис. 6б показана схема электрическая принципиальная блока питания, позволяющего получить напряжения +12 В, ± 5В, ± 2,5 В для передающего и приемного модулей.

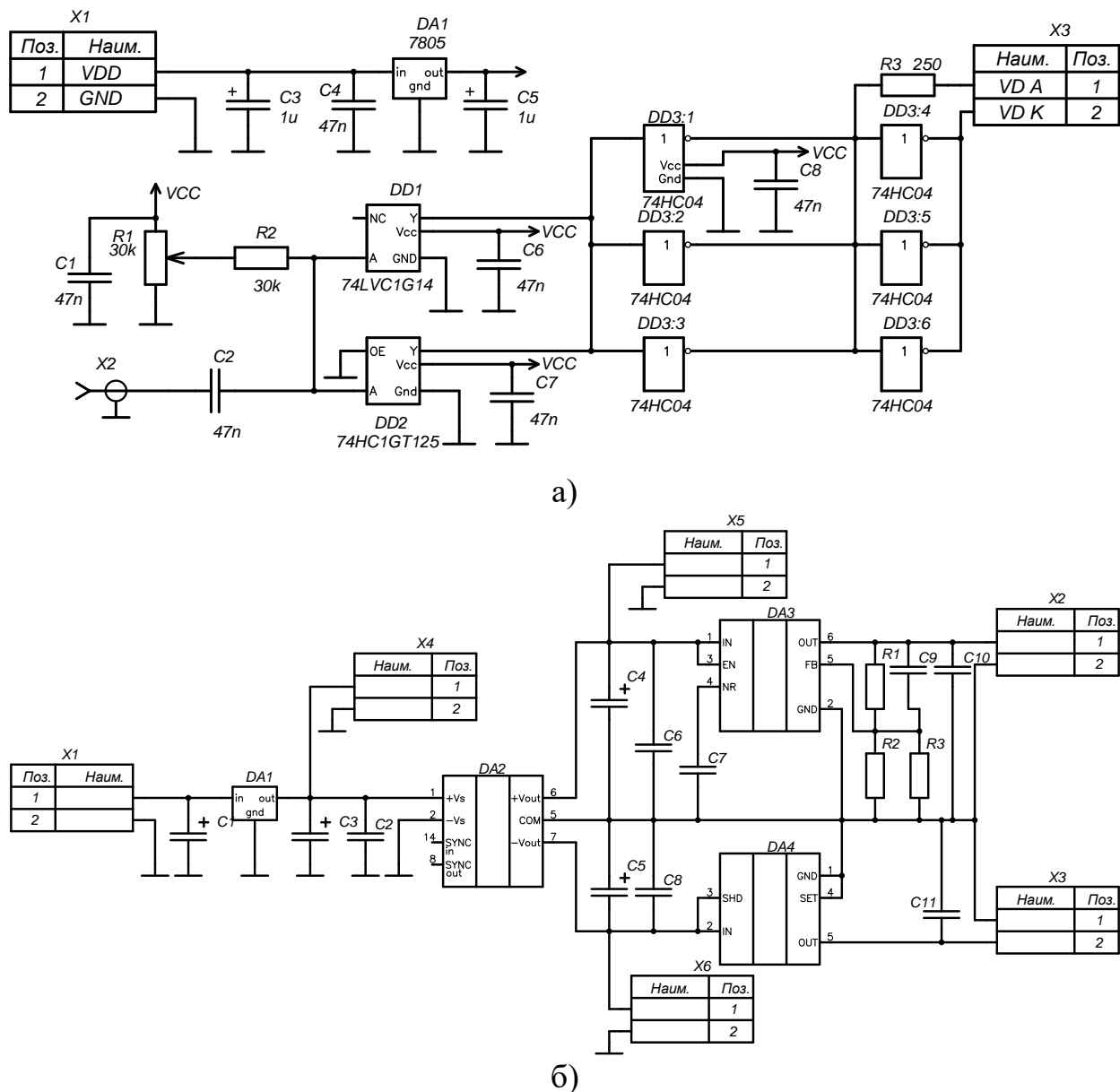


Рис. 6. Электрические принципиальные схемы драйвера LED (а) и блока питания (б).

В состав приёмного модуля (рис. 7) входит плата с фотодиодом, постоянное запирающее напряжение на который подается с помощью батарейки CR2032. Для усиления электрического сигнала с выхода фотодиода применяются две модификации широкополосного операционного усилителя: с полосой пропускания 1,1 и 8 ГГц.

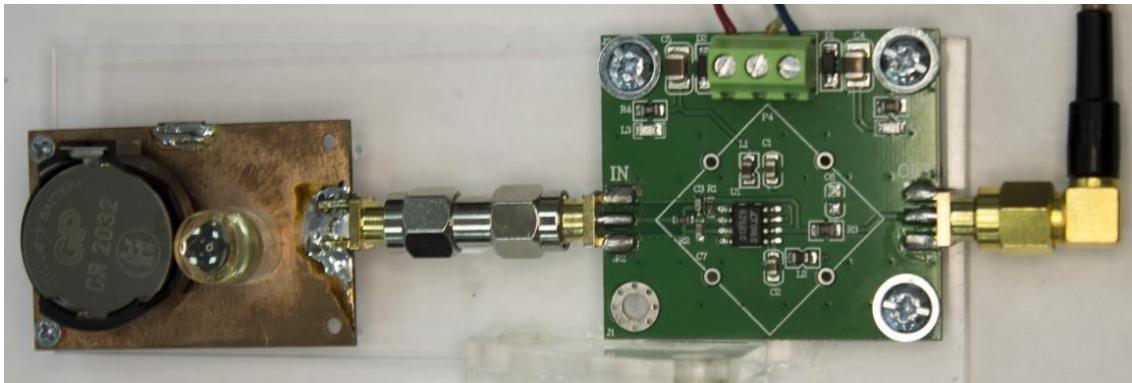


Рис. 7. Приёмный модуль с pin-фотодиодом ФД-263-01 и операционным усилителем с полосой пропускания 1,1 ГГц.

В собранном виде измерительная установка показана на рис. 8.

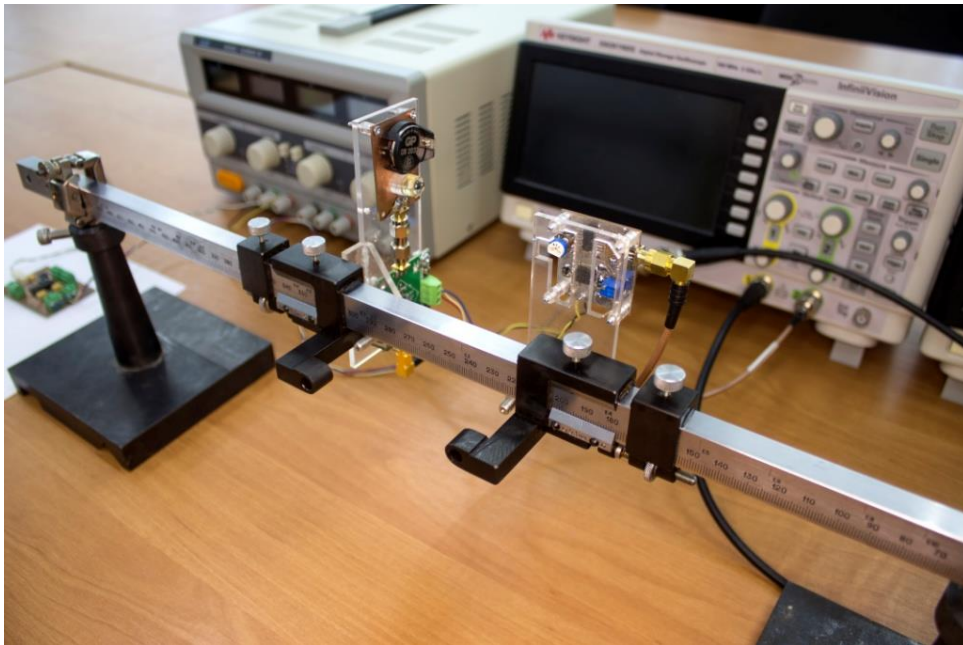


Рис. 8. Испытательная установка. Общий вид.

3. Исследование характеристик фотодиодов

Для испытания фотодиодов использовались два LED:

- LED1 – белый свет;
- LED2 – красный свет.

Перечень исследуемых фотодиодов (NPhD):

- 1) pin-фотодиод BPX 65;
- 2) pin-фотодиод BPW24R;
- 3) pin-фотодиод ФД-263-01.

По беспроводному оптическому каналу передавалась последовательность импульсов с частотой 1 МГц и скважностью 2. По осциллограммам импульсов на выходе приемного модуля анализировались параметры:

- временная задержка выходных импульсов относительно входной последовательности (рис. 9а);
- передний фронт выходных импульсов (рис. 9б);
- время спада выходных импульсов (рис. 9в).

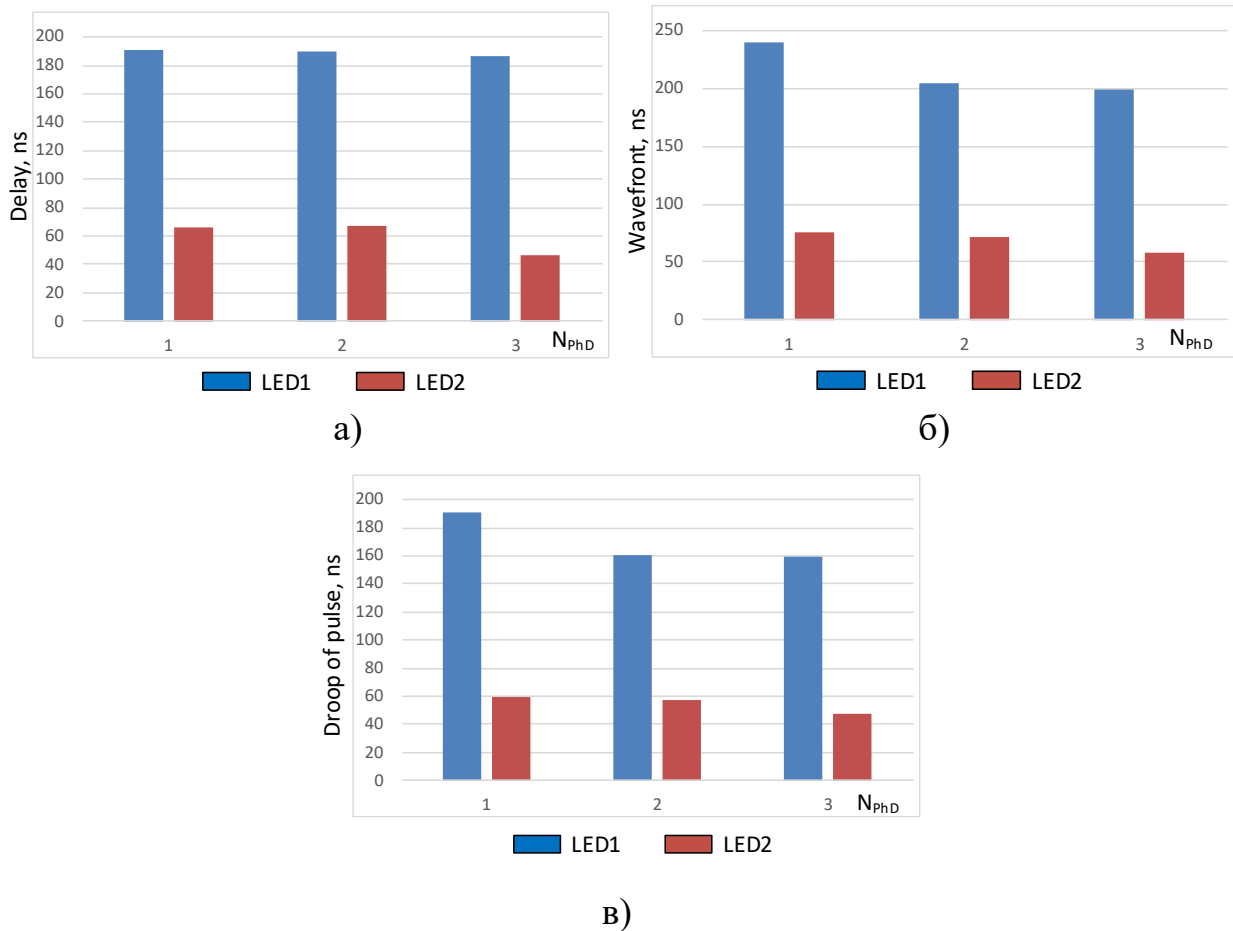


Рис. 9. Временная задержка импульсов (а), передний фронт выходного импульса (б), время спада выходного импульса (в).

Согласно результатам измерений, наилучшие характеристики получены для pin-фотодиода ФД-263-01 ($N_{phD} = 3$).

4. Исследование характеристик светоизлучающих диодов

Перечень исследованных различных серийно выпускаемых LED:

- 1) КИПД40П20-С-П1;
- 2) BL-L524UBC;
- 3) BL-L522UBC;
- 4) BL-L502UBC;
- 5) FYL-5013UBC;
- 6) NL-5013UBC;
- 7) GNL-5053UBC;
- 8) GNL-5053UBC-TL;

и два LED с повышенной мощностью излучения:

- 9) GN2-5013BGC;
- 10) BL-L563UBC.

В приемном модуле использовался pin-фотодиод ФД-263-01.

Были выполнены следующие измерения для различных LED:

- временная задержка выходного электрического импульса относительно входного сигнала;
- время нарастания и время спада выходного электрического импульса;
- частотную характеристику преобразования;
- протяженность воздушной трассы.

По беспроводному воздушному оптическому каналу в измерительной установке (рис. 8) передавалась последовательность импульсов с частотой 1 МГц и скважностью 2.

На рис. 10 показаны значения времени задержки электрического импульса на выходе измерительной установки для заданного ряда испытываемых светоизлучающих диодов.

На рис. 11 представлены результаты измерений переднего фронта электрического импульса на выходе измерительной установки для заданного ряда испытываемых светоизлучающих диодов.

На рис. 12 представлены результаты измерений времени спада электрического импульса на выходе измерительной установки для заданного ряда испытываемых светоизлучающих диодов.

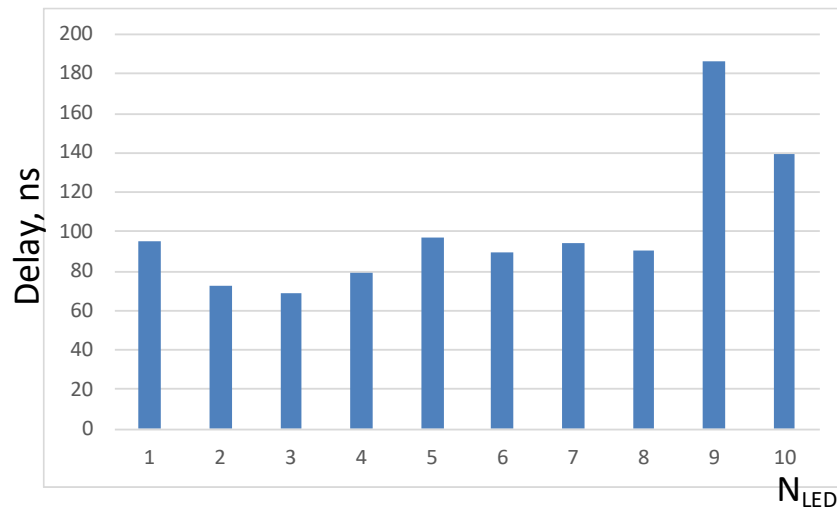


Рис. 10. Измеренные значения времени задержки электрического импульса на выходе измерительной установки.

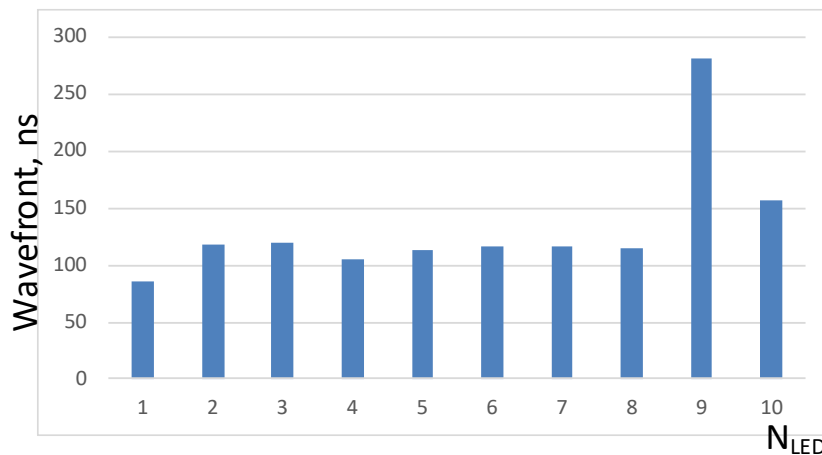


Рис. 11. Результаты измерений переднего фронта электрического импульса на выходе измерительной установки.

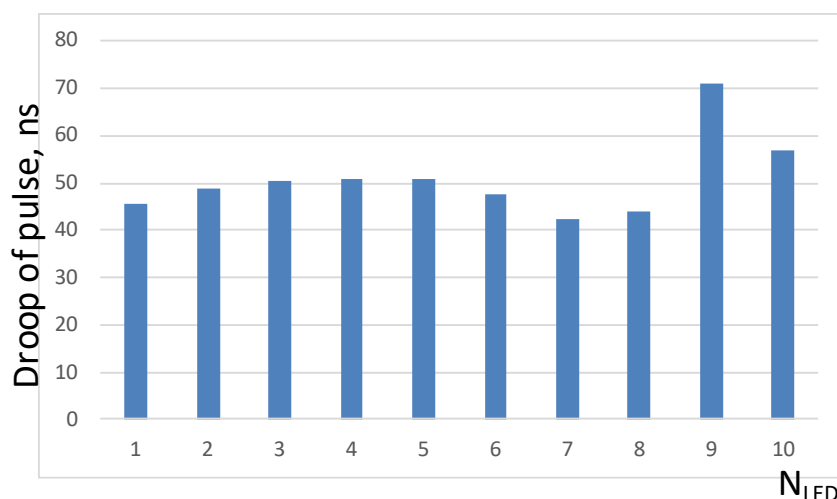


Рис. 12. Результаты измерений времени спада электрического импульса на выходе измерительной установки.

Анализ результатов измерений показал, что из доступных компонентов наиболее подходящим является тип светодиода BL-L502UBC.

На рис. 13 представлены результаты измерения по беспроводному воздушному каналу связи зависимости амплитуды сигналов на выходе фотоприемника от расстояния между модулями измерительной установки (рис. 8) для различного количества светодиодов BL-L502UBC.

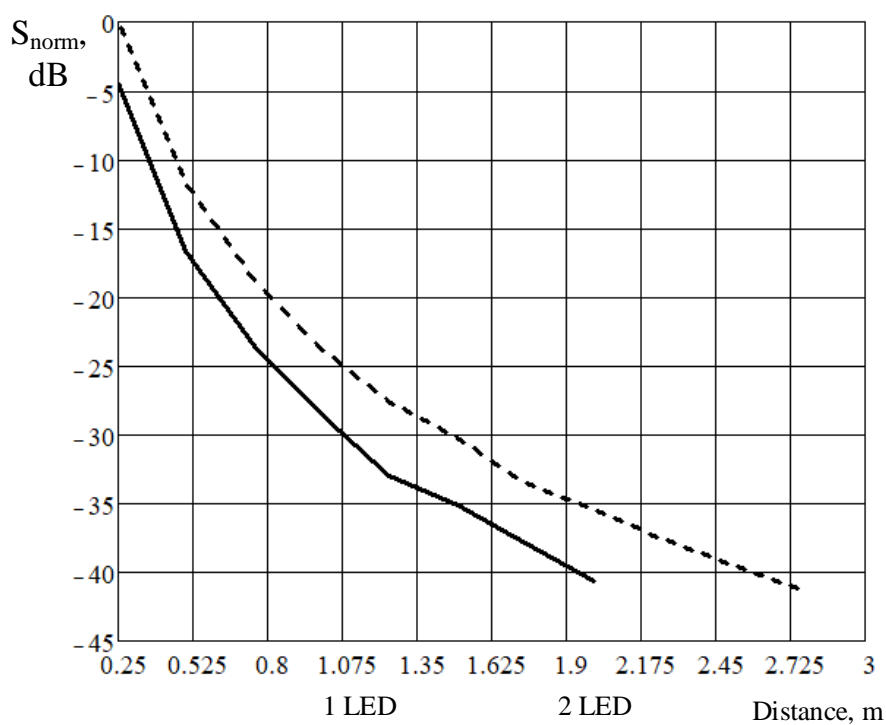


Рис. 13. Зависимости амплитуды сигналов на выходе фотоприемника от расстояния между модулями для различного количества светодиодов BL-L502UBC.

Видно, что применение двух светодиодов позволяет увеличить дальность связи на 0,5-0,6 м. Таким образом, для организации беспроводного оптического канала связи протяженностью 10 м потребуется порядка 20 LED BL-L502UBC.

Заключение

В САПР представлена модель беспроводного подводного оптического канала связи с позиционно-импульсной модуляцией на трассе протяженностью 5-10 м. Показано, что качественные характеристики сигнала на выходе фотоприемника можно получить при использовании матрицы из 15-20 LED.

Разработана измерительная установка для испытания светодиодов и фотодиодов. Проведены сравнительные исследования характеристик выходного импульсного сигнала для различных комбинаций LED-PD из трех типов фотодиодов и десяти типов светоизлучающих диодов. Показано, что лучшими характеристики выходного импульсного сигнала получены для светодиода BL-L502UBC и pin-фотодиода ФД-263-01.

Экспериментально показано, что для организации беспроводного оптического канала связи протяженностью до 10 м потребуется матрица светодиодов BL-L502UBC в количестве 15-20 LED.

Литература

1. Song H.C., Hodgkiss W.S. Efficient use of bandwidth for underwater acoustic communication //The journal of the acoustical society of America. – 2013. – Т. 134. – №. 2. – С. 905-908. <https://doi.org/10.1121/1.4812762>.
2. Gussen C.M. G. et al. A survey of underwater wireless communication technologies //J. Commun. Inf. Sys. – 2016. – Т. 31. – №. 1. – С. 242-255. <https://doi.org/10.14209/jcis.2016.22>.

3. Li Y. et al. A survey of underwater magnetic induction communications: Fundamental issues, recent advances, and challenges //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Т. 21. – №. 3. – С. 2466-2487. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2897610>.
4. IEEE Standard Association et al. IEEE standard for local and metropolitan area networks-Part 15.7: short-range wireless optical communication using visible light //IEEE: Piscataway, NJ, USA. – 2011. – С. 1-309.
5. Kong M. et al. Real-time optical-wireless video surveillance system for high visual-fidelity underwater monitoring //IEEE Photonics Journal. – 2022. – Т. 14. – №. 2. – С. 1-9. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3147844>.
6. Kong M. et al. Toward automatic subsea operations using real-time underwater optical wireless sensor networks //IEEE Photonics Journal. – 2021. – Т. 14. – №. 1. – С. 1-8. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3136922>
7. 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. – С. 109372-109387. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001213>.
8. Leon P. et al. A new underwater optical modem based on highly sensitive Silicon Photomultipliers //OCEANS 2017-Aberdeen. – IEEE, 2017. – С. 1-6. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2017.8084586>.

Для цитирования:

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>