

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.297

Радиопокрытие прибрежной морской зоны с применением беспроводного широкополосного оптического канала для организации интенсивного судоходства

Афонин И.Л., Головин В.В., Ткаченко М.О., Тыщук Ю.Н., Поляков А.Л., Слезкин Г.В.

Севастопольский государственный университет, <http://www.sevsu.ru/>

Севастополь 299053, Российская Федерация

E-mail: ilafonin@mail.sevsu.ru, vvgolovin@mail.sevsu.ru, motkachenko@mail.sevsu.ru, yntyshchuk@mail.sevsu.ru, alpolyakov@mail.sevsu.ru, gvslezkin@mail.sevsu.ru

Поступила 17.10.2023, рецензирована 24.10.2023, принята 31.10.2023, опубликована 25.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН Е.С. Солдатовым.

Аннотация: В статье представлена модель беспроводного широкополосного оптического канала, предназначенного для связи между береговой подсистемой и воздушным ретранслятором, обеспечивающим покрытие прибрежной морской акватории для организации интенсивного судоходства, в том числе с применением безэкипажных судов. Показано, что прямая передача данных берег-судно с применением технологий Wi-Fi и 4G/LTE имеет ряд недостатков для бухт со сложным береговым рельефом. Применение беспроводного оптического канала в формате "точка-точка" между береговой подсистемой и воздушным ретранслятором позволяет обеспечить качественное радиопокрытие морской поверхности и предоставлять информационно емкие каналы судовым системам. Представлены результаты моделирования беспроводного оптического канала, реализованного с применением технологии FSO (Free Space Optic). Для повышения эффективности использования спектра передаваемого потока данных и помехозащищенности беспроводного канала применены 16QAM и OFDM.

Ключевые слова: e-Навигация, беспроводная связь, оптическая связь, технология Free Space Optic

УДК 621.391.64

Для цитирования: Афонин И.Л., Головин В.В., Ткаченко М.О., Тыщук Ю.Н., Поляков А.Л., Слезкин Г.В. Радиопокрытие прибрежной морской зоны с применением беспроводного широкополосного оптического канала для организации интенсивного судоходства. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):297-306. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.297.

Radio coverage of coastal marine zone using wireless broadband optical channel to support intensive navigation

Igor L. Afonin, Vladislav V. Golovin, Mikhail O. Tkachenko, Yury N. Tyschuk, Alexander L. Polyakov, Gennady V. Slyozkin

Sevastopol State University, <http://www.sevsu.ru/>

Sevastopol 299053, Russian Federation

E-mail: ilafonin@mail.sevsu.ru, vvgolovin@mail.sevsu.ru, motkachenko@mail.sevsu.ru, yntyshchuk@mail.sevsu.ru, alpolyakov@mail.sevsu.ru, gvslezkin@mail.sevsu.ru

Received October 17, 2023, peer-reviewed October 24, 2023, accepted October 31, 2023, published April 25, 2024

Abstract. The model of a wireless broadband optical channel designed for communication between the coastal subsystem and an air repeater that provides coverage of the coastal sea area for the organization of intensive navigation, including the use of unmanned vessels is presented. It is shown that direct coast-to-ship data transmission using Wi-Fi and 4G/LTE technologies has a number of disadvantages for bays with complex coastal terrain. The use of a wireless optical channel in the "point-to-point" format between the coastal subsystem and the air transmitter makes it possible to provide high-quality radio coverage of the sea surface and provide information-intensive channels to ship systems. The results of modeling the wireless optical channel implemented using FSO (Free Space Optic) technology are presented. To increase the efficiency of using the spectrum of the transmitted data stream and the protection ratio of the wireless channel, 16QAM and OFDM are used.

Keywords: e-Navigation, wireless communication, optical communication, Free Space Optic technology

UDC 621.391.64

For citation: Igor L. Afonin, Vladislav V. Golovin, Mikhail O. Tkachenko, Yury N. Tyschuk, Alexander L. Polyakov, Gennady V. Slyozkin. Radio coverage of the coastal marine zone with the use of a wireless broadband optical channel for the organization of intensive navigation. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):297-306e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.297.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (298)
2. АНАЛИЗ ЗОНЫ ПРЯМОГО РАДИОЧАСТОТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ЛИНИИ БЕРЕГ-СУДНО (299)
3. ОРГАНИЗАЦИЯ БЕСПРОВОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ НА ЛИНИИ БЕРЕГ-РЕТРАНСЛЯТОР (300)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (305)

ЛИТЕРАТУРА (305)

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из ключевых направлений развития транспортного судоходства рассматриваются информационные технологии в формах e-Навигации и безэкипажного судоходства, ставших ключевыми инициативами Международной морской организации (ИМО). Согласно принятому ИМО определению, e-Навигация – это гармонизированные сбор, интеграция, обмен, представление и анализ морской информации на борту судна и в береговых системах посредством электронных средств для совершенствования процесса перехода (судна) от причала до причала (в портах отхода и назначения) и соответствующих сервисов, обеспечивающих

безопасность мореплавания и защиту окружающей среды [1].

Можно выделить следующие технические блоки инфраструктуры e-Навигации [2]:

- технологии коммуникаций и обмена данными, среди которых можно выделить наземные (3G/4G, WiMax, AIS) и спутниковые (Iridium, VSAT);
- передача данных с борта судна на берег;
- передача с борта судна на берег и обратно информации о маршрутах следования судна;
- передача информации о навигационной обстановке со станции берегового слежения на борт судна;
- гидрографическая, гидрологическая и метеорологическая информация или передача с берега на борт судна;
- и др.

Также для организации широкополосного доступа радиосвязи при управлении движением судов перспективной является технология Wi-Fi [3]. В [4] дан анализ ее использования на частоте 2.4 ГГц с протоколом UDP для автономной узловой сети морской связи. В [5] предлагается в системе морской беспроводной

связи для мониторинга судов использовать технологию Wi-Fi дальнего действия.

В данной статье рассматривается вопрос организации эффективного покрытия для организации широкополосного радиодоступа в прибрежной зоне с высокой плотностью движения судов с применением систем Wi-Fi и 4G/LTE.

2. АНАЛИЗ ЗОНЫ ПРЯМОГО РАДИОЧАСТОТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ЛИНИИ БЕРЕГ-СУДНО

Проанализируем случай, когда требуется организовать широкополосный радиодоступ в пределах протяженной бухты с изломанным береговым рельефом.

При выборе физических параметров окружающей среды использовалась Рекомендация МСЭ-R P.527-4 «Электрические характеристики земной поверхности» [6]. Физические параметры окружающей среды учитывались для морской воды, почвы и возможных осадков (дождь, снег, туман и т.д.). В соответствии с Рекомендациями МСЭ-R P.527-4 [6], эффективные значения электрических характеристик почвы определяются типом почвы, её влажностью, температурой, общей геологической структурой и частотой падающего электромагнитного излучения. Учёт физических параметров морской воды и почвы в процессе расчёта сводится к определению их проводимости

и диэлектрической проницаемости, а также их зависимости от температуры. Параметры морской воды выбирались в соответствии с графиками, показанными на **Рис. 1** для температур $+20^{\circ}\text{C}$.

Учёт погодных условий проводился в соответствии с рекомендациями, данными в [6], согласно которых коэффициентов поглощения радиоволн в диапазоне 2.4-2.5 ГГц в дожде и тумане различной интенсивности не превышают 0.1 дБ/км, в кислороде и парах воды не превышают 0.05 дБ/км.

Для проведения моделирования рассматривалась показанная на **Рис. 2** Севастопольская бухта со сложным береговым рельефом, где указано место размещения береговой радиосистемы.

Исходные данные для моделирования:

- высота берега над уровнем моря: 33 м;
- диапазон частот: 2.4-2.45 ГГц;
- мощность передатчиков: 23 дБм;
- чувствительность приемников: -65 дБм;
- диаграммы направленности (ДН) антенн береговой и судовой радиосистем: круговая в Н-плоскости, поляризация линейная вертикальная;
- коэффициент усиления антенн: береговой радиосистемы 15 дБи, судовой радиосистемы 5 дБи.

На **Рис. 3** показаны результаты моделирования зоны покрытия Wi-Fi при возвышении береговой антенны на 1 м над подстилающей поверхностью и при возвышении судовой антенны на 2 м (**Рис. 3а**)

Зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости чистой и морской воды от частоты ($T = 20^{\circ}\text{C}$)

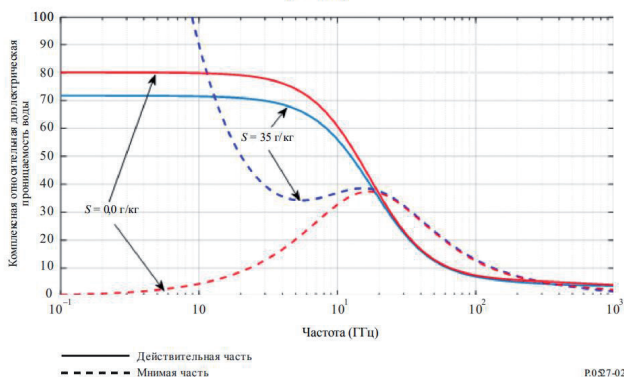


Рис. 1. Зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости чистой и морской воды от частоты при температуре $T = +20^{\circ}\text{C}$.

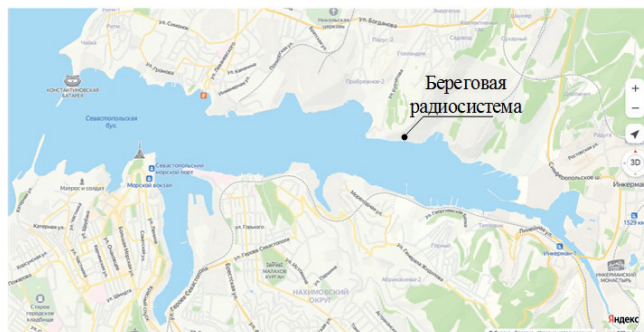
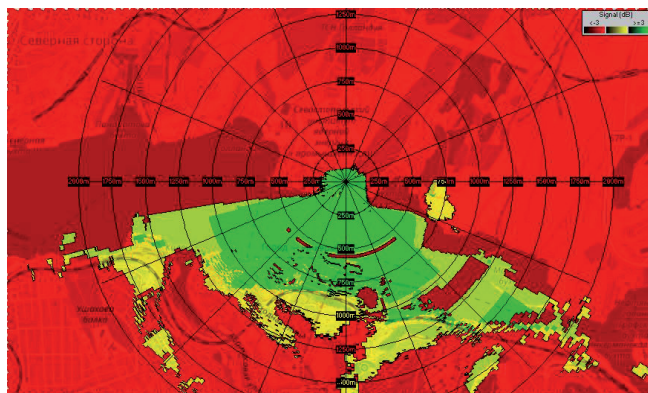
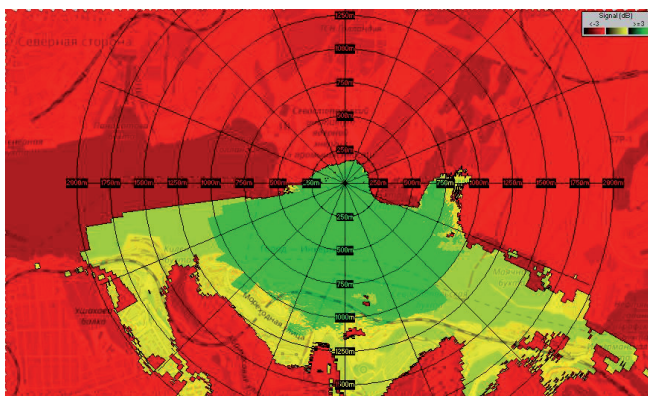


Рис. 2. Севастопольская бухта с указанием места размещения береговой радиосистемы.



а



б

Рис. 3. Результаты моделирования зоны покрытия Wi-Fi при возвышении судовой антенны на 2 м (а) и 10 м (б) над уровнем моря.

и 10 м (Рис. 3б) над уровнем моря. Зеленым цветом обозначена зона уверенного приема, желтым – неуверенного приема, красным – отсутствие радиосвязи.

В обоих рассмотренных случаях наблюдаются участки морской поверхности с нарушением радиосвязи. При этом увеличение высоты возвышения береговой антенны над подстилающей поверхностью приводит к увеличению количества и протяженности этих участков с подавлением радиосвязи.

Для сравнения также выполнено моделирование зоны покрытия при использовании для организации связи системы 4G/LTE со следующими характеристиками, отличающимися от предыдущего случая:

- диапазон частот: 1.92 – 2.17 ГГц, Band 1, используется в России;
- ширина радиоканала: 5 – 20 МГц.

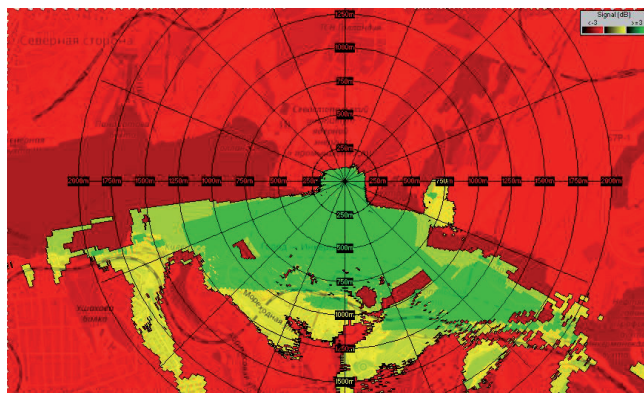


Рис. 4. Результаты моделирования зоны покрытия 4G/LTE при возвышении судовой антенны на 2 м.

На Рис. 4 показаны результаты моделирования зоны покрытия 4G/LTE при возвышении береговой антенны на 1 м над подстилающей поверхностью и при возвышении судовой антенны на 2 м.

3. ОРГАНИЗАЦИЯ БЕСПРОВОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ НА ЛИНИИ БЕРЕГ-РЕТРАНСЛЯТОР

Для радикального и высокоэффективного решения проблемы с замираниями на трассе при сохранении возможности предоставления информационно емких канал связи для большого количества подвижных морских объектом рассмотрен вариант применения базового ретранслятора, поднимаемого в воздух над морем с применением беспилотного летательного аппарата или дирижабля. При этом над морем может быть организована сеть ретрансляторов для решения различных телекоммуникационных задач. Наиболее емким каналом связи будет канал на линии базовый ретранслятор – берег. Повышение информационной емкости этого канал возможно за счет применения беспроводной оптической системы связи.

Наземные беспроводные оптические системы связи в режиме «точка-точка» (FSO, Free Space Optic) [7] работают на инфракрасных, ультрафиолетовых и ультрафиолетовых частотах оптического спектра. Системы FSO используют лазерную технологию для передачи сигнала. На Рис. 5 представлена предлагаемая к рассмотрению схема

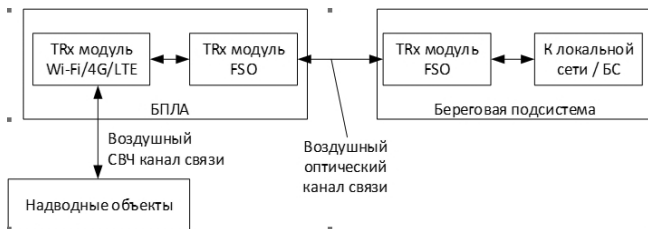


Рис. 5. Схема организации удаленного широкополосного канала связи с применением FSO на линии «Берег-БПЛА».

организации удаленного широкополосного канала связи с применением FSO на линии «Берег-БПЛА».

На Рис. 6 показана базовая структурная схема системы FSO. Благодаря оптическому формированию луча возможна связь на большие расстояния с использованием систем FSO. Первоначально исходная информация кодируется. Оптический источник, используемый в системах FSO, должен обеспечивать сравнительно высокую оптическую мощность в широком диапазоне рабочих температур. Важными характеристиками оптического передатчика в системах FSO являются размер, мощность и качество луча, которые определяют интенсивность лазера и минимальное расхождение, получаемое от системы [8]. Лицевая часть приемника содержит оптические фильтры с линзой для сбора и фокусировки принятого луча на фотодиоде. Затем выходной ток фотодиода преобразуется в напряжение. Фильтр нижних частот используется для ограничения уровней теплового и фонового шума. Наконец, демодулятор выполняет необходимый процесс демодуляции для получения исходных отправленных данных.

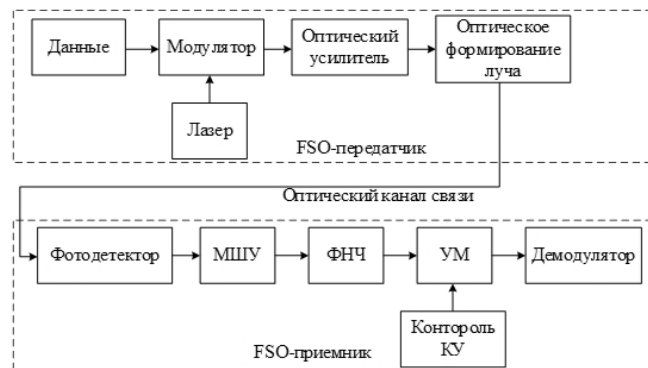


Рис. 6. Базовая структурная схема системы FSO.

Одним из главных ограничений применения беспроводного оптического канала связи в структуре высокоскоростных цифровых телекоммуникационных радиосистем является потенциально большое время простоя этих систем в неблагоприятную погоду, ограничивающую видимость. Вопросу сравнения атмосферного ослабления оптического сигнала с различной длиной волны посвящена работа [9] и др. Обширный поиск в литературе и некоторые расчеты полного рассеяния света на шаровых частицах показывают, что 1550 нм, 850 нм и 785 нм фактически одинаково ослабляются в тумане.

В [10] исследуется влияние канала связи на погонные ослабления оптического сигнала на различных оптических длинах волн. Для расчета погонного ослабления на трассе получено выражение

$$\sigma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q}$$

где σ – коэффициент атмосферного ослабления (или рассеяния); V – видимость (в км); q – распределение рассеивающих частиц по размерам: $q = 1.6$ – для большой видимости ($V > 50$ км); $q = 1.3$ – для средней видимости ($6 > V > 50$ км); $q = 0.6V + 0.34$ – для видимости в дымке ($1 > V > 6$ км); $q = V - 0.5$ – для видимости в тумане ($0.5 > V > 1$ км); $q = 0$ – для видимости в тумане ($0.5 > V$ км).

В Таблице 1 представлены зависимости коэффициента атмосферного ослабления от дальности видимости и состояния атмосферы.

Таблица 1

Зависимости коэффициента атмосферного ослабления от дальности видимости и состояния атмосферы

Дальность видимости, км	σ , дБ/км при $\lambda = 785$ нм	σ , дБ/км при $\lambda = 785$ нм	Погода
0.05	340	340	Туман
0.2	85	85	
0.5	34	34	
1	14	10	Дымка
2	7	4	
4	3	2	
10	1	0.4	Ясная погода
23	0.5	0.2	

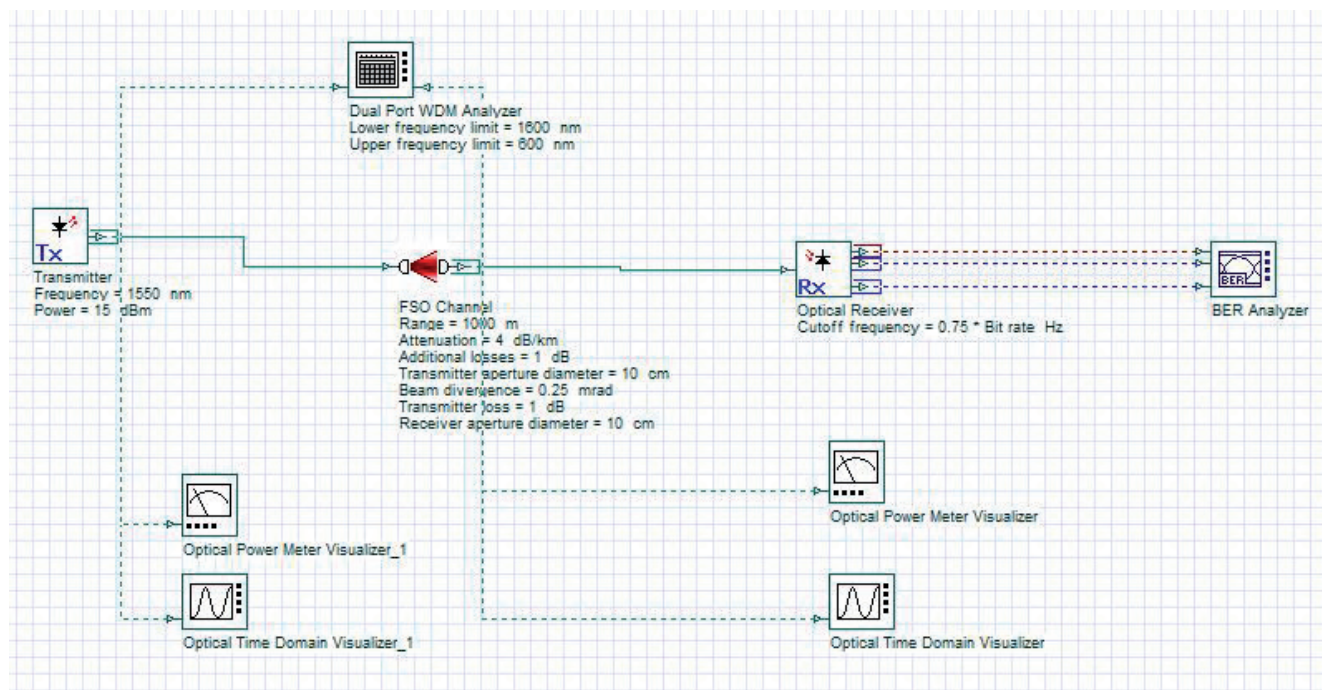


Рис. 7. Модель беспроводного канала FSO системы в САИР.

Модель упрощенного варианта организации беспроводного оптического канала связи FSO системы показана на Рис. 7, где оптическая несущая моделируется линейной цифровой последовательностью с NRZ-кодированием.

Анализ допустимой протяженности канала связи проводился при параметрах:

- длина волны оптического излучения 1550 нм;
- скорость передачи данных 1 – 10 Гбит/с;

$$- \sigma_1 = 4 \text{ дБ/км и } \sigma_2 = 85 \text{ дБ/км.}$$

Результаты анализа в виде глаз-диаграмм представлены на Рис. 8.

Для повышения помехозащищенности беспроводного оптического канала связи и энергетической эффективности использования полосы спектра сигнала рассмотрим применение QAM и OFDM.

Расчеты параметров OFDM-сигналов для различных телекоммуникационных систем (ТКС) представлены в Таблице 2.

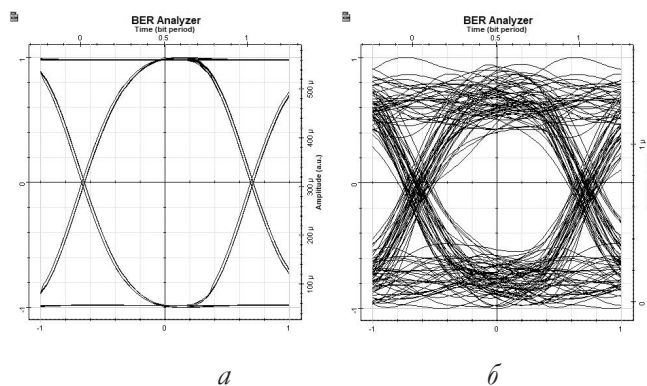


Рис. 8. Глаз-диаграммы для базовой модели FSO канала связи при длине волны 1550 нм, ослаблении в канале связи 85 дБ/км, скорости передачи данных 1 Гбит/с: дистанция 150 м, Q=614 (а); дистанция 420 м, Q=6 (б).

Таблица 2

Параметры OFDM-сигналов для различных телекоммуникационных систем

ТКС	Ширина канала, МГц	Размер FFT	$T_{sym}, \mu s$	$\Delta f_{car}, \text{кГц}$
LTE(4G)	20	1024, 2048	66.7	15
Wi-Fi 4	20, 40	64, 128	3.6 (с короткими интервалами) 4 (с длинными интервалами)	312.5
Wi-Fi 5	20, 40, 80, 160	64, 128, 256, 512	3.2	312.5
Wi-Fi 6	20, 40, 80, 160	64, 128, 256, 512, 1024, 2048	12.8	78.125

В методе OFDM используются различные методы модуляции, позволяющие в одном дискретном состоянии сигнала (символе) закодировать несколько информационных битов. Так, в стандарте IEEE 802.11a используются двоичная и квадратурная фазовые модуляции (BPSK и QPSK), в стандарте IEEE 802.11b – двоичная (BDPSK) и квадратурная (QDPSK) относительная фазовая модуляция.

Максимальный уровень модуляции:

- в стандарте IEEE 802.11n (Wi-Fi 4) – 64-QAM;
- в стандарте IEEE 802.11ac Wave 2 (Wi-Fi 5) – 256-QAM;
- в стандарте IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) – 1024-QAM.

Второй вариант организации удаленного широкополосного канала связи с применением FSO представлен на Рис. 7. Здесь FSO обеспечивает высокоскоростную передачу цифрового потока данных с OFDM между береговой подсистемой и БПЛА, ретранслятор которого обеспечивает требуемую зону покрытия для совместной работы группы беспилотных надводных аппаратов.

Модель FSO системы с QAM и OFDM для цифрового исходного потока данных показана на Рис. 9.

Параметры модели FSO системы:

- скорость передачи данных: 10 Гбит/с;
- QAM-модуляция цифрового сигнала: 16QAM;
- помехозащищенное кодирование: код Грея;
- параметры OFDM:
 - количество поднесущих: 128;
 - количество точек префикса: 10;
 - номера информационных поднесущих: 25-104.
- пилотные сигналы на поднесущих с номерами: 25, 44, 64, 84, 104.

В модели на Рис. 9 применяется подсистема модели квадратурного электрооптического модулятора (Рис. 10), реализованного на основе двух электрооптических модуляторов Маха-Цандера.

В схеме на два канала подаются управляющие I-Q сигналы, на выходе одного из модуляторов оптический сигнал сдвинут по фазе на 90° .

Так как для построения FSO применяется когерентная оптическая схема канала связи,

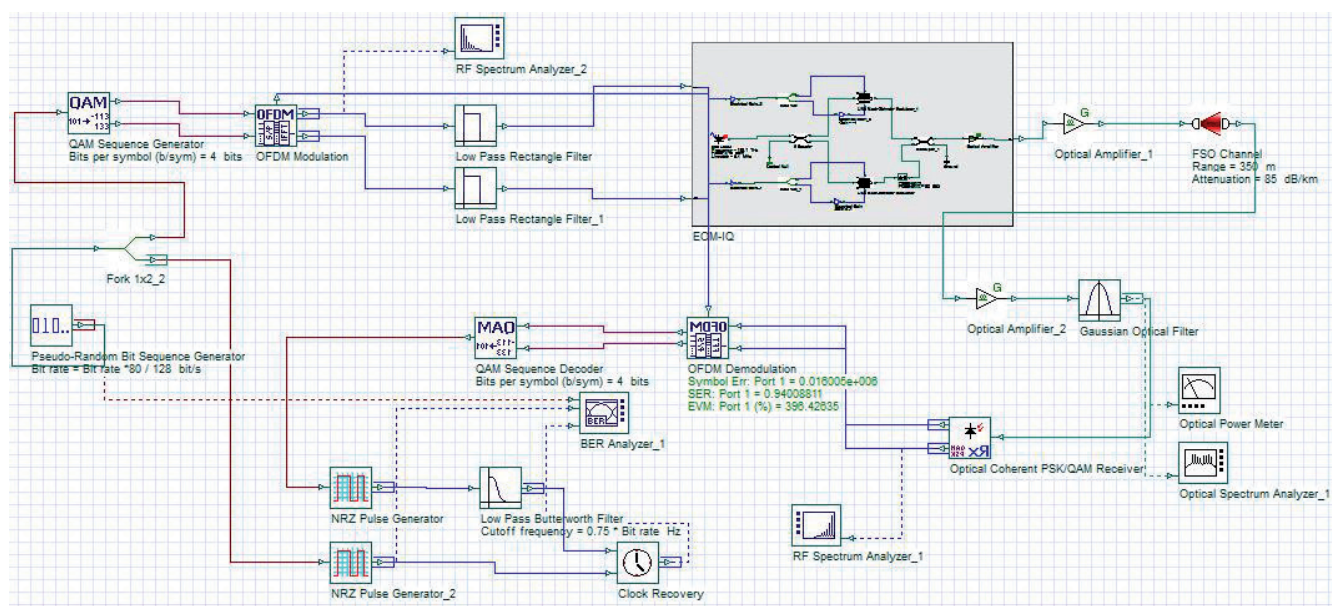


Рис. 9. Модель FSO системы с QAM и OFDM.

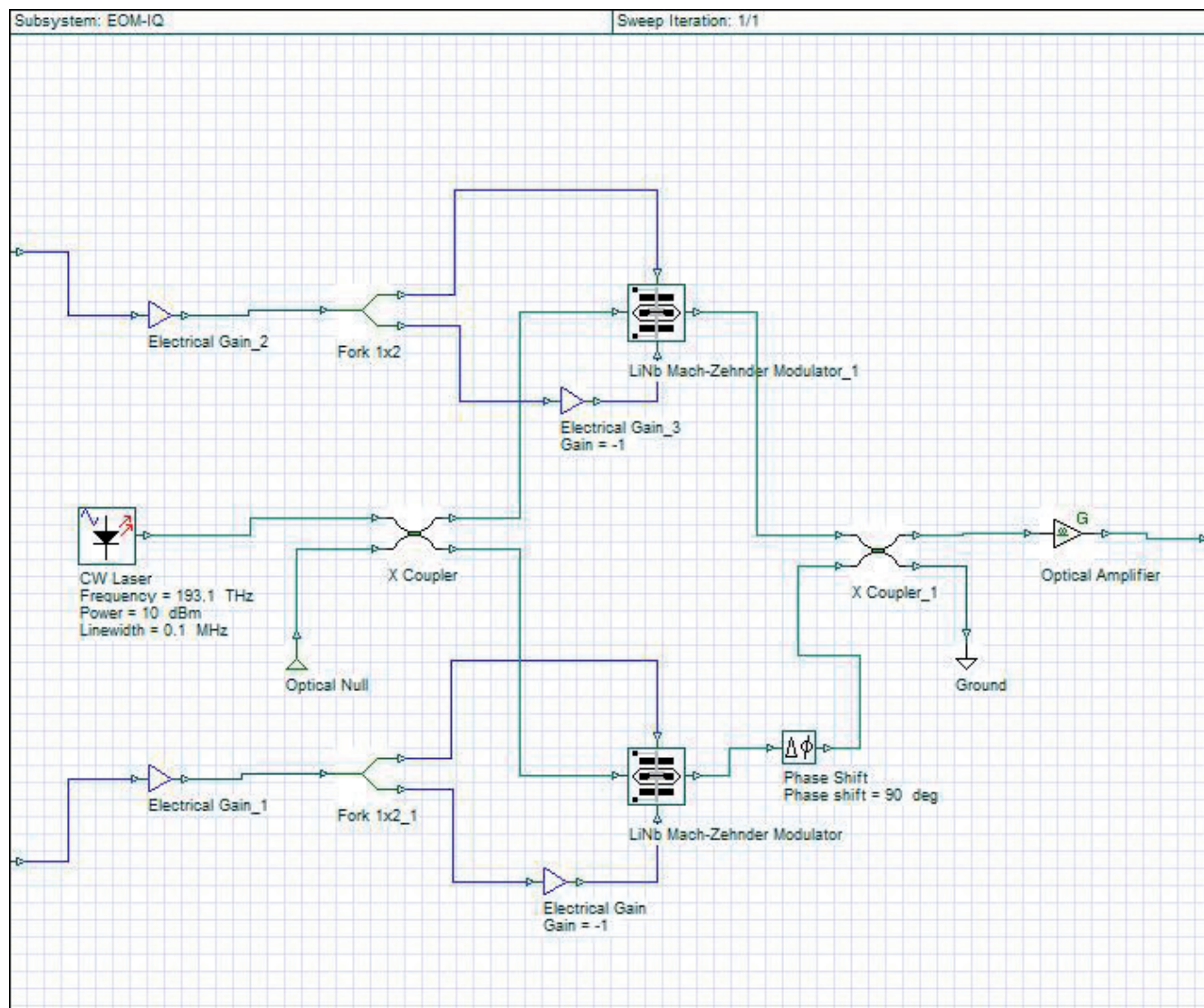


Рис. 10. Подсхема модели квадратурного электрооптического модулятора.

то в качестве приемника применяется когерентный оптический приемный модуль, на входе которого установлен полосно-пропускающий оптический фильтр с полосой пропускания 25 ГГц. На Рис. 11 показана глаз-диаграмма для случая оптического канала связи протяженностью 350 м при погонном поглощении в атмосфере 85 дБ/км.

Энергетические характеристика FSO системы корректируются двумя эрбиевыми волоконными усилителями (Optical Amplifier_1 и Optical Amplifier_2 – на Рис. 9), усиление которых может регулироваться для настройки значения бюджета оптического

тракта FSO системы на воздушной трассе требуемой протяженности.

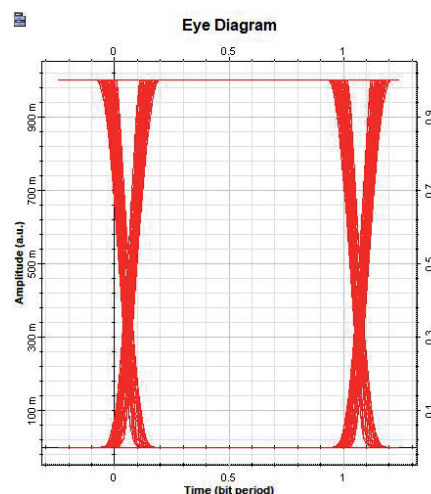


Рис. 11. Глаз-диаграммы, измеренная на приборе BER_Analyzer_1 (см. рис. 9).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что для организации судоходства в прибрежной зоне с применением передовых телекоммуникационных технологий перспективным является применение беспроводной оптической связи на линии берег – опорный ретранслятор. С берега на ретранслятор в боковой полосе оптической несущей передается цифровой поток данных с 16QAM и OFDM. На ретрансляторе осуществляется радиообмен с судами. Сам ретранслятор размещается на беспилотном летательном аппарате или на дирижабле.

Предложена организация оптического канала с применением технологии FSO, которая позволяет на протяженной трассе передавать данные с большой скоростью. При построении модели передающего тракта оптической системы применен подход, при котором оптическая несущая моделируется в квадратуре на двух электрооптических модуляторах, то есть беспроводная FSO-система является когерентной. В передающем блоке TRx модуля FSO-системы это освобождает от необходимости переноса промоделированного цифрового сигнала на радиочастотную поднесущую для модуляции интенсивности излучения лазера. При этом в приемном блоке TRx модуля FSO-системы не требуется применять синхронный СВЧ детектор.

Такое применение оптической связи позволяет повысить емкость радиоканалов, предоставляемых судам, существенно повысить электромагнитную совместимость различных радиосистем, создает защищенный канал связи. Показано, что при неблагоприятных погодных условиях на воздушной трассе берег-опорный ретранслятор протяженностью более 300 м можно передавать данные со скоростью не менее 10 Гбит/с, что позволит организовать сеть воздушных ретрансляторов для решения перспективных задач e-Навигации, для организации работы морского Интернета вещей.

ЛИТЕРАТУРА

1. E-NAVIGATION STRATEGY IMPLEMENTATION PLAN – UPDATE 1 (MSC.1/Circ.1595) [Online] Available: <https://iho.int/uploads/default/m/s/msc-circ1595-e-navigation-strategy-implementation-plan-update-1-secretariat.pdf>, access data 12.10.2023.
2. Пинский АС. E-Навигация и безэкипажное судоходство. *Транспорт Российской Федерации*, 2016, 4(65):50-54.
3. Скварник ИС, Совкова ОИ, Стаценко ЛГ, Турмов ГП. Технологии беспроводного широкополосного доступа: оценка возможности применения для управления движением судов. *Вестник инженерной школы ДВФУ*, 2019, 4(41):113-124.
4. Ali H-F, Kexiong Z, Yaling Y, Majid M. A Self-Sustaining Maritime Mesh Network. *Proc. of United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM)*, 2019: 1-2. DOI: 10.23919/USNC-URSI-NRSM.2019.8713132.
5. Zainuddin Z, Wardi, Nantan Y. Applying Maritime Wireless Communication to Support Vessel Monitoring. *Proc. of 4th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, 2017: 158-161. DOI: 10.1109/ICITACEE.2017.8257695.
6. Рекомендация МСЭ-R P.527-4. Электрические характеристики земной поверхности. Международный союз электросвязи. [Online] Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.527-4-201706-S!!PDF-R.pdf, access data 12.10.2023.
7. Uysal M, Nouri H. Optical wireless communications – an emerging technology. *Proc. of 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2014:7. DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876267.
8. Khalighi M, Uysal M. Ali Survey on free space optical communication: a communication theory perspective. *IEEE Communication*

- Surveys & Tutorials*, 2014, 4(16):2231-2258.
DOI: 10.1109/COMST.2014.2329501.
9. Szajowski PF, Nykolak G, Auburn JJ, Presby HM, Tourgee GE, Korevaar E, Schuster J, Kim II. 2.4 km free-space optical communication 1550 nm transmission link operating at 2.5 Gb/s – experimental results. *Proc. of SPIE Conf. Optical Wireless Communications*, 1999:29-40. DOI: 10.1117/12.338979.
10. Kim II, McArthur B, Korevaar EJ. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. *Proc. of SPIE Conf. Optical Wireless Communications*, 2001:26-37. DOI: 10.1117/12.417512.

Афонин Игорь Леонидович

д.т.н., профессор

Севастопольский государственный университет

Севастополь 299053, Россия

E-mail: ilafonin@mail.sevsu.ru

Головин Владислав Викторович

к.т.н., доцент

Севастопольский государственный университет

Севастополь 299053, Россия

E-mail: vvgolovin@mail.sevsu.ru

Ткаченко Михаил Олегович

к.т.н., доцент

Севастопольский государственный университет

Севастополь 299053, Россия

E-mail: motkachenko@mail.sevsu.ru

Тыщук Юрий Николаевич

доцент

Севастопольский государственный университет

Севастополь 299053, Россия

E-mail: yntyshchuk@mail.sevsu.ru

Поляков Александр Леонидович

к.т.н., доцент

Севастопольский государственный университет

Севастополь 299053, Россия

E-mail: alpolyakov@mail.sevsu.ru

Слезкин Геннадий Витальевич

ассистент

Севастопольский государственный университет

Севастополь 299053, Россия

E-mail: gvslezkin@mail.sevsu.ru.