

МОДЕЛЬ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ПЕРЕДАТЧИКА С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ УПЛОТНЕНИЕМ КАНАЛОВ

И. В. СТЕПАНОВ¹, Д. М. ФАТХИЕВ², В. С. ЛЮБОПЫТОВ³, Р. В. КУТЛЮЯРОВ⁴

¹stepanov.iv@ugatu.su, ²fatkhiev.dm@ugatu.su, ³v.lyubopytov@skoltech.ru, ⁴kutluyarov.rv@ugatu.su

^{1,2,4} ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

³ Центр фотоники и фотонных технологий, Сколковский институт науки и технологий (Сколтех)

Аннотация. В статье представлена модель оптического передатчика, работающего со скоростью 200 Гбит/с. Данная скорость передачи достигается за счет применения четырехуровневой амплитудно-импульсной модуляции (РАМ-4) и двух методов мультиплексирования – пространственного и частотного. Также показаны результаты моделирования устройства с использованием программного обеспечения Ansys Lumerical.

Ключевые слова: четырехуровневая амплитудно-импульсная модуляция; пространственное уплотнение каналов; орбитальный угловой момент; моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Количество передаваемой информации растет с каждым годом. Примерно за 10 лет XXI века объем глобального трафика достиг масштаба зеттабайт. Согласно прогнозам, количество трафика будет увеличиваться экспоненциально каждый год. Так аналитическое агентство IDC предполагает рост трафика с 33 зеттабайт в 2018 году до 175 зеттабайт в 2025 году [1]. Для удовлетворения растущего спроса необходимо созданий новых центров обработки данных, которые потребляют значительную часть энергии в отрасли телекоммуникаций.

Переход к оптическим системам передачи данных позволяет снизить энергопотребление и значительно увеличить скорость соединения. Однако классические оптические системы разработаны, в первую очередь, для магистральных сетей, что делает их слишком дорогостоящими для применения в центрах обработки данных [2]. Также стоит отметить, что общепринятые методы уплотнения каналов (временное, спектральное и поляризационное мультиплексирование), а также многоуровневые методы модуляции практически достигли предела пропускной способности.

Выходом в данной ситуации является применение пространственного уплотнения каналов совместно с вышеперечисленными методами. Одним из перспективных направлений в данной области является применение вихревых пучков, переносящих орбитальный угловой момент, также известных как оптические вихри.

Однако преобразование и передача сигнала, мультиплексированного по поляризации и угловому орбитальному моменту, приводят к значительным перекрестным помехам между каналами. Из вышеперечисленного следует, что по экономическим соображениям, в системах передачи, использующих орбитальный угловой момент света, уплотнение каналов по поляризации и когерентный прием становятся нецелесообразными для центров обработки данных и прочих оптических линий коротких расстояний, так как при их использовании требуется использование ресурсоемких и дорогих цифровых сигнальных процессоров.

Соответственно, для реализации передатчиков с уплотнением по орбитальному угловому моменту наиболее выгодным является применение временного и спектрального уплотнения каналов совместно с амплитудными методами модуляции.

Целью данной работы является разработка модели интегрального оптического передатчика для центров обработки данных и оптических линий коротких расстояний, реализующего пространственное уплотнение каналов. Для увеличения скорости передачи на одном канале предполагается применение четырехуровневой амплитудно-импульсной модуляции (РАМ-4). Помимо пространственного уплотнения каналов, предлагается применение мультиплексирования по длине волны.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАМ-4 В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОТОНИКЕ

РАМ-4 обеспечивает увеличение скорости передачи данных в два раза при невысокой сложности реализации. Данный формат модуляции позволяет использовать схемы прямого детектирования на приеме без дополнительной цифровой обработки сигнала. Основным недостатком РАМ-4 является более высокое требование к отношению сигнал/шум по сравнению с другими форматами модуляции.

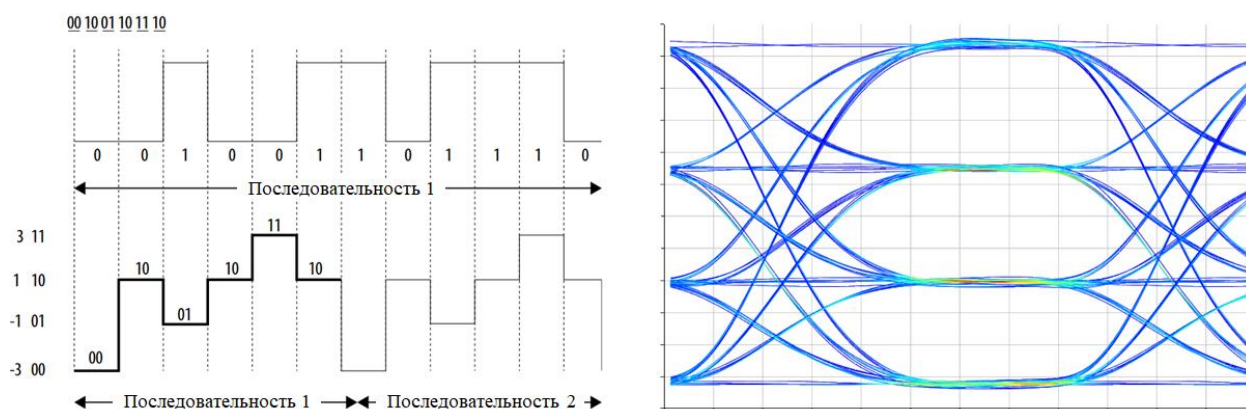


Рис. 1. Вид сигнала РАМ-4 [3] и его глаз-диаграмма

Существует два основных метода реализации РАМ-4 в устройствах интегральной фотоники: с использованием цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) и без него. В первом случае электрический сигнал, подаваемый на оптический модулятор, представляет собой многоуровневый сигнал, формируемый ЦАП. К преимуществам данного метода можно отнести упрощение фотонной интегральной схемы (ФИС) передатчика, так как используется только один модулятор, а также возможность использования стандартных модуляторов, которые предлагаются производителями ФИС [4]. Однако требуется применение отдельной микросхемы ЦАП, что увеличивает габариты устройства и его энергопотребление.

При отсутствии ЦАП два управляющих сигнала подаются на разные модуляторы (или же сегменты модулятора), то есть РАМ-4 сигнал формируется только в оптическом домене, поэтому данный метод в некоторых случаях называют оптическим ЦАП [2]. К преимуществам данного метода можно отнести меньшие габариты всего устройства и сниженное энергопотребление. Главным недостатком является усложнение ФИС.

На рис. 2 показаны реализации РАМ-4 на основе модулятора Маха-Цендера, однако данный модулятор может быть заменен любым другим амплитудным модулятором (микрокольцевым, микродисковым, электро-абсорбционным и т. д.). В данной статье будет использован метод с ЦАП, так как в этом случае возможен быстрый переход к модели со стандартными компонентами, предоставляемыми производителем ФИС, что позволяет снизить риск производства нерабочего образца в дальнейшем.

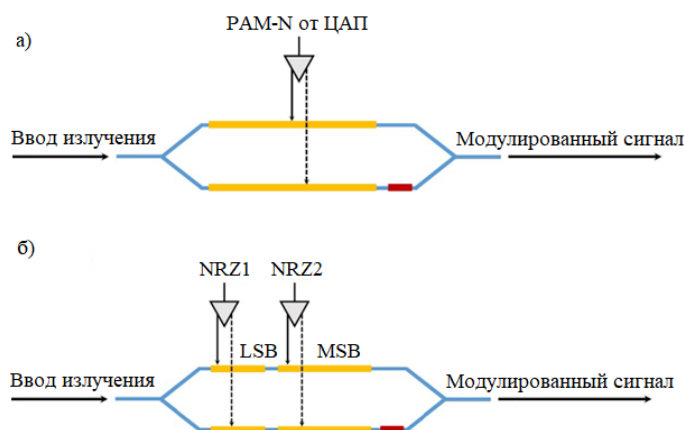


Рис. 2. Два основных метода генерации PAM-4 сигнала в интегральной фотонике на примере модулятора Маха-Цендера:

a – с использованием ЦАП; *б* – без ЦАП. NRZ1 и NRZ2 – информационные сигналы с кодированием без возврата к нулю. LSB и MSB – обозначения наименее (с меньшей амплитудой) и наиболее (с большей амплитудой) значащих бит. Штриховой линией показан инвертированный сигнал

МОДЕЛЬ ИЗЛУЧАТЕЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ

Для преобразования гауссовского пучка в вихревой предполагается использование двухмодового кольцевого резонатора (вид сверху представлен на рис. 3). Данное преобразование происходит за счет возбуждения мод шепчущей галереи, переносящих орбитальный угловой момент, в кольце с периодическим изменением показателя преломления. В данном случае в качестве такого изменения используются глухие цилиндрические отверстия. Представленный резонатор способен излучать два оптических вихря различных порядков на одной резонансной длине волны, на которой эффективные показатели преломления мод TE₀₀ и TE₁₀ равны для верхнего и нижнего подводящих волноводов. Однако на других резонансах такого эффекта не происходит, что связано с неравенством эффективных показателей преломления для мод TE₀₀ и TE₁₀ в остальных случаях.

Для моделирования кольцевого резонатора использовался программный пакет Ansys Lumerical FDTD.

Из полученных резонансных характеристик (рис. 4 и 5) были выбраны три резонансные длины волны для демонстрации работы передатчика: 1537,55 нм, 1546,29 нм (длина волны, на которой эффективные показатели мод TE₀₀ и TE₁₀ совпадают) и 1555,12 нм. В итоге, в нижний волновод подается три сигнала, уплотненных по длине волны, а верхний – один сигнал с несущей 1546,29 нм.

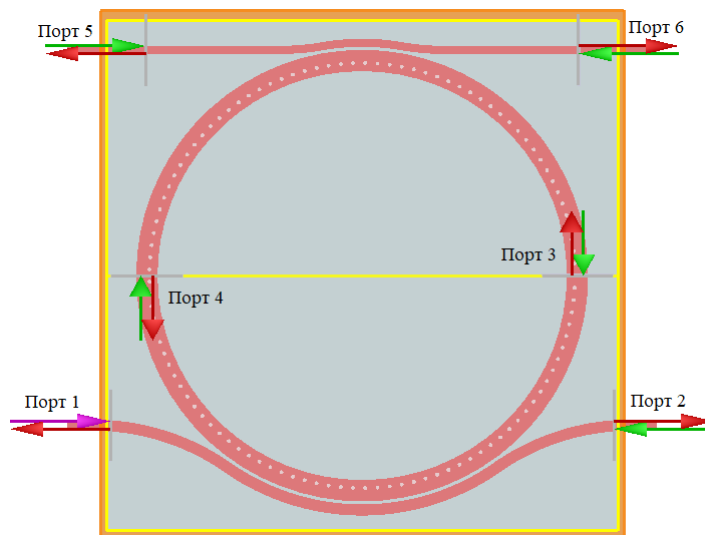


Рис. 3. Модель двухмодового излучателя в Lumerical FDTD

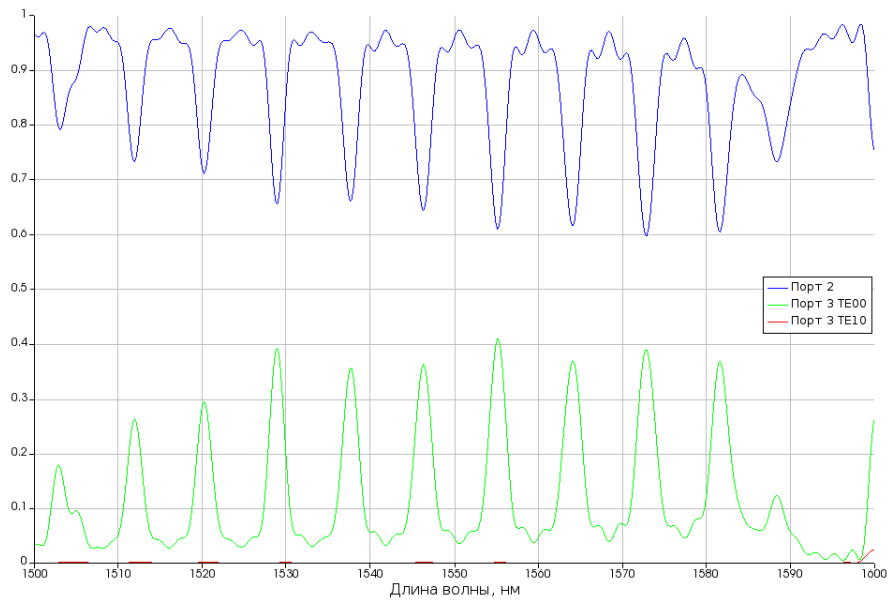


Рис. 4. Вычисленные резонансные характеристики для моды TE00, подводимой нижним волноводом

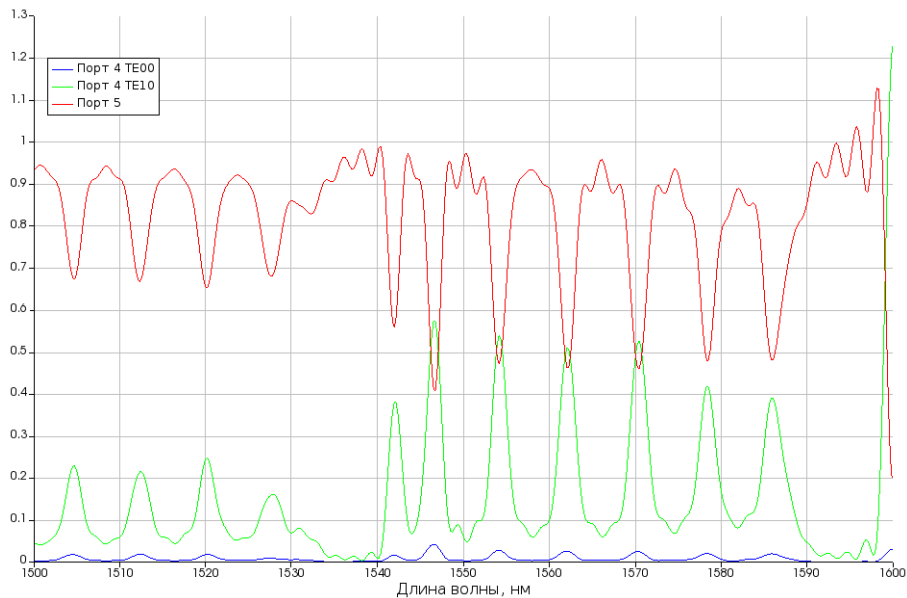


Рис. 5. Вычисленные резонансные характеристики для моды TE10, подводимой верхним волноводом

Смоделированные распределения излучаемого электромагнитного поля на вышеуказанных длинах волн представлены на рисунках ниже.

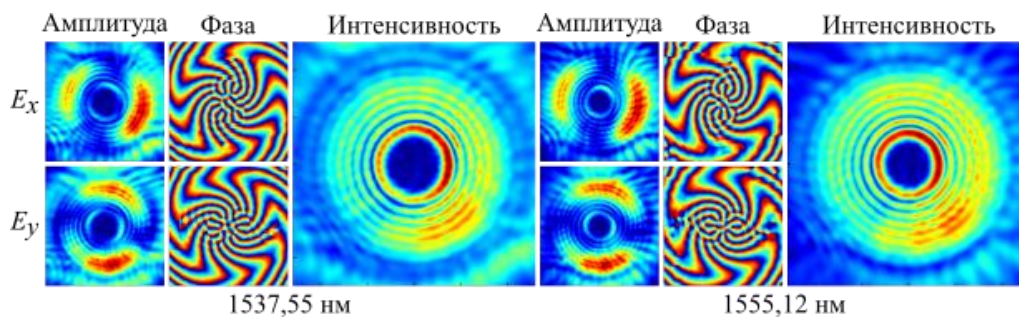


Рис. 6. Распределение электромагнитного поля на длинах волн 1537,55 и 1555,12 нм

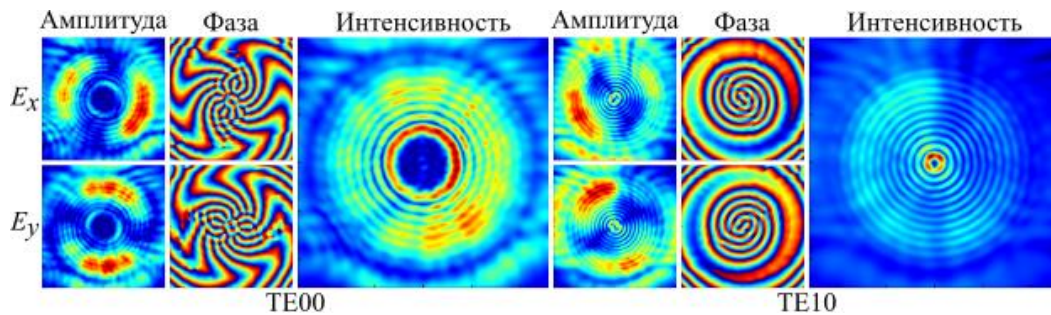


Рис. 7. Распределение электромагнитного поля на длине волны 1546,29 нм для мод TE00 и TE10

Из рис. 6 по фазовым распределениям можно определить, что на резонансе 1537,55 излучается оптический вихрь порядка +12, а на длине волны 1555,12 нм порядка +10. В случае длины волны 1546,29 нм можно наблюдать два вихря, возбуждаемых модами TE00 и TE10: порядков +11 и -1, соответственно.

Стоит отметить, что при подаче излучения в подводящих волноводах в противоположных направлениях, становится возможным излучения двух пар сопряженных вихревых мод, что позволяет расширить возможности предлагаемой схемы передатчика по количеству уплотняемых каналов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАТЧИКА

Для симуляции работы четырехканального передатчика была разработана его модель в программном пакете Ansys Lumerical INTERCONNECT. Фактически, данная модель представляет собой трехканальный передатчик с уплотнением по длине волны с отдельным четвертым каналом для моды TE10. Данное допущение было использовано по причине того, что в данном программном пакете на данный момент не существует возможности показать уплотнение каналов по орбитальному угловому моменту с использованием стандартных элементов.

Для получения электрического PAM-4 сигнала были использованы два генератора псевдослучайной битовой последовательности (PRBS) с последующим преобразованием бит в электрический сигнал (блоки NRZ) и сумматор. Стоит отметить, что напряжения были выбраны таким образом, чтобы получить четыре уровня сигнала с одинаковым шагом 2 В от 0 до 6 В. Полученный сигнал поступает на модулятор Маха-Цендера, на который, в свою очередь, также поступает оптический сигнал с одной из резонансных длин волн (рис. 8).

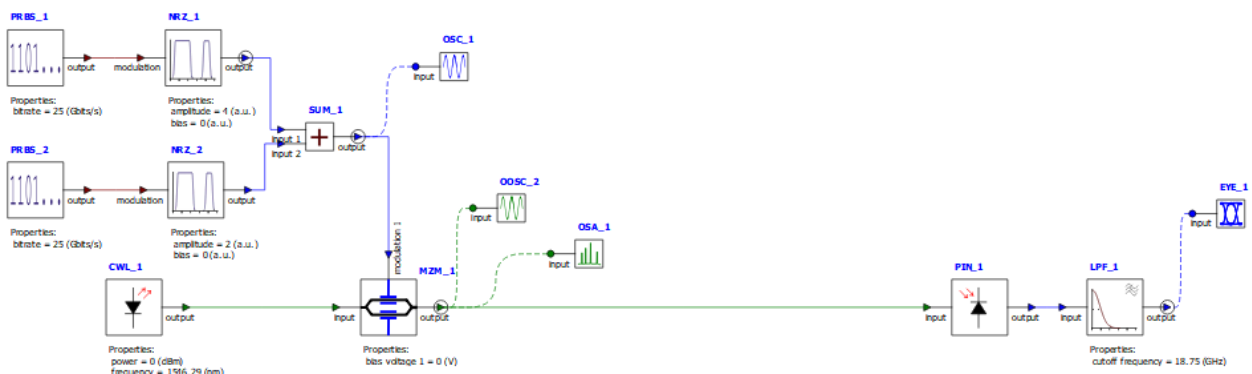


Рис. 8. Отдельный канал передатчика для моды TE10

Для объединения каналов был использован волноводный комбайнер (COMB), а для выделения каналов на приемной стороне в качестве полосового фильтра были использованы микрокольцевые резонаторы с двумя подводящими волноводами (RING). Для получения глаз-диаграммы переданного сигнала его необходимо преобразовать из оптического в элек-

трический, для этого были использованы стандартные PIN-фотодиоды и соответствующие анализаторы. Полная модель трехканального передатчика представлена на рис. 9.

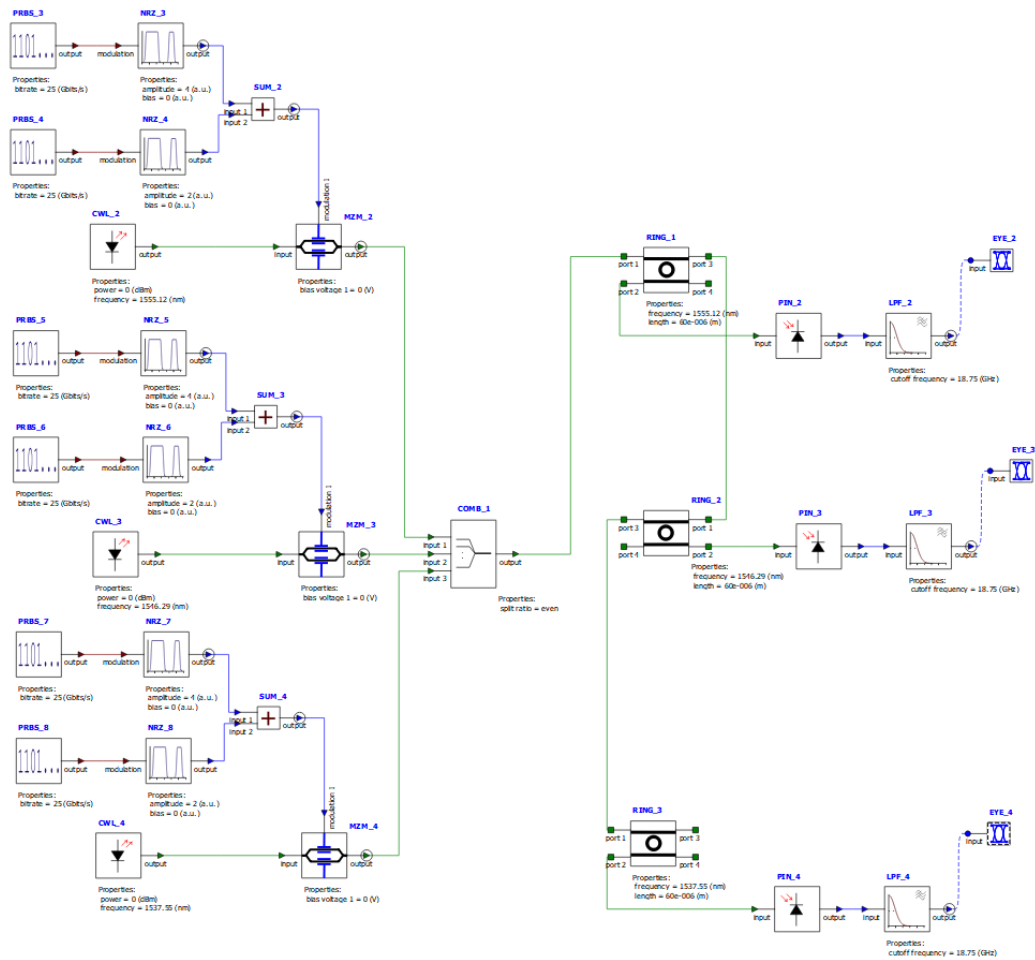


Рис. 9. Модель трехканального передатчика

Полученные глаз-диаграммы показывают работоспособность всех каналов передатчика при символической скорости 25 Гбод, что с учетом модуляции PAM-4 эквивалентно 50 Гбит/с на один канал.

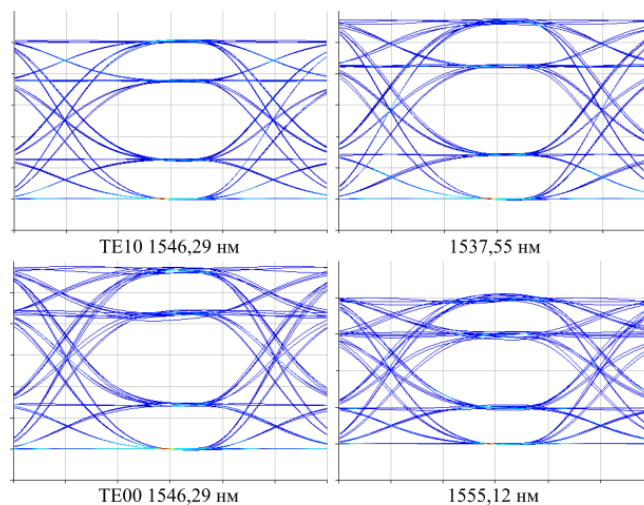


Рис. 10. Глаз-диаграммы сигналов, полученные для каждого канала

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье приведен краткий анализ возможности реализации формата модуляции PAM-4 средствами интегральной фотоники. На основе одной из реализаций построена модель четырехканального оптического передатчика. Помимо этого, приведены результаты моделирования двухмодового излучателя оптических вихрей, благодаря которому возможна реализация уплотнения двух каналов на одной длине волны по орбитальному угловому моменту. Данный излучатель позволяет уменьшить количество лазеров, подключаемых к ФИС, что в конечном счете снижает объем потребляемой энергии, стоимость передатчика и его размеры.

Предложенная схема способна обеспечивать скорость передачи до 200 Гбит/с, а впоследствии скорость может быть увеличена до 400 Гбит/с за счет применения высокоскоростных формирователей электрического сигнала PAM-4.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФГБОУ ВО УГАТУ #FEUE-2020-0007 по теме «Теоретические основы моделирования и семантического анализа процессов преобразования вихревых электромагнитных полей в инфокоммуникационных системах».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reinsel D., Gantz J., Rydning J. The Digitization of the World From Edge to Core [Элек-тронный ресурс]. 2018. URL: <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf> (дата обращения: 17.02.2022).
2. Shi W. et al. Silicon photonic modulators for PAM transmissions // J. Opt. 2018. Vol. 20, № 8. P. 083002.
3. Corporation I. AN 835: PAM4 Signaling Fundamentals.
4. Siew S.Y. et al. Review of Silicon Photonics Technology and Platform Development // J. Light. Technol. OSA, 2021. Vol. 39, № 13. P. 4374–4389.

ОБ АВТОРАХ

СТЕПАНОВ Иван Васильевич, аспирант 2-го курса каф. ТС факультета АВИЭТ.

ФАТХИЕВ Денис Марсович, аспирант 1-го курса каф. ТС факультета АВИЭТ.

ЛЮБОПЫТОВ Владимир Сергеевич, старший научный сотрудник Центра фотоники и фотонных технологий, Сколковский институт науки и технологий.

КУТЛУЯРОВ Руслан Владимирович, директор центра управления проектами ФГБОУ ВО УГАТУ.

METADATA

Title: High-speed optical transmitter model with space division multiplexing.

Authors: I. V. Stepanov ¹, D. M. Fatkhiev ², V. S. Lyubopytov ³, R. V. Kutluyarov ⁴

Affiliation: ^{1,2,4} Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

³ Center for Photonic Science and Engineering, Skolkovo Institute of Science and Technology, Russia.

Email: ¹ stepanov.iv@ugatu.su, ² fatkhiev.dm@ugatu.su, ³ kutluyarov.rv@ugatu.su, ⁴ v.lyubopytov@skoltech.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (26), pp. 70-76, 2022. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract. This paper presents an optical transmitter model with the transmission rate up to 200 Gbps. This rate is achieved with using the four-level pulse amplitude modulation format (PAM-4) and two methods of multiplexing – space-division multiplexing and wavelength-division multiplexing. Also modeling results in Ansys Lumerical software are presented.

Key words: four-level pulse amplitude modulation; space-division multiplexing; orbital angular momentum; modeling.

About authors:

STEPANOV, Ivan Vasilevich, postgraduate student 2 year, Ufa State Aviation Technical University.

FATKHIEV, Denis Marsovich, postgraduate student 1 year, Ufa State Aviation Technical University.

LYUBOPYTOV, Vladimir Sergeyevich, senior researcher, Center for Photonic Science and Engineering, Skolkovo Institute of Science and Technology.

KUTLUYAROV, Ruslan Vladimirovich, director of the project management center, Ufa State Aviation Technical University.