

Разработка трансивера оптического сигнала OFDM на основе AWGR

Н.И. Поповский^{1,*}, В.В. Давыдов^{2,†}

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
Россия, 195323, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1

²Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29б литера Б
(Поступила в редакцию 09.06.2024; подписана в печать 14.07.2024)

В волоконно-оптических сетях увеличение скорости канала при сохранении одной несущей сталкивается с проблемой резкого сокращения дальности передачи без восстановления сигнала. Необходимость строительства дополнительных точек усиления приводит к увеличению стоимости системы связи. Оптимальным решением для сохранения дальности передачи и увеличения скорости канала является использование нескольких несущих частот в одном объединенном канале, который обычно называют суперканалом. Одним из возможных способов формирования суперканала является OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing). Поскольку обратное преобразование Фурье топологически идентично преобразованию Фурье, AWGR может использоваться в передатчике в качестве мультиплексора сигналов OFDM. Исследуется устройство приемопередатчика, который будет работать как мультиплексор нескольких входных оптических каналов и передатчик одного общего суперканала в канал связи.

PACS: 42.79.Hr

УДК: 535.8

Ключевые слова: волоконно-оптические системы передачи, плотное мультиплексирование с разделением по длине волны, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов, гибкие оптические сети.

ВВЕДЕНИЕ

На действующих транспортных сетях, построенных с использованием технологии OTN/DWDM, чаще всего для оптических каналов используют фиксированную стандартизованную сетку частот (Fixed Grid) с шагом 50 или 100 ГГц [1–3]. Для организации подобной линии связи используется наиболее простое оборудование, однако такой подход имеет ряд ограничений. Применение технологии Flex Grid позволяет повысить уровень спектральной эффективности и пропускной способности системы DWDM.

Обычные транспортные сети, построенные с использованием технологии OTN/DWDM (Optical Transport Network/DWDM), обычно используют фиксированную стандартизованную частотную сетку (Fixed Grid), которая характеризуется шагом 50 или 100 ГГц для оптических каналов [3, 5, 6]. Хотя это упрощает использование оборудования при создании линий связи, такой подход имеет определенные ограничения. Прежде всего, система DWDM сталкивается с трудностями при достижении высокого уровня спектральной эффективности, особенно при использовании оптических сигналов с шириной спектра, значительно меньшей, чем шаг фиксированной частотной сетки (рис. 1).

При создании оптического канала со скоростью 1 Тбит/с, использующего 10 потоков по 100 Гбит/с в формате модуляции QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), наряду со стандартной волновой сеткой WDM (Wavelength Division Multiplexing) с частотой 50 ГГц,

используемой чередование поляризации и частичное перекрытие спектра между соседними сигналами, требуемая полоса частот расширяется до 500 ГГц [2]. При использовании гибкой сетки частот может быть применена частотная сетка 25 ГГц между поднесущими частотами, в результате чего общая полоса частот сигнала составит 250 ГГц [3]. Такой подход позволяет в два раза увеличить спектральную эффективность при построении оптического суперканала, сохраняя при этом дальность передачи, близкую к скорости канала 100 Гбит/с.

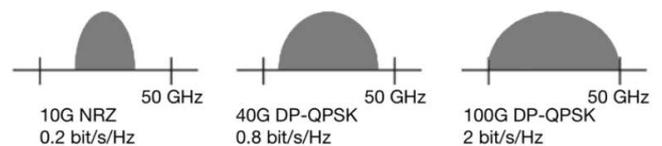


Рис. 1. Полоса частот, занимаемая каналами с разной скоростью

Мотивация для внедрения гибкой частотной сетки может быть объяснена несколькими факторами: необходимостью объединения оптических каналов с различными фиксированными скоростями передачи для цифровых потоков (2.5, 10, 40, 100, 200 Гбит/с и т.д.), а также необходимостью передачи сигналов с различными форматами модуляции (NRZ, DPSK, DP-QPSK и т.д.). Все гибкие сетевые решения направлены на оптимизацию использования полосы частот в оптических каналах по всей сети [3–5].

Целью статьи является обсуждение схемы передатчика оптического сигнала с возможностью мультиплексирования нескольких каналов с использованием ортогонального частотного разделения. Научная новиз-

* nikitnikita24@mail.ru

† davydov_vadim66@mail.ru

на в этой работе заключается в использовании исключительно оптических элементов для реализации ортогонального частотного мультиплексирования. Процесс включает преобразование четырех оптических клиентских каналов, каждый из которых работает со скоростью 10 Гбит/с, в электрические сигналы. Впоследствии многоканальный групповой сигнал генерируется в оптической области путем объединения сигналов из различных оптических поднесущих каналов.

1. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ОПТИЧЕСКОГО ТРАНСИВЕРА

Формирование оптических поднесущих волн суперканала предусматривается в некоторой нелинейной или линейной оптической среде [3, 7, 8]. После формирования поднесущих волн производится их разделение с помощью сплиттера и последующая модуляция информационными сигналами. Промодулированные поднесущие частоты объединяются оптическим маршрутизатором на основе дифракционной волноводной решётки (рис. 2).

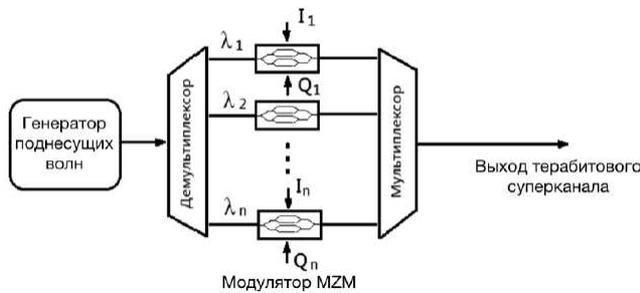


Рис. 2. Структурная схема оптического OFDM-передатчика с четырьмя поднесущими

Сформированные таким образом суперканалы объединяются оптическим мультиплексором в линейный групповой оптический сигнал с защитной полосой между суперканалами. Поднесущие будут полностью ортогональными только в том случае, если полоса пропускания модуляторов данных равна общей полосе пропускания всех поднесущих [9, 10]. Важным условием для минимизации перекрестных помех между поднесущими является выравнивание по времени сигналов, поступающих в каждый модулятор. Перекрестные помехи сводятся к минимуму путем настройки частотного интервала поднесущих таким образом, чтобы он соответствовал скорости передачи символов в каждом канале передачи данных.

Дифракционная волноводная решётка может использоваться в качестве демультимплексора для оптической сигнала OFDM, поскольку она обеспечивает как преобразование последовательного сигнала в параллельный, так и оптическое преобразование Фурье (ПФ) в одном комплексе. Поскольку обратное преобразова-

ние Фурье (ОПФ) топологически идентично преобразованию Фурье, маршрутизатор на основе дифракционной волноводной решётки также может использоваться в качестве мультиплексора OFDM сигнала в передатчике.

В основе конструкции передатчика лежат три слоя пластин (рис. 3). Первый действует как простой сплиттер оптических импульсов. Второй слой действует как ОПФ, обеспечивая набор фазовых сдвигов на нем, причем каждый сдвиг зависит от конкретного входного волновода и конкретного выходного волновода, подключенных к нему. Таким образом, каждый волновод получает взвешенную по фазе комбинацию выходных сигналов четырех модуляторов. Третий слой объединяет выходные сигналы второго с различными временными задержками. Таким образом, каждый входной импульс становится последовательностью из восьми выходных импульсов, и каждый выходной импульс представляет собой взвешенную по фазе комбинацию выходных сигналов всех модуляторов.

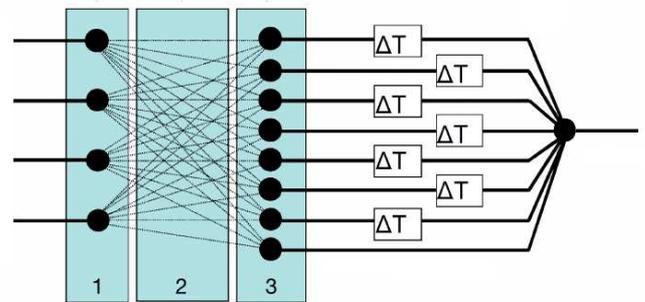


Рис. 3. Структурная схема AWGR-передатчика с четырьмя поднесущими: 1 — матрица сплиттеров, 2 — матрица фазовых задержек, 3 — матрица сплиттеров

Сигнал на входе приемника разделяется на несколько равных частей, каждый из которых получает определенную временную задержку. Разница в длине ΔL между двумя волноводами приблизительно связана с временным интервалом между отсчетами ΔT по формуле (1). Далее матрица сплиттеров и волноводная решетка работают как преобразователь из последовательного в параллельный (рис. 4).

$$\Delta L \approx \Delta T \times \frac{c}{n_g}, \quad (1)$$

где c — скорость света, n_g — индекс решетки волновода.

Второй слой, который является матрицей фазовых задержек описывается уравнением (3) в виде коэффициентов передачи между выходами волноводов с временной задержкой m и выходами из самой решетки (метка n , которая несет сигнал поднесущей, k). Матрица фазовых сдвигов реализует экспоненциальный член в уравнении (2), а матрица сплиттеров суммирование

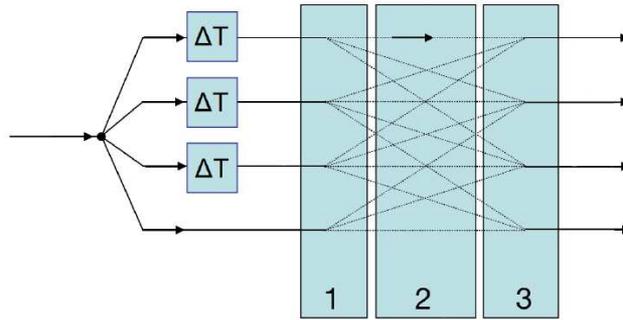


Рис. 4. Структурная схема AWGR приемника с четырьмя поднесущими: 1 — матрица сплиттеров, 2 — матрица фазовых задержек, 3 — матрица сплиттеров

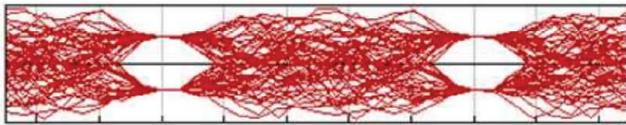


Рис. 5. Синфазная глаз-диаграмма

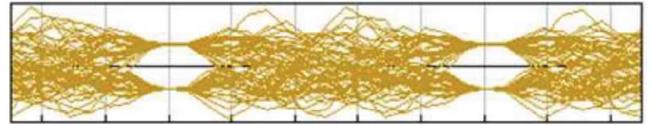


Рис. 6. Квадратурная глаз-диаграмма

для каждой частоты поднесущей.

$$V_{sc,k} = \sum_{m=0}^{N-1} V_{in}(m) \times \exp\left(\frac{-2\pi jkm}{N}\right), \quad (2)$$

где $V_{in}(m)$ — значение входного сигнала в точках выборки m , N — количество поднесущих.

$$\theta_{n,m} = 2\pi m \times \frac{n_s d}{\lambda R} \times nd_0, \quad (3)$$

где n_s — индекс решетки, d — расстояние между волноводами, λ — центральная длина волны, R — фокусное расстояние решетки, d_0 — расстояние между волноводами на выходе.

Поскольку каждый выходной сигнал AWGR представляет собой взвешенную сумму четырех последовательных выборок входных данных, следовательно он реализует преобразование Фурье, работающее с дискретными выборками во времени; однако надо помнить, что входы и выходы представляют собой непрерывные сигналы. Таким образом, это скользящее дискретное преобразование Фурье, где временные интервалы между последовательными преобразованиями бесконечно малы. Выходные данные будут действительны только в том случае, если все выборки находятся в пределах одного и того же символа OFDM. Для этого требуется, чтобы выходной сигнал AWGR был дискретизирован либо в оптической, либо в электрической областях.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ТРАНСИВЕРА

На рис. 5 и рис. 6 показаны синфазная и квадратурная глазные диаграммы. Максимальное раскры-

тие глаз-диаграмм происходит в течение приблизительно 20% периода действия одного символа OFDM. Это открытие соответствует моменту, когда все четыре выборки ПФ находятся в пределах одного символа OFDM, однако в остальное время возникают случайные помехи от других каналов.

Чтобы сохранять ортогональность, передача мощности от входа к выходу по AWGR по любому из волноводов должна быть одинаковой. Для 4-волноводного устройства единственным конструктивным требованием к однородности, предполагающим некоторую симметрию, является разница между мощностями, проходящими через AWGR по внешним волноводам, относительно мощностей в центральных волноводах. На рис. 7 и рис. 8 результаты моделирования показывают значения Q и BER для четырех каналов в зависимости от неравномерности мощности AWGR для трех электрических полос пропускания. Внутренние каналы, как правило, подвержены наибольшему перекрестным помехам, независимо от того, вызваны ли они уменьшенной шириной полосы пропускания или неравномерностью AWGR.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты показали, что стандартный AWGR, хотя и с меньшим количеством волноводов и более узким свободным спектральным диапазоном, может быть использована для идеального мультиплексирования и демultipлексирования поднесущих в оптической системе OFDM, при условии, что электрические полосы пропускания в передатчике и приемнике сопоставимы с общей полосой пропускания объединенных поднесу-

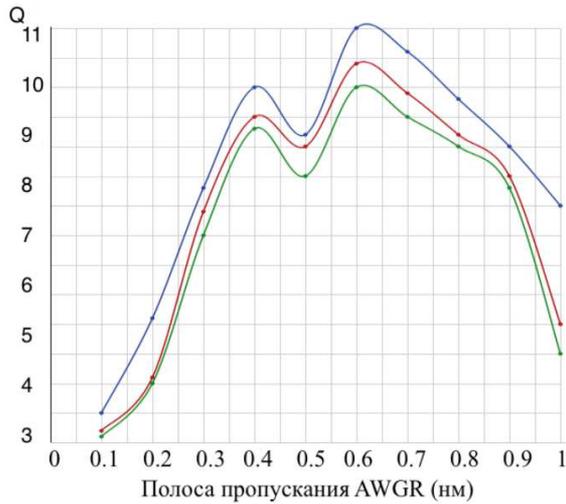


Рис. 7. Влияние полосы пропускания AWGR на Q. Электрическая полоса пропускания сигнала 25 ГГц (синий), 50 ГГц (красный), 75 ГГц (зеленый)

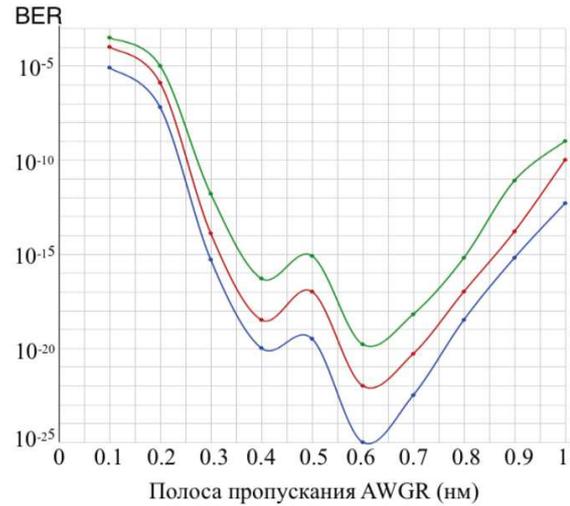


Рис. 8. Влияние полосы пропускания AWGR на BER. Электрическая полоса пропускания сигнала 25 ГГц (синий), 50 ГГц (красный), 75 ГГц (зеленый)

ших. AWGR действует как последовательный преобразователь в параллельный, за которым следует матрица фазовых сдвигов, что является именно тем, что используется в цифровой реализации ПФ. Полоса пропускания передатчика может быть искусственно увеличена за счет перегрузки модуляторов, что приводит к выравниванию сигналов, а полоса пропускания приемника может быть снижена за счет использования оптической дискретизации. AWGR также должен быть спроектирован таким образом, чтобы обеспечить достаточно равномерную передачу, независимо от того,

по какому пути проходит свет.

Исследуемая схема передатчика использует OFDM для мультиплексирования множества оптических сигналов, что является примечательной отличительной характеристикой. OFDM предлагает существенные преимущества с точки зрения высокой пропускной способности и эффективности спектра. Отличительная особенность заключается в возможности интегрировать все оптические элементы — такие как лазеры, модуляторы, волноводы и решетки — в единую интегральную схему.

- [1] Листвин В.Н., Трещиков В.Н. DWDM системы: научное издание // Издательский Дом «Наука». 2021. С. 420.
- [2] Фокин В.Г., Ибрагимов Р.З. Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи: Учебное пособие / Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики; каф. многоканальной электросвязи и оптических систем. Новосибирск, 2020. С. 180.
- [3] Фокин В.Г. Когерентные оптические сети: Учебное пособие / Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики; каф. многоканальной электросвязи и оптических систем. Новосибирск, 2016. С. 440.
- [4] Кукунин Д.С., Березкин А.А., Киричек Р.В. и др. //

- Электросвязь. № 1. 26 (2023).
- [5] Поповский Н.И. // Электросвязь. № 5. 27 (2023).
- [6] Поповский Н.И., Давыдов В.В., Рудь В.Ю. // Научно-технические ведомости СПбГПУ: Физико-математические науки. **15**. № 3.2. 178 (2022).
- [7] Поповский Н.И., Давыдов В.В., Рудь В.Ю. // Научно-технические ведомости СПбГПУ: Физико-математические науки. **16**. № 3.2. 81 (2023).
- [8] Сперанский В.С., Абрамов С.В., Клинцов О.И. // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. **13**. № 3. 32 (2019).
- [9] Сперанский В.С., Клинцов О.И. // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. № 10. 138 (2013).
- [10] Франчук О.С. Сравнительный анализ оптических сетей и гибких оптических сетей E-SCIO. № 4 (79) 91 (2023).

Development of OFDM optical signal transceiver based on AWGR

N.I. Popovskiy^{1,a}, V.V. Davydov^{2,b}

¹The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications
Saint Petersburg, 195323, Russia

²Saint Petersburg State Polytechnic University Peter the Great

Saint Petersburg, 195251, Russia
E-mail: ^anikitanikita24@mail.ru, ^bdavydov_vadim66@mail.ru

In fiber-optic networks, an increase in the channel speed while maintaining one carrier encounters the problem of a sharp reduction in the transmission distance without regeneration. The need to build additional reinforcement points leads to an increase in the cost of communication systems. The optimal solution to preserve the transmission range and increase the channel speed is the use of multiple carrier frequencies in one combined channel, which is commonly called a superchannel. One of the possible ways to form a superchannel is OFDM. Since the inverse Fourier transform is topologically identical to the Fourier transform, AWGR can be used as an OFDM signal multiplexer in the transmitter. The device of a transceiver is being investigated, which will work as a multiplexer of several input optical channels and a transmitter of one common superchannel into a communication channel.

PACS: 42.79.Hp

Keywords: fiber-optic communication systems, orthogonal frequency-division multiplexing, optical networks, dense wavelength division multiplexing.

Received 09 June 2024.

Сведения об авторах

1. Поповский Никита Игоревич — аспирант; e-mail: nikitanikita24@mail.ru.
2. Давыдов Вадим Владимирович — доктор физ.-мат. наук, профессор, преподаватель; e-mail: davydov_vadim66@mail.ru.