

**УДК 654.02**

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ МОДУЛЯЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ НЕСУЩЕЙ В СИСТЕМАХ DWDM

Чеснокова Наталья Николаевна

магистрант группы МИТЕ-91з, факультет «Инфокоммуникаций, информатики и управления» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в г. Екатеринбурге

Аннотация

В работе рассматривается моделирование многопозиционной модуляции оптической несущей в системах DWDM. В программе OptiSystem получены результаты моделирования форматов модуляции: PSK, QAM и OFDM. Результаты представлены в виде спектрограмм, I/Q диаграммы и графиков зависимости BER (OSNR). Данное исследование направлено на анализ развития систем DWDM с точки зрения увеличения пропускной способности.

Ключевые слова: многоуровневая модуляция, САПР OptiSystem, технология DWDM.

INVESTIGATION OF MULTI-POSITION MODULATION OF AN OPTICAL CARRIER IN DWDM SYSTEMS

Natalia N. Chesnokova

Master's student of the MITE-91z group, Faculty of "Infocommunications, Informatics and Management" Ural Technical Institute of Communications and Informatics (branch) of the Federal State Budgetary Educational institution of Higher Education "Siberian State University of Telecommunications and Informatics" in Yekaterinburg

ABSTRACT

The paper considers the modeling of multi-position modulation of an optical carrier in DWDM systems. In the OptiSystem program, the results of modeling the modulation formats: PSK, QAM and OFDM are obtained. The results are presented in the form of spectrograms, I/Q diagrams and graphs of the BER (OSNR) dependence. This study is aimed at analyzing the development of DWDM systems in terms of increasing throughput.

Keywords: multilevel modulation, OptiSystem CAD, DWDM technology.

Введение

Изучая и анализируя научно-исследовательские работы по каждому отдельному формату многоуровневой модуляции оптической несущей DWDM канала, были рассмотрены и проанализированы алгоритмы (схемы) формирования следующих форматов модуляции [1-13]:

- многоуровневая амплитудная модуляция M-ASK;
- многоуровневая фазовая модуляция P-ASK;
- гибридная, амплитудно-фазовая модуляция, в частности модуляция M-QAM (квадратурная амплитудная модуляция);
- модуляция OOFDM;
- гибридные форматы многоуровневых модуляций с поляризационным мультиплексированием (DP или PM).

Используя Интернет-ресурс компаний, которые занимаются производством современного оборудования DWDM (например, компания T8 (www.t8.ru), компания Huawei (www.huawei.ru)), и производя анализа технических характеристик DWDM оборудования в рамках типа модуляции оптической несущей, можно выделить две разновидности многоуровневой модуляции: M-PSK, а именно DPSK/QPSK/DQPSK и QAM.

Стоит отметить, что в чистом виде форматы модуляции M-PSK и QAM на практике не применяются, они применяются совместно с поляризационным мультиплексированием (PM или DP, в литературе обозначают по-разному), что в свою очередь сказывается на увеличении пропускной способности системы DWDM, на упрощение процедуры детектирования (демодуляции) и уменьшения коэффициента ошибок за счет меньшее число организуемых уровней модуляций. Так, можно выделить следующие многоуровневые форматы модуляции с гибридным поляризационным мультиплексированием: PM-DQPSK, PM-QPSK, PM-QAM.

Кроме этих сложных форматов модуляции, в научно-исследовательских работах достаточно часто встречаются работы с тематикой касающейся модуляции OOFDM, PM-OOFDM.

Из рассмотренного списка многоуровневых форматов модуляции оптической несущей DWDM канала, выделяют наиболее перспективные форматы модуляции, такие как DP-QPSK (PM-QPSK) DP-QAM (PM-QAM), а также M-ASK. Однако, формат модуляции M-ASK в сравнении с P-ASK или M-QAM или OOFDM обладает наименьшей помехозащищенностью, и широкого примирения на практике не получил.

В анализируемых научно-исследовательских работах не рассматриваются вопросы совокупного сравнения между собой этих форматов модуляции. Именно по этой причине, основной целью научной работы является совокупное исследование современных форматов модуляции оптической несущей в системах DWDM.

Постановка задачи для моделирования

Исследования многоуровневых форматов модуляции целесообразно проводить при помощи моделирования в САПР OptiSystem. Для этого следует выполнить ряд условий.

1. Моделирование следует провести не всей системы DWDM в целом, а отдельного оптического канала DWDM.
2. Сравнительный анализ форматов модуляции целесообразно провести путем сопоставления коэффициента ошибок, глаз-диаграмм и I/Q-диаграмм в зависимости от параметра OSNR.
3. Учитывая то, что системы DWDM применяются для организации магистральных линий связи, целесообразно взять среднее значение – 80 км.
4. Сравнительный анализ форматов модуляции следует провести для однотипной

ВОЛС, представляющей собой несколько (усилительных) участков равной длиной (80 км), с однотипными параметрами оптоволокна: километрическое затухание в третьем окне прозрачности следует взять 0,2 дБ/км, тип волокна ITU-T G.652, коэффициент усиления усилителя следует принять равным величине вносимых потерь усилительного участка, мощность спонтанных шумов следует принять равным значению 4 дБ [1-3].

5. В качестве рабочей длины волны оптического канала DWDM целесообразно взять стандартную длину волны 1550 нм, по причине того, что километрическое затухание для всех каналов DWDM в третьем окне прозрачности волокна ITU-T G.652 в среднем составляет 0,2 дБ/км.

Результаты моделирования канала DWDM с модуляцией DP-QPSK

На рисунке 1 представлена разработанная блок-схема модели канала DWDM с модуляцией DP-QPSK. В блок-схеме модели канала DWDM с модуляцией DP-QPSK задействованы готовые приемо-передающие блоки DP-QPSK сигнала. Для правильной работы блок-схемы, в блоках DSP и Decision нужно выставить параметр обработки сигнала с двойной поляризацией.

На рисунке 2 представлены I/Q диаграммы, а на рисунке 3 представлена зависимость BER от OSNR для DP-QPSK сигнала в процессе моделирования в САПР OptiSystem.

Таким образом, можно говорить о том, что дальность связи для канала DWDM с модуляцией DP-QPSK и битовой скоростью 100 Гбит/с, эквивалентна 640 км, что сравнимо с дальностью связи для модуляции QPSK.

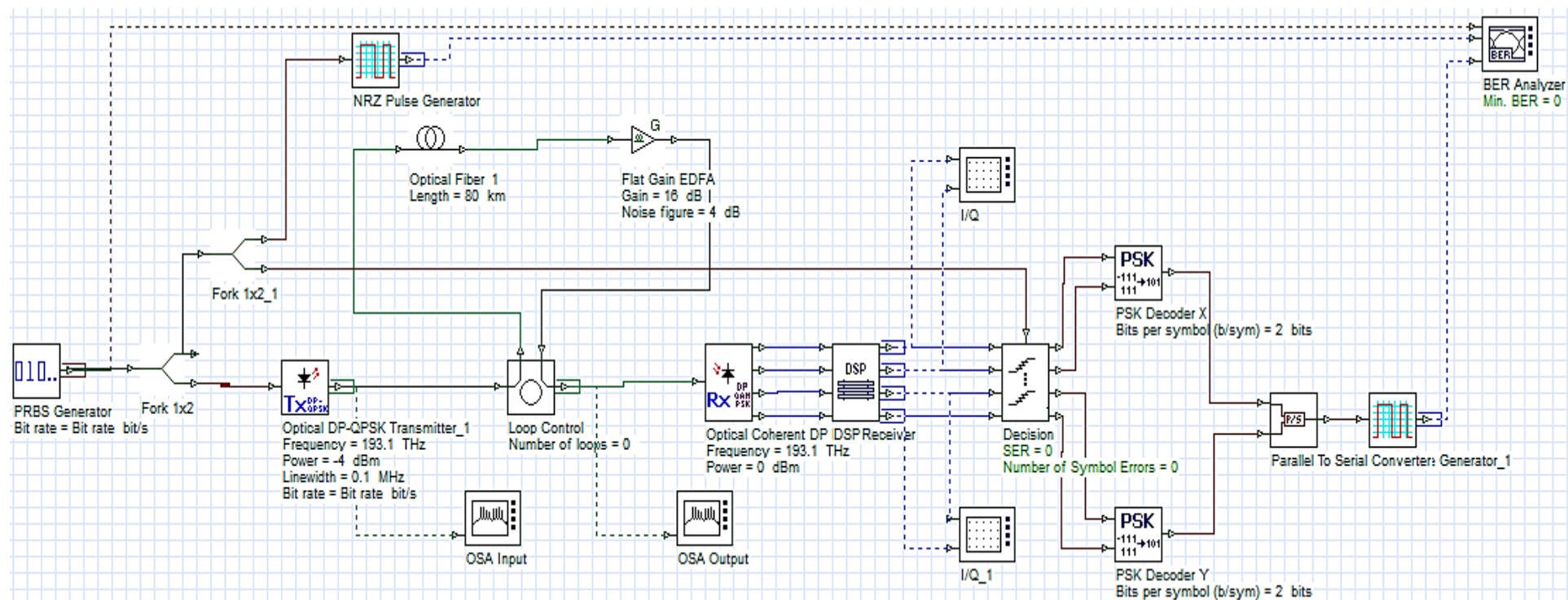
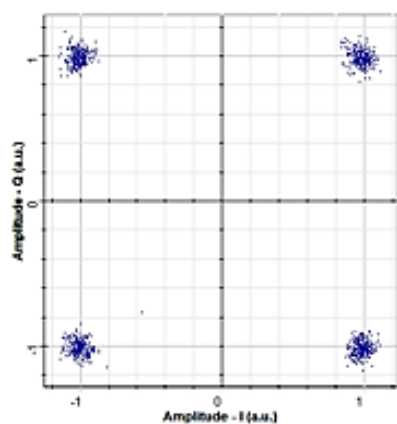
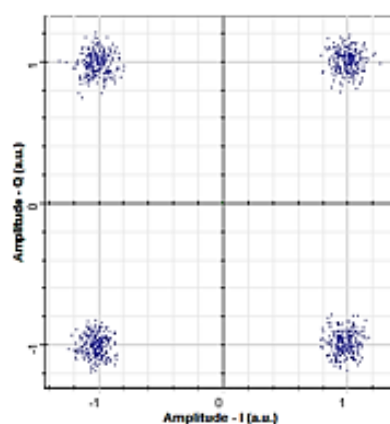


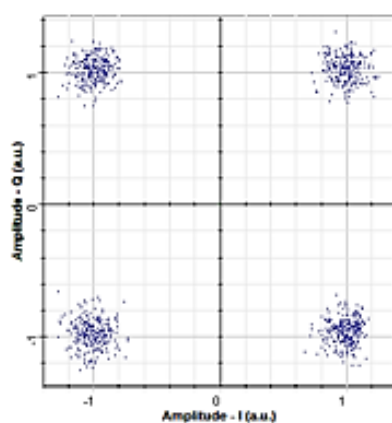
Рисунок 1. Блок-схема модели канала DWDM с модуляцией DP-QPSK



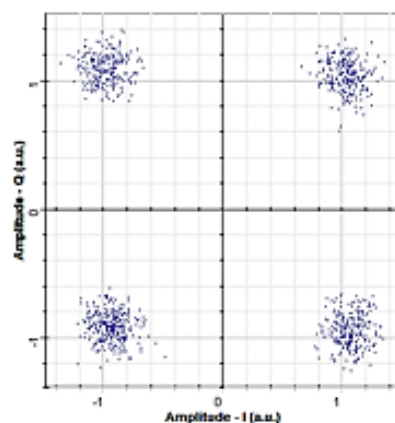
ВОЛС протяжённостью 80 км



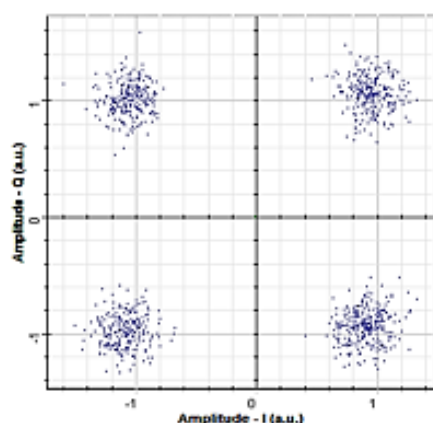
ВОЛС протяжённостью 160 км



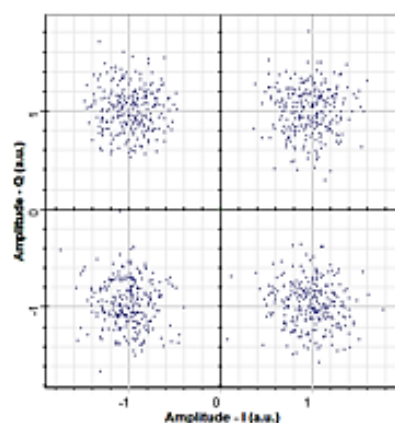
ВОЛС протяжённостью 320 км



ВОЛС протяжённостью 480 км



ВОЛС протяжённостью 640 км



ВОЛС протяжённостью 720 км

Рисунок 2. I/Q-диаграммы DP-QPSK сигнала

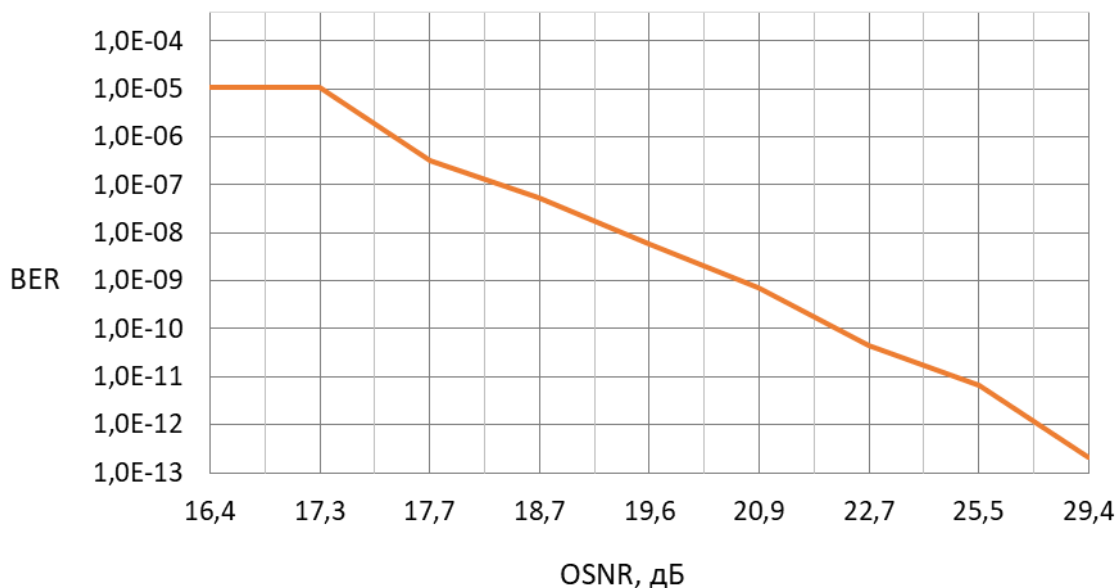


Рисунок 3. Зависимость BER от OSNR для модуляции DP-QPSK

Результаты моделирования канала DWDM с модуляцией DP-16QAM

На рисунке 4 представлена разработанная блок-схема модели канала DWDM с модуляцией DP-16QAM.

Результаты моделирования канала DWDM с модуляцией DP-16QAM представлены в виде I/Q диаграммы в зависимости от количество усилительных участков (длины ВОЛС), которые представлены на рисунке 5.

Также для модуляции DP-16QAM были получен график зависимости BER от OSNR (рисунок 6). Стоит отметить тот факт, что полученные результаты моделирования были зафиксированы при условиях: битовая скорость передаваемых данных составляла 100 Гбит/с; параметры хроматической дисперсии волокна был равен 18 пс/нм/км.

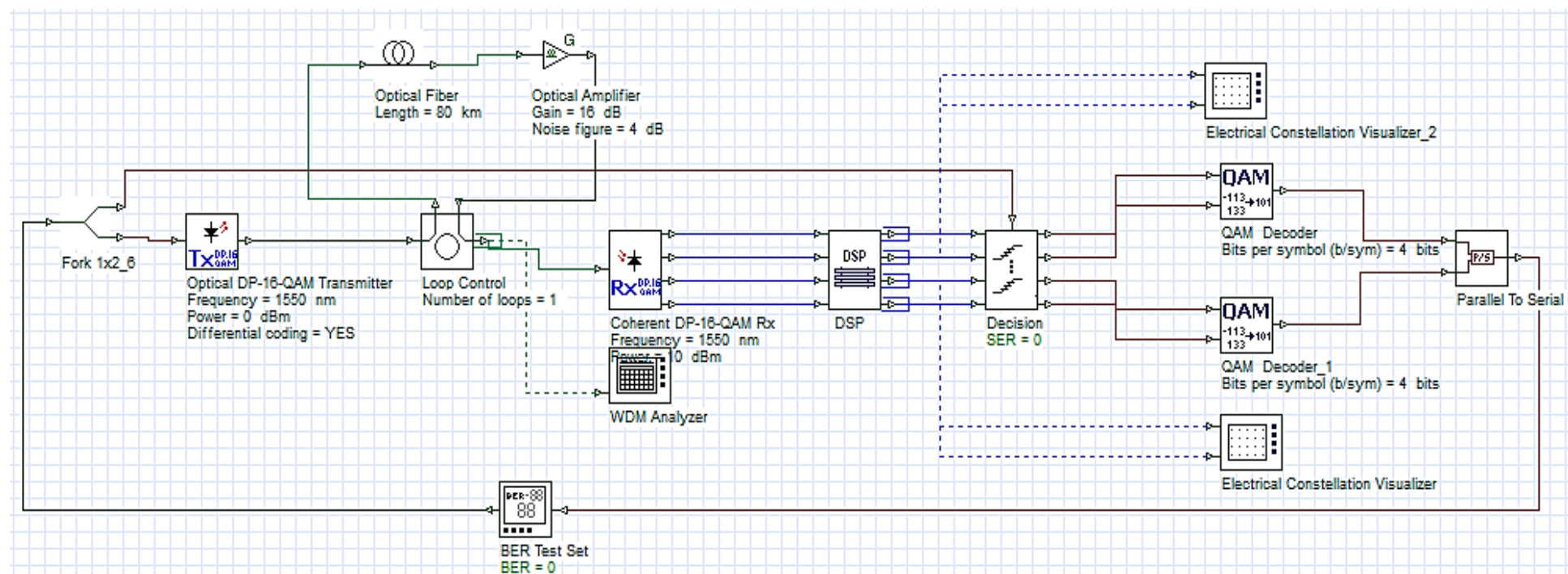
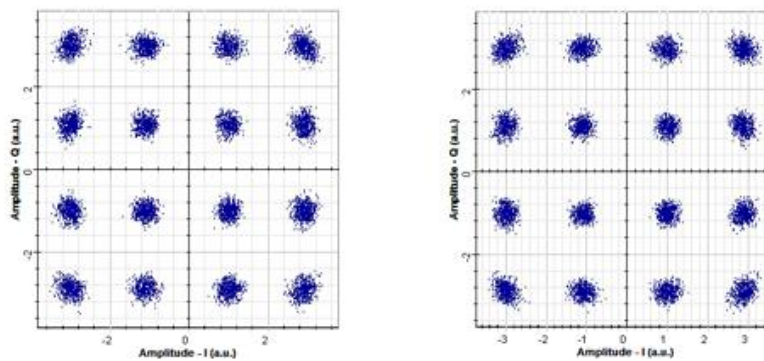
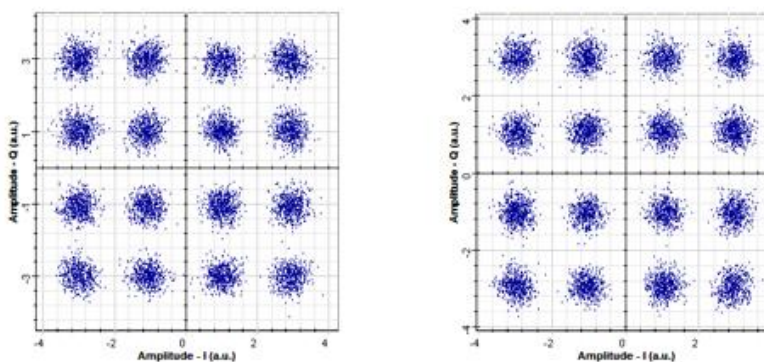


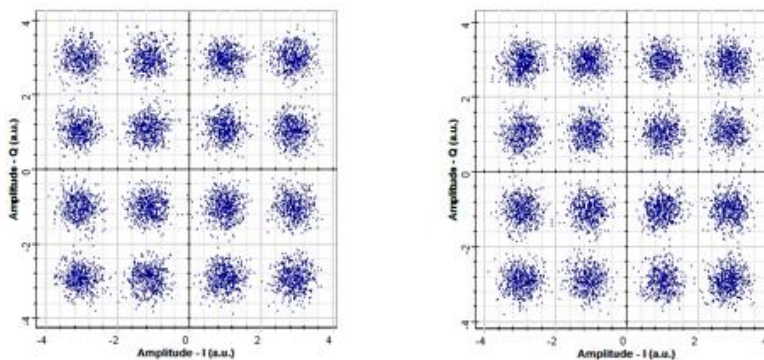
Рисунок 4. Блок-схема модели канала DWDM с модуляцией DP-16QAM



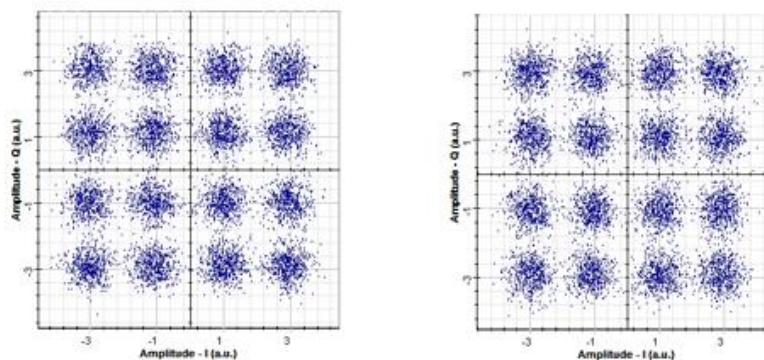
I/Q диаграмма для ВОЛС протяжённостью 80км



I/Q диаграмма для ВОЛС протяжённостью 160км



I/Q диаграмма для ВОЛС протяжённостью 240км



I/Q диаграмма для ВОЛС протяжённостью 320км

Рисунок 5. I/Q-диаграммы сигнала DP-16QAM

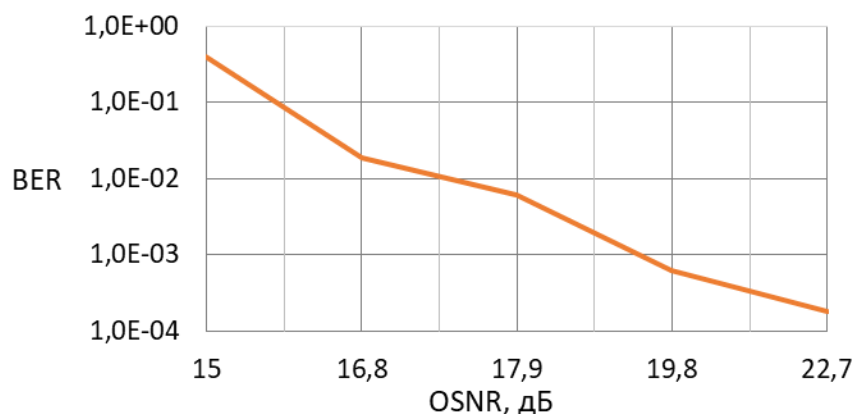


Рисунок 6. Зависимость BER от OSNR для модуляции DP-16QAM

Сравнивая численные значения зависимости BER от OSNR с I/Q диаграммами, численные значения BER не коррелируемы со степенью «размытости» каждого созвездия. Обусловлен это прежде всего плотностью расположения созвездий. Но, визуальный анализ созвездий говорит о том, что для ВОЛС протяженностью 400 км коэффициент ошибок находится на грани с максимально допустимым коэффициентом ошибок.

Можно предположить, что при использовании на линии компенсаторов дисперсии, на приеме применить электронную компенсации дисперсии, и исходя из анализа I/Q диаграмм, дальность связи в системах DWDM с форматом модуляции DP-16QAM и битовой скоростью канала DWDM 100 Гбит/с может достигать 400 км.

Результаты моделирования канала DWDM с модуляцией OOFDM

Принцип генерации оптического сигнала с модуляцией формата OOFDM схож с принципом генерации оптического сигнала с модуляцией формата QAM. Разница заключается только в алгоритме формирования электрического сигнала подаваемого на модулятор IMZ.

На рисунке 7 представлена блок-схема модели канала DWDM с модуляцией OFDM. В основе формирования OOFDM сигнала лежит модуляция 4-QAM.

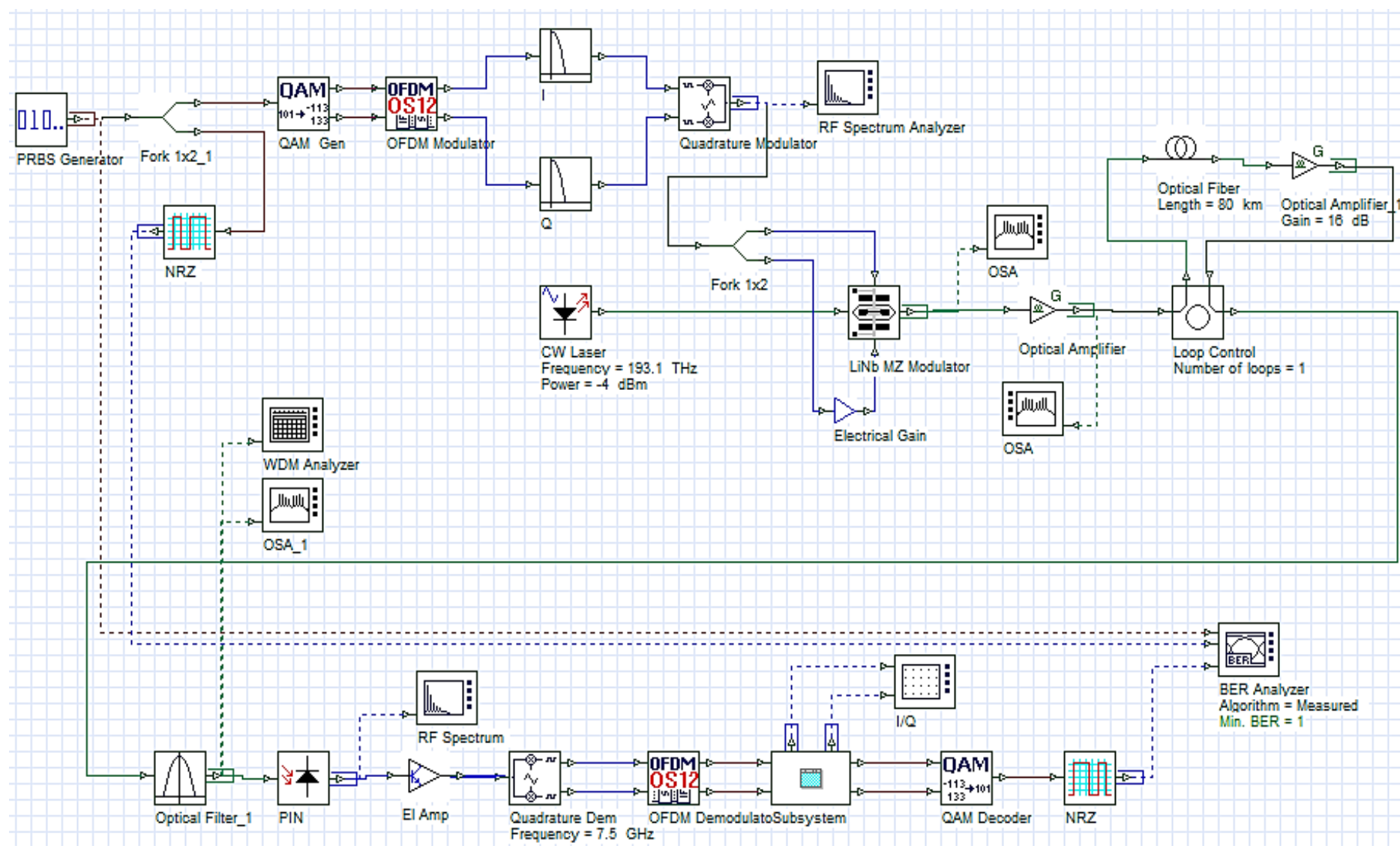


Рисунок 7. Блок-схема модели канала DWDM с модуляцией OOFDM

Как показали результаты моделирования, максимальная дальность связи для системы DWDM с модуляцией OOFDM не превышает 80 км, что подтверждается полученными I/Q диаграммами, представленными на рисунке 8. Из визуального анализа созвездий, видно некое «вращение» по часовой стрелке, что ведет к росту ошибок на приеме в процессе детектирования фазы сигнала.

Эти результаты получены для ВОЛС, в которой дисперсионный хроматический параметр равен нулю. Наличии хроматической дисперсии в оптоволокне приводит к невозможности последующей обработке электрического сигнала OFDM, поскольку на выходе фотодетектора наблюдается сильное искажение спектра. Решением этих проблем является применение компенсаторов дисперсии и настройки полосы пропускания оптического фильтра. Опытным путем, для линии протяженностью 80 км, было выявлено, что, увеличение ширины пропускания фильтра на 5 ГГц не влияет на искажение спектра сигнала на выходе фотодиода. Все это ведет к сложности реализации систем DWDM с модуляцией OOFDM.

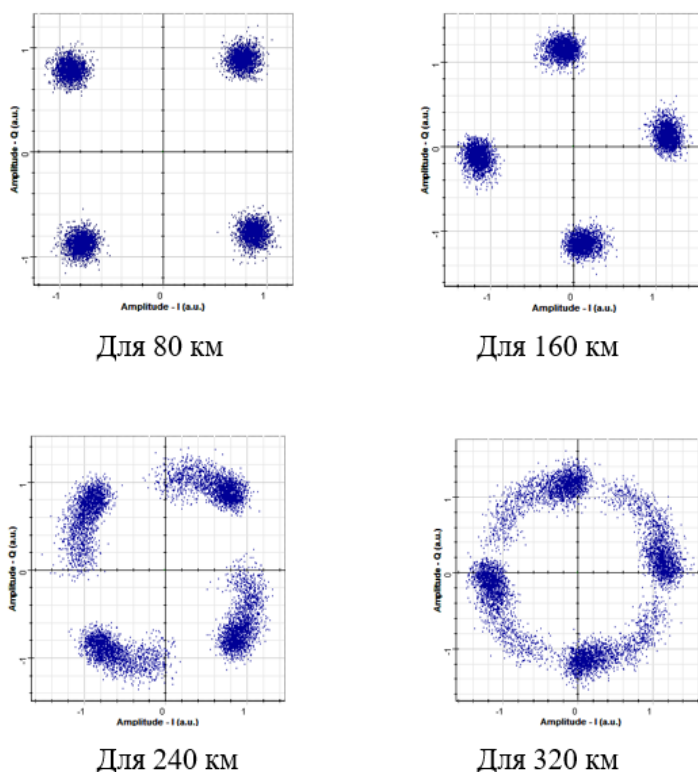


Рисунок 8. I/Q диаграммы канала DWDM с модуляцией OOFDM

Заключение

Моделирование многоуровневых форматов модуляции оптической несущей канала DWDM в САПР OptiSystem показало не однозначный результат. Обуславливается это прежде всего установленными условиями в постановке задач для моделирования и аппаратными возможностями компьютера, от которых зависит время, отводимое на моделирование.

Для получения прозрачных результатов, моделирование следует проводить

многократные этапы моделирования для различных вариаций структурных схем ВОЛС, для различных параметров оптоволоконной, параметров передатчика и приемника, для полноценной архитектуры сети DWDM.

Несмотря на это, для поставленных условий моделирования полученные результаты в виде графиков зависимости BER(OSNR), спектрограмм и I/Q диаграмм, показали положительные результаты, характер которых имеет сходство с аналитическими и теоретическими аспектами в области многоуровневой модуляции [4-13].

Также дополнительно были смоделированы форматы каналов DWDM с модуляцией 4-ASK, DQPSK, QPSK, DP-32QAM, OOFDM-16QAM. Анализируя и сравнивая графики зависимости BER(OSNR), характер I/Q диаграмм для рассмотренных форматов модуляции можно говорить о том, что для обеспечения требуемого качества связи, а именно коэффициента ошибок на приеме не хуже, чем 10^{-10} [14], необходимо применять оптические усилители как на передаче и приеме, так и на линейном участке ВОЛС, и необходимо применять компенсаторы дисперсии как на оптическом, так и на электрическом уровне. Наиболее перспективными форматами модуляции являются форматы класса DP-M-PSK и DP-M-QAM. Эти форматы модуляции более устойчивы к дисперсионным потерям, что обеспечивает дальность связи до 600 км.

Что касается формат модуляции OOFDM, этот тип модуляции на практике не применяются по следующим причинам:

- затруднителен процесс организации ввода-вывода оптических каналов в промежуточных пунктах по причине физических особенностей работы мультиплексора ROADM;

- отсутствие совместимости с 10 и 40 гигабитными системами DWDM, что говорит об отсутствии такой положительной характеристики системы DWDM, как «гибкость».

Список литературы

1. Фокин В.Г. Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.Г. Фокин, Р.З. Ибрагимов. – Электрон. текстовые данные. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2016. – 156 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/54790.html>
2. Листвин В.Н., Трещиков В.Н. DWDM системы: научное издание. – М.: Издательский Дом «Наука», 2013. – 300 с.
3. Татаркина О.А. Волоконно-оптические системы передачи: Конспект лекций/О.А. Татаркина. – Екатеринбург: УрТИСИ ГОУ ВПО «СибГУТИ», 2008. – 160 с.
4. Величко М.А., Наний О.Е., Сусьян А.А. Новые форматы модуляции в оптических системах связи. - [Электронный ресурс]. LIGHTWAVE Russian Edition. – 2005. – №4. – С.21-36. – Режим доступа: <https://t8.ru/wp-content/uploads/2012/01/20.pdf>
5. Gurkin N.V., Nanii O.E., Novikov A.G., Plaksin S.O., Treshchikov V.N., Ubaidullaev R.R. Nonlinear interference noise in 100-Gbit/s communication lines with the DP-QPSK modulation format. – [Электронный ресурс]. Quantum Electron. – 2013. – 43(6). – Pp. 550-553. – Режим доступа: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84879816435&origin=inward&txGid=34cf6aafa58cff7dc955c2d0df2d9f4d>
6. Леонов А., Наний О., Трещиков В. Совершенствование форматов модуляции в оптических системах связи DWDM. – [Электронный ресурс]. Первая миля. - 2019. – №8. – С.30-36. – Режим доступа: <https://t8.ru/wp-content/uploads/2020/01/IMPROVEMENT-OF-MODULATION-FORMATS.pdf>

7. Наний О.Е., Трещиков В.Н. Анализ форматов модуляции для систем DWDM со скоростью 40 Гбит/с. – [Электронный ресурс]. Вестник связи. – 2012. – №1. – С.35-38. – Режим доступа: <https://t8.ru/wp-content/uploads/2012/05/V-S-01-12.pdf>
8. Наний О.Е., Трещиков В.Н. Форматы модуляции для оптических DWDM систем связи с канальной скоростью 40 и 100 Гбит/с. – [Электронный ресурс]. T-Comm. – 2011. – №8. – С.76-78. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/formaty-modulyatsii-dlya-opticheskikh-dwdm-sistem-svyazi-s-kanalnoy-skorostyu-40-i-100-gbit-s/viewer>
9. Cheng M., Cheng-Ting Tsai and Lin G. Master-to-slave injection-locked WRC-FPLD pair with 16 DWDM-PON channels for 16-QAM OFDM transmission. – [Электронный ресурс]. OFC 2014, San Francisco, CA. – 2014. – Pp. 1-3. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6886904>
10. AbdulNasser A. Abbood and Hamed S. Bidirectional DWDM-RoF System Employing 16QAM-OFDM Downstream Signal and Optical Carrier Reuse for Upstream Transmission. – [Электронный ресурс]. Journal of Communications. – 2018. – Vol. 13, № 5. – Pp. 247-252. – Режим доступа: <http://www.jocm.us/uploadfile/2018/0515/20180515055043442.pdf>
11. Jagana Bihari Padhy and Bijayananda Patnaik. CO-OFDM and DP-QPSK Based DWDM Optical Wireless Communication System. – [Электронный ресурс]. Journal of Optical Communications. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1515/joc-2018-0072>
12. Min-Chi Cheng, Cheng-Ting Tsai, Yu-Chieh Chi, and Gong-Ru Lin. Direct QAM-OFDM Encoding of an L-band Master-to-Slave Injection-Locked WRC-FPLD Pair for 28 × 20 Gb/s DWDM-PON Transmission. – [Электронный ресурс]. – Lightwave Technol. – 2014. – Pp. 2981-2988. – Режим доступа: <https://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-32-17-2981>
13. Zhiqi Hu and Jianxin Ma. Misaligned optic carrier polarization division multiplexing SSB-OFDM system based on a beat interference cancellation receiver. – [Электронный ресурс]. OSA Continuum. – 2019. – Vol. 2, Issue 10. – Pp. 2935-2947. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1364/OSAC.2.002935>
14. Рекомендация ITU-T G.696.1 (07/2010). Series G: Transmission systems and media, digital systems and networks. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.696.1-201007-1>

References

1. Fokin V. G. Optical systems with terabit and petabit transmission speeds [Electronic resource]: textbook / V. G. Fokin, R. Z. Ibragimov. - Electron. text data. - Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics, 2016. – P.156. – Access mode: <http://www.iprbookshop.ru/54790.html>
2. Listvin V. N., Treschikov V. N. DWDM systems: scientific edition. - Moscow: Publishing House "Nauka". – 2013. – P.300.
3. Tatarkina O. A. Fiber-optic transmission systems: Lecture notes/O. A. Tatarkina. – Yekaterinburg: UrTISI GOU VPO "SibGUTI", 2008. – P.160
4. Velichko M. A., Naniy O. E., Susyan A. A. New modulation formats in optical communication systems. – [Electronic resource]. – LIGHTWAVE Russian Edition. – 2005. – No. 4. – Pp. 21-36. – Access mode: <https://t8.ru/wp-content/uploads/2012/01/20.pdf>
5. Gurkin N.V., Naniy O.E., Novikov A.G., Plaksin S.O., Treshchikov V.N., Ubaidullaev R.R. Nonlinear interference noise in 100-Gbit/s communication lines with the DP-QPSK modulation format. – [Electronic resource]. Quantum Electron. – 2013. – 43(6). – Pp. 550-

- 553 - Access mode: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84879816435&origin=inward&txGid=34cf6aafa58cff7dc955c2d0df2d9f4d>
6. Leonov A., Naniy O., Treschikov V. Improvement of modulation formats in optical communication systems DWDM. - [Electronic resource]. The first mile. - 2019. - No. 8. - Pp. 30-36. - Access mode: <https://t8.ru/wp-content/uploads/2020/01/IMPROVEMENT-OF-MODULATION-FORMATS.pdf>
 7. Naniy O. E., Treschikov V. N. Analysis of modulation formats for DWDM systems with a speed of 40 Gbit / s - [Electronic resource]. Bulletin of Communications. - 2012. - No. 1. - Pp. 35-38. - Access mode: <https://t8.ru/wp-content/uploads/2012/05/V-S-01-12.pdf>
 8. Naniy O. E., Treschikov V. N. Modulation formats for optical DWDM communication systems with channel speeds of 40 and 100 Gbit / s - [Electronic resource]. - T-Comm. - 2011. - No. 8. - Pp. 76-78. - Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/formaty-modulyatsii-dlya-opticheskikh-dwdm-sistem-svyazi-s-kanalnoy-skorostyu-40-i-100-gbit-s/viewer>
 9. Cheng M., Cheng-Ting Tsai and Lin G. Master-to-slave injection-locked WRC-FPLD pair with 16 DWDM-PON channels for 16-QAM OFDM transmission. - [Electronic resource]. OFC 2014, San Francisco, CA. - 2014. - Pp. 1-3. - Access mode: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6886904>
 10. AbdulNasser A. Abbood and Hamed S. Bidirectional DWDM-RoF System Employing 16QAM-OFDM Downstream Signal and Optical Carrier Reuse for Upstream Transmission. - [Electronic resource]. Journal of Communications. - 2018. - Vol. 13, No. 5 - Pp. 247-252. - Access mode: <http://www.jocm.us/uploadfile/2018/0515/20180515055043442.pdf>
 11. Jagana Bihari Padhy and Bijayananda Patnaik. CO-OFDM and DP-QPSK Based DWDM Optical Wireless Communication System. - [Electronic resource]. Journal of Optical Communications. - Access mode: <https://doi.org/10.1515/joc-2018-0072>
 12. Min-Chi Cheng, Cheng-Ting Tsai, Yu-Chieh Chi, and Gong-Ru Lin. Direct QAM-OFDM Encoding of an L-band Master-to-Slave Injection-Locked WRC-FPLD Pair for 28 × 20 Gb/s DWDM-PON Transmission. - [Electronic resource]. Lightwave Technol. - 2014. - Pp. 2981-2988. - Access mode: <https://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-32-17-2981>
 13. Zhiqi Hu and Jianxin Ma. Misaligned optic carrier polarization division multiplexing SSB-OFDM system based on a beat interference cancellation receiver. - [Electronic resource]. OSA Continuum. - 2019. - Vol. 2, Issue 10 - Pp. 2935-2947 - Access mode: <https://doi.org/10.1364/OSAC.2.002935>
 14. Recommendation ITU-T G. 696. 1 (07/2010). Series G: Transmission systems and media, digital systems and networks. - [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.696.1-201007-1>