

На правах рукописи

РАБЕНАНДРАСАНА Жослен

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА ОКНО РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ХРОМАТИЧЕСКОЙ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МОДОВОЙ ДИСПЕРСИЙ
ПРИ ФАЗОВОЙ САМОМОДУЛЯЦИИ И ФАЗОВОЙ КРОСС-МОДУЛЯЦИИ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ПЕРЕДАЧИ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2021

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный руководитель: **Портнов Эдуард Львович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Направляющие телекоммуникационные среды» МТУСИ.

Официальные оппоненты: **Боев Михаил Андреевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Физика и технология электротехнических материалов и компонентов», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»);

Казанский Николай Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» ФГАОУ ВО "Российский университет транспорта" (РУТ (МИИТ)).

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт связи» (ФГУП ЦНИИС).

Защита состоится «10» июня 2021 г. в 15:00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.04 при МТУСИ по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд. А-448.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ (<http://www.srd-mtuci.ru/images/Dis-Rabenandrasana/dis-Rabenandrasana.pdf>).

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д.219.001.04, д.т.н., доцент

Терешонок Максим Валерьевич

Общая характеристика работы

Актуальность научного исследования. Внедрение технологии 5G, внедрение потокового видео сверхвысокой четкости, увеличение спроса на интернет вещей и растущий спрос на мультимедийные приложения требуют совершенствования глобальной коммуникационной инфраструктуры, способной обеспечить достаточную пропускную способность, в частности, повышение скорости передачи по оптическому волокну.

Увеличение скорости передачи при росте количества WDM-каналов приводит к увеличению плотности каналов и снижению расстояния между оптическими каналами. Увеличивается как хроматическая дисперсия, так и поляризационная модовая дисперсия при сильном воздействии нелинейных эффектов, особенно фазовой кросс-модуляции при фазовой самомодуляции, четырехволновом смешивании и других нелинейных эффектах. Такое воздействие препятствует дальнейшему увеличению дальности и скорости передачи по оптическому волокну (ОВ), что в свою очередь приводит к сжатию окна работоспособности волоконно-оптических систем передачи из-за сложности управления ими.

Впервые понятие «окно работоспособности» волоконной оптики было разработано Tkach R.W., Chraplyvy A.R.

Хроматическая дисперсия и поляризационная модовая дисперсия являются ограничивающими факторами при выборе регенерационного (усилительного) участка в оптическом канале со скоростью 40 Гбит/с и выше, тем более при наличии фазовой самомодуляции и кросс-модуляции. Таким образом, при повышении скорости передачи резко уменьшается длина усилительного или регенерационного участков вследствие увеличения эффекта как хроматической, так и поляризационной модовой дисперсии. Нелинейные эффекты могут вмешаться в этот процесс в случае увеличения пороговой мощности, при которой они воздействуют на передачу оптических сигналов при спектральном мультиплексировании и большой суммарной мощности, вводимой мощности в ОВ.

Рассмотрев и оценив эти явления, можно повысить эффективность оптического волокна при высокоскоростных системах передачи, и, следовательно, улучшить окно работоспособности ОВ.

Широкое применение ОВ на магистральной сети требует оптимальных решений по их выбору, в частности, G-652 и G-655, поэтому в данном диссертационном исследовании будут рассматриваться ОВ типа G-652, G-655 и волокно категории G.654.E ITU-T для поддержки высокоскоростной передачи при передаче больших мощностей.

Согласно исследованиям Зелюткова Е.А. и Грегорьяна А.К. главными факторами, влияющими на широкое использование в волоконно-оптических системах передачи со спектральным уплотнением при высокоскоростных передачах, являются:

- затухание;
- хроматическая дисперсия;
- поляризационная модовая дисперсия;
- нелинейные эффекты, в частности, нелинейные эффекты Керровского типа.

При переходе со скорости передачи 10 Гбит/с на скорость передачи 40 Гбит/с требование к отношению сигнал/шум (OSNR) увеличивается на 6 дБ, влияние поляризационной модовой дисперсии в 4 раза, а влияние хроматической дисперсии в 16 раз; увеличивается влияние нелинейных эффектов, таких как фазовая самомодуляция и кросс-модуляция. Для обеспечения перехода системы со скорости передачи 100 Гбит/с на скорость передачи 200 Гбит/с требуется дополнительное значение OSNR на 8-10 дБ.

При определении значения отношения сигнал/шум в электрическом и оптическом канале необходимо учитывать:

- потери по дисперсиям (хроматическая и поляризационная модовая дисперсии);
- наличие нелинейных эффектов;
- длину усилительного (регенерационного) участка;
- формат модуляции;
- выбор числа каналов и расстояния между ними в зависимости от скорости и систем передачи при DWDM (плотные WDM).

Степень разработанности научной проблемы. Исследование нелинейных эффектов в системах оптической связи появилось на основе теории нелинейной оптики, применяемой в волоконно-оптических системах передачи. Вопросы исследования в области нелинейной волоконной оптики рассматриваются в работах российских и зарубежных ученых: Портнова Э.Л., Андреева В.А., Бурдина В.А., Бурдина А.В., Леонова А.В., Воронина В.Г., Нания О.Е., Трещикова В.Н., Фокина В.Г., Ахманова С.А., Agrawal G.P., Kaminow I.P., Willner A., Kumar S., Killely R. I., Chomycz B., Cvijetic M., Djordjevic I.D., Lin Q., Ferreira M. S. F., Essiambre R. J., Bayvel P., Liga G., Tkach R. W. За последние 15 лет было опубликовано более 500 исследований по хроматической и поляризационной модовой дисперсиям и нелинейности.

Физические процессы, протекающие при распространении сигналов по оптическому волокну, рассматривались в работах Грауэра Дж., Agrawal G.P., Kaminow I.P., Girard A., Иванова А.Б., Убайдуллаева Р.Р., Листивина В.Н. и др.

В работах Зелюткова Е.А., Широкова М.А., Чернова В.О. было исследовано влияние хроматической дисперсии (CD) на искажение сигнала вследствие фазовой самомодуляции (SPM).

Результаты исследований совместного влияния поляризационной модовой дисперсии (PMD) и фазовой кросс-модуляции (XPM) на искажение сигнала было приведено в работах Р. Хосровани, Кутлюярова Р.В., Menyuk C.R., Q. Lin.

В работах Kaminow I.P., Willner A. E., Zhongqi P., Changyuan Y., Peterson M.N., Faruk S., Meflah L., Dong Z., Khan F.N., Yu Y., Mateo R.V. и других исследователей были описаны способы улучшения окна работоспособности на основе методов мониторинга оптических характеристик (OPM – Optical Performance Monitoring) на физическом уровне. Эти методы дают возможность управлять оптическими искажениями.

В работах Фримана Р., Портнова Э.Л., Иванова А.Б., Зелюткова Е.А., Грегорьяна А.К., Чернова В.О. разработан ряд методик для определения регенерационных (усилительных) участков и оптического отношения сигнал/шум. Однако не уточнены следующие решения при высокоскоростных WDM-системах передачи:

- оценки, связанные с совместным влиянием CD, PMD при сильном воздействии SPM и XPM и методы их компенсации;
- решения по определению дисперсионной длины и длины регенерационного (усилительного) участка с учетом этих эффектов;
- решения, связанные с определением отношения сигнал/шум при наличии нелинейных эффектов, таких как SPM, XPM.

Известно, что в ряде исследований нелинейные эффекты в ОВ достаточно хорошо проанализированы и изучены, однако при построении многоволновых систем передачи необходимо учитывать ряд механизмов возникновения нелинейных эффектов во взаимосвязи с форматами оптического сигнала, CD и PMD, что является одной из перспективных направлений исследования.

Таким образом, при современном проектировании высокоскоростной передачи по ОВ необходимо рассматривать совместное воздействие CD и PMD при фазовой самомодуляции и кросс-модуляции на ухудшение оптического сигнала и выработать оптимальные решения улучшения окна работоспособности с учётом влияния линейных и нелинейных эффектов при большом числе WDM-каналов.

Объектом исследования является высокоскоростная WDM-система передачи при плотном канальном трафике, прямом и когерентном детектировании.

Предметом исследования является оценка влияния линейных и нелинейных эффектов, возникающих при распространении сигнала по

оптическому волокну и приводящих к сжатию окна работоспособности. В качестве среды передачи используются оптические волокна G.652, G.655 и волокно TXFTM Corning G.654.E.

Цель и задача научного исследования. Целью данного научного исследования является уменьшение влияния хроматической и поляризационной модовой дисперсий при сильном воздействии фазовой самомодуляции и кросс-модуляции.

Для достижения поставленной цели в диссертационном исследовании решается **научная задача** разработки новых подходов оценки совместного влияния CD, PMD при сильном воздействии SPM и XPM, позволяющих найти эффективное, оптимальное решение улучшения характеристик оптического волокна и систем передачи.

Для выполнения научной задачи и достижения поставленной цели диссертационного исследования в работе выдвинуты и решены следующие **частные научные задачи**:

1. Определение внутриканальных и межканальных нелинейных эффектов.
2. Уточнение влияния на окно работоспособности одномодовых оптических волокон в WDM-системах дисперсионной длины с учетом увеличения числа каналов, скорости передачи, методов модуляции, CD, PMD, нелинейных воздействий, изменения мощности и значения отношения сигнал/шум.
3. Разработка метода расчёта влияния CD и PMD при воздействии SPM и XPM на дисперсионную длину.
4. Выбор оптического волокна для уменьшения воздействия SPM и XPM.
5. Разработка метода решения по компенсации CD и PMD при наличии SPM и XPM, принятая для оптического выбранного волокна, которая уменьшает их влияния.
6. Разработка оптимального решения с учетом влияния CD и PMD при наличии нелинейных эффектов при большом числе WDM-каналов и современных форматах модуляции по выбранному оптическому волокну.

Новизна исследования заключается в следующем:

1. Получена новая аналитическая методика оценки изменения окна работоспособности, отличающаяся от других существующих исследований, учитывающая совместное воздействие хроматической и поляризационной модовой дисперсий при сильном воздействии фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции при плотном канальном трафике.
2. Впервые получена новая методика определения дисперсионной длины и потерь мощности под действием CD и PMD с учетом фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции, позволяющая оценить изменения окна работоспособности на основе потерь мощности.

3. Получены решения, связанные с компенсацией линейных и нелинейных эффектов, которые дают возможность эффективно стабилизировать изменения окна работоспособности благодаря уменьшению потерь мощности при высокоскоростных WDM-системах передачи с ростом скорости передачи.
4. Получены решения, связанные с определением отношения сигнал/шум и регенерационного (усилительного) участка с учетом полученных методик по компенсации линейных и нелинейных эффектов, отличающиеся от методики ITU-T G.692, позволяющие точно определить коэффициент битовых ошибок.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость работы заключается в исследовании особенности влияния хроматической дисперсии и поляризационной модовой дисперсии на передачу сигналов и на качество передачи при наличии фазовой самомодуляции и кросс-модуляции, которые также угрожают закрытию окна работоспособности волоконно-оптических систем передачи при увеличении скорости передачи.

Практическая значимость заключается в следующем:

1. Получены решения, связанные с оценкой влияния фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции в ухудшении сигнала по оптическому волокну при воздействии с линейными эффектами, такими как хроматическая дисперсия и поляризационная модовая дисперсия, определением отношения сигнала/шум и коэффициента битовых ошибок (BER), которые могут быть использованы при эксплуатации и проектировании наземных высокоскоростных WDM-систем передачи.
2. Доказана возможность получения дополнительного выигрыша 2-3 дБ по величине отношения сигнал/шум при применении волокна TXFTM Corning по сравнению с волокном SMF-28 ULL, и еще большего выигрыша по сравнению с другими одномодовыми волокнами, такими как G.652 и G.655.
3. Основные полученные результаты исследований внедрены в учебный процесс МТУСИ на кафедре «Направляющие телекоммуникационные среды» в курс лекций по дисциплинам «Волоконная оптика в телекоммуникациях» и «Проектирование, строительство и эксплуатация ВОЛС». Практическое применение результатов диссертационного исследования подтверждено соответствующим актом о внедрении.

Методология и методы исследования. При проведении научного исследования были использованы методы теорий оптических волноводов, нелинейной оптики, теории линий передачи, теории цифровой обработки сигналов, теории дифференциального и интегрального исчисления и численного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработанная методика определения дисперсионной длины мощности под действием хроматической и поляризационной модовой дисперсий с учетом фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции, а также систем передачи позволяет оценить изменение окна работоспособности на основе потерь мощности при повышении скорости передачи.
2. Разработанные решения, связанные с улучшением характеристик ОВ и систем передачи, дают возможность эффективно стабилизировать изменение окна работоспособности с учетом влияния хроматической и поляризационной модовой дисперсий при наличии SPM и XPM для наземных высокоскоростных WDM-систем передачи при прямом и когерентном детектировании. Компенсация CD и PMD позволяют уменьшить потери мощности в 10 раз.
3. Проведенное сравнение различных одномодовых оптических волокон, учитывающее передаточные характеристики ОВ и системы передачи, позволяет сделать правильный выбор типа оптического волокна с учетом нелинейных эффектов. Выбор волокна TXFTM Corning позволяет получить выигрыш 2-3 дБ по отношению сигнал/шум по сравнению с волокном SMF-28 ULL и еще больший по сравнению с другими волокнами, такими как G.652 и G.655.
4. Разработанные решения, связанные с определением отношения оптического отношения сигнал/шум с учетом компенсации хроматической и поляризационной модовой дисперсий и нелинейных эффектов в оптическом канале позволяют точно определить коэффициент битовых ошибок при высокоскоростных передачах для одномодовых оптических волокон.

Личный вклад. Все результаты, сформированные в основных положениях, выносимых на защиту, получены автором самостоятельно. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включена та их часть, которая получена соискателем лично.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационного исследования и отдельные его главы докладывались, обсуждались и были одобрены на следующих международных конференциях и форумах: Международная научно-техническая конференция «Телекоммуникационные и вычислительные системы – 2017, 2019 гг.» (МФИ-2017 и МФИ-2019), Москва, 2017, 2019 гг.; Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества – 2019, 2020 гг.», Москва, 2019, 2020 гг.; Международная научно-техническая конференция «Systems of signals generating and processing in the field of on board communications – 2020», Москва, 2020 г.

Публикация. Результаты диссертационного исследования опубликованы в ведущих рецензируемых научно-технических журналах, входящих в Перечень Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки РФ (4 работы), а также в материалах международных научно-технических конференций и форумов (7 работ), в том числе в издании, индексируемом в международной базе SCOPUS (2 работы). Всего опубликовано 11 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложения. Объем диссертации составляет 148 страниц. Материал диссертационного исследования иллюстрируется 46 рисунками и 26 таблицами. Список литературы содержит 152 наименования.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и приведен анализ современного состояния проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, показана теоретическая и практическая ценность диссертационной работы, приведены сведения об апробации результатов, публикациях, структуре и объеме работы.

В первом разделе диссертационного исследования основное внимание уделяется исследованию влияния линейных и нелинейных эффектов при распространении сигнала по оптическому волокну. В этом случае сложность передачи для оптических линий связи состоит в том, что распространение сигнала в волокне обычно моделируется нелинейным дифференциальным уравнением в частных производных, нелинейным уравнением Шредингера, где затухание, дисперсия волокна, нелинейности и шум усилителя искажают сигнал:

$$\frac{\partial E(z,t)}{\partial z} = i \underbrace{\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E(z,t)}{\partial t^2}}_{\text{Дисперсия}} - \underbrace{\frac{\alpha}{2} E(z,t)}_{\text{Затухание}} - i \underbrace{\gamma |E(z,t)|^2 E(z,t)}_{\text{Нелинейность}}, \quad (1)$$

где E – амплитуда поле, β_2 – дисперсия групповых скоростей (GVD – Group velocity dispersion), α – коэффициент затухание, z и t – направление и время распространения, соответственно и γ – нелинейный коэффициент.

С учетом уравнения Манаква и влияния SPM и XPM при WDM-передаче с поляризационным мультиплексированием уравнение (1) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{(x,y),j}}{\partial z} = & -\frac{\alpha}{2} E_{(x,y),j} + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E_{(x,y),j}}{\partial t^2} - i \frac{8}{9} \gamma \left(|E_{x,j}|^2 + |E_{y,j}|^2 \right) \\ & - i \frac{8}{9} \gamma \sum_{m \neq j}^M \left(|E_{x,m}|^2 + |E_{y,m}|^2 + E_{(y,x),m}^* E_{(x,y),m} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Фазовый сдвиг из-за воздействия SPM и XPM аналитически описывается как:

$$\Phi(z, t) = \frac{2\pi z}{\lambda} n = \frac{2\pi n_0}{\lambda} + \frac{2\pi n_2 z_{eff}}{\lambda A_{eff}} \left(\underbrace{|E_j|^2}_{SPM} + 2 \underbrace{\sum_{m \neq j}^M |E_m|^2}_{XPM} \right), \quad (3)$$

где $|E_j|^2$ – мощность j -го канала, $|E_m|^2$ – мощность соседних каналов, λ – рассматриваемая длина волны, A_{eff} – эффективная площадь моды, z_{eff} – эффективная длина, n_0 – линейный коэффициент преломления, n_2 – нелинейного коэффициента преломления.

Проведено исследование взаимодействия между импульсами внутри канала, приложенное поле E может быть разложено как сумма полей индивидуальных импульсов. В этой связи уравнение Шредингера, уравнение (1) может быть переписано следующим соотношением:

$$\sum_{l=1}^L \left(\frac{\partial E_l}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} E_l + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 E_l}{\partial t^2} \right) = i\gamma \sum_{l,k,m=1}^L E_l E_k E_m^* . \quad (4)$$

Внутриканальные нелинейности можно определить следующим образом: в случае $l=k=m$ соответствует SPM, если $l=m \neq k$ или $k=m \neq l$ для внутриканальной XPM, а в случае $l \neq k \neq m$ или $l=k \neq m$ для внутриканального FWM.

Результаты исследования показывают, что нелинейные эффекты в значительной степени зависят от параметров системы и ОВ, таких как вводимая мощность, дисперсионные свойства ОВ, эффективная площадь сердцевины, скорость передачи, число пролетов, количество каналов и шаг между оптическими WDM-каналами.

Во втором разделе рассмотрена оценка изменения окна работоспособности оптического волокна при наличии негативных воздействий. Скорость передачи передаваемого канала ограничена многими физическими факторами, которые можно описать понятием «окно работоспособности» оптического волокна.

Согласно предлагаемому окну работоспособности (рисунок 1) на передачу сигналов по оптическому волокну влияет большое значение различных параметров: битовая скорость, формат модуляции, суммарные мощности передаваемых сигналов, хроматическая дисперсия и поляризационная модовая дисперсия и нелинейности. Скорость передачи в одном канале можно повысить при увеличении числа каналов до 1000 по одному оптическому одномодовому волокну. При этом скорость в каждом канале не превысит 3,5 Гбит/с, а межканальный интервал уменьшится до 3,125 ГГц, что приведет к межканальным влияниям. Согласно рекомендациям G694.1 Международного союза электросвязи по телекоммуникациям при увеличении скорости передачи до 10 Гбит/с и выше

межканальный интервал не может быть меньше 6,25 ГГц, так как возрастают межканальные влияния, при 40 Гбит/с межканальный интервал может быть 100 ГГц.



Рисунок 1 – Сжатие окна работоспособности при усложнении систем: 1 – скорость передачи; 2 – формат модуляции; 3 – мощность; 4 – нелинейность; 5 – дисперсия; 6 – эффекты поляризации; 7 – число каналов

Любое изменение этих параметров приводит к увеличению или уменьшению окна работоспособности и отражается на дисперсионной длине, и следовательно, оказывает влияние на величину отношения сигнал/шум.

Предложена новая методика определения дисперсионной длины под действием хроматической и поляризационной модовой дисперсий при сильном воздействии фазовой самомодуляции и кросс-модуляции, позволяющая определить потери мощности при их совместном воздействии и оценить изменение окна работоспособности для одномодовых оптических волокон G.652, G.655, G.654.E (TXFTM Corning) и скоростей передачи 10-100 Гбит/с с учетом форматов модуляции.

С учетом влияния CD и PMD дисперсионная длина определяется формулой:

$$L_D^{CD+PMD} = \frac{T_b^2 \cdot d_m^2}{8 \cdot (\beta_2 + 0,04 \cdot \beta_2)} \approx \frac{T_b^2 \cdot d_m^2}{8,32 \cdot \beta_2}, \quad (5)$$

где T_b – битовый интервал, d_m – параметр формата модуляции.

Полученное выражение дисперсионной длины показывает, что дисперсионная длина уменьшается из-за совместного воздействия CD и PMD.

Если учесть влияние CD, PMD и SPM дисперсионная длина выражается соотношением:

$$L_D^{CD+PMD+SPM} = \frac{L_D^{CD+PMD} \cdot \left[1 + \left(\frac{z}{L_D^{CD+PMD}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[1 + \sqrt{2} \Phi_{SPM} \cdot \frac{z}{L_D^{CD+PMD}} + \left(1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} \Phi_{SPM}^2 \right) \left(\frac{z}{L_D^{CD+PMD}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (6)$$

где Φ_{SPM} – сдвиг фазы из-за влияния SPM, заданный уравнением (7):

$$\Phi_{SPM} = \gamma P_{in} z_{eff}, \quad (7)$$

где P_{in} – вводимая мощность канала.

С учетом SPM при начальной линейной частотной модуляции дисперсионная длина становится:

$$L_D^{CD+PMD+SPM+chirp} = \frac{L_D^{CD+PMD} \cdot \left[1 + \left(\frac{z_{chirp}}{L_D^{CD+PMD}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{z_{chirp}}{L_D^{CD+PMD}} + \left(1 + \frac{1}{3\sqrt{3}} \right) \left(\frac{z_{chirp}}{L_D^{CD+PMD}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (8)$$

где длина линии $z_{chirp} = 1,36 L_D^{CD+PMD}$ при $\Phi_{SPM} = 1/2$.

Учитывая влияние CD, PMD и XPM, дисперсионная длина принимает следующий вид:

$$L_D^{CD+PMD+XPM} = \frac{L_D^{CD+PMD} \cdot \left[1 + \left(\frac{z}{L_D^{CD+PMD}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[1 + \sqrt{2} \Phi_{XPM} \cdot \frac{z}{L_D^{CD+PMD}} + \left(1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} \Phi_{XPM}^2 \right) \left(\frac{z}{L_D^{CD+PMD}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

где Φ_{XPM} – фазовый сдвиг из-за воздействия XPM и определяется по формуле:

$$\Phi_{XPM}(M) = \gamma P_{in} Z_{eff} (2M - 1), \quad (10)$$

где M – количество DWDM-каналов.

При учете влияния CD, PMD и XPM и межканальный интервал CS:

$$L_D^{CD+PMD+XPM+CS} = \frac{L_D^{CD+PMD} \cdot CS \cdot \left[1 + \left(\frac{z}{L_D^{CD+PMD} \cdot CS} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[1 + \sqrt{2} \Phi_{XPM} \cdot \frac{z}{L_D^{CD+PMD} \cdot CS} + \left(1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} \Phi_{XPM}^2 \right) \left(\frac{z}{L_D^{CD+PMD} \cdot CS} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (11)$$

Дисперсионная длина существенно ухудшается при высоком значении коэффициента CD. Кроме коэффициента хроматической дисперсии, дисперсионная длина под действием XPM уменьшается при увеличении скорости

передачи и числа каналов за счет уменьшения расстояния между ними, что приводит к увеличению потерь мощности и, следовательно, ведет к ухудшению значения отношения сигнал/шум. Это в свою очередь приводит к уменьшению дальности передачи. На рисунке 2 показана зависимость дисперсионной длины от количества каналов и длины пролета при скоростях передачи 10 Гбит/с и 40 Гбит/с для волокна G.655.

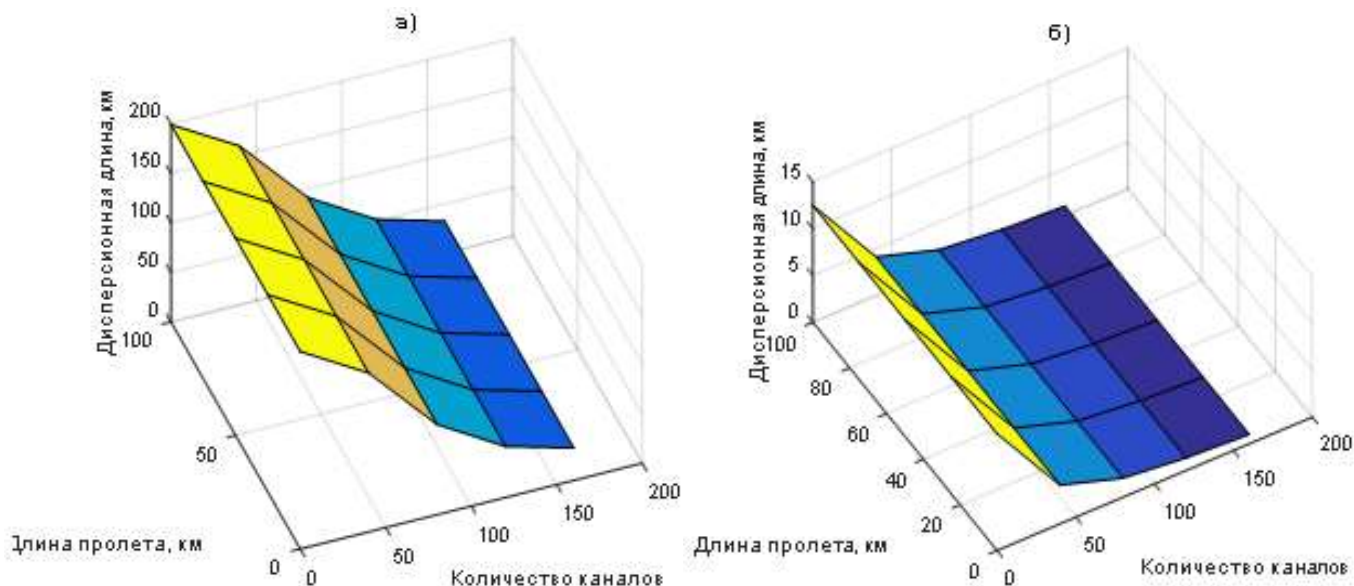


Рисунок 2 – Изменение дисперсионной длины от числа каналов и длины пролета для G.655 под действием XPM для скорости а) 10 Гбит/с, б) 40 Гбит/с.

Введение дисперсионной длины позволяет определить потери мощности при воздействии CD, PMD, SPM и XPM:

- с учетом совместного воздействия CD, PMD и SPM потери мощность вычисляется соотношением:

$$\Delta P_{CD+PMD+SPM} = 5 \log \left[1 + \left(\frac{z}{L_D^{CD+PMD+SPM}} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

На рисунке 3 показана зависимость потерь мощности от скорости передачи.

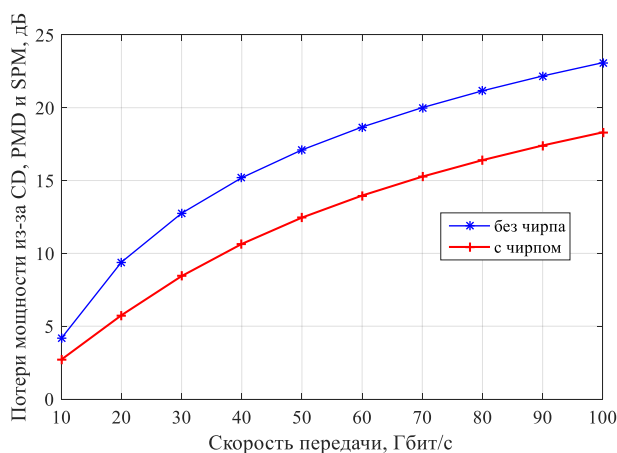


Рисунок 3 – Потери мощности из-за CD, PMD и SPM для G.652.

- с учетом влияния ХРМ, потери мощности согласно уравнению (12) становится следующей формулой:

$$\Delta P_{CD+PMD+XPM} = 5 \log \left[1 + \left(\frac{z}{L_D^{CD+PMD+XPM}} \right)^2 \right]. \quad (13)$$

Разработанная методика показывает, что дисперсионная длина существенно уменьшается из-за влияния CD и PMD при воздействии SPM и ХРМ с увеличением скорости передачи и количества каналов, которое в свою очередь приводит к увеличению потерь мощности, что ведет к изменению характеристик передачи (окна работоспособности), если не принимать соответствующих мер.

В третьем разделе исследованы способы улучшения окна работоспособности путем уменьшения негативных воздействий при распространении оптического сигнала. Рассмотрены методы компенсации хроматической дисперсии на основе применения компенсирующего волокна и методы преодоления влияния поляризационной модовой дисперсии с помощью формата RZ-DQPSK и применения упреждающей коррекции ошибок FEC при скорости передачи 40 Гбит/с и прямом детектировании. При этом дисперсионная длина имеет следующий вид:

$$L_{D,comp+FEC}^{CD+PMD} = \frac{d_m^2 \cdot T_b^2 \cdot (3,33 \cdot \log(m))^2 \cdot L_{TF} \cdot \left(\frac{Q_e}{Q_{e,FEC}} \right)^2}{8,32 \cdot |\beta_{2,TF} L_{TF} + \beta_{2,DCF} L_{DCF}|}, \quad (14)$$

где m – размер алфавита, $\beta_{2,TF}$ и L_{TF} – коэффициент дисперсии групповых скоростей и длина линии ОВ передачи, а $\beta_{2,DCF}$ и L_{DCF} – коэффициент дисперсии групповых скоростей и длина компенсирующего волокна, Q_e , $Q_{e,FEC}$ – Q-факторы в электрическом канале и их значение составляет 16 дБ и 8 дБ соответственно при скорости передачи 40 Гбит/с.

Таким образом, необходимая длина оптического волокна для компенсации дисперсии определяется соотношением

$$L_{DCF} = \frac{\left| k \cdot d_m^2 \cdot T_b^2 \cdot \left(\frac{Q_e}{Q_{e,FEC}} \right)^2 - 8 |\beta_{2,TF} L_{TF}| \right|}{8 \cdot \beta_{2,DCF}}, \quad (15)$$

где k – коэффициент, определяющий потерь на дисперсию ($k=0,75$ при минимальных потерях в пределах 1 дБ, а $k=1,25$ для потерь в пределах 2 дБ).

Используем полученные решения из уравнений (14)–(15) по компенсации CD и PMD в уравнениях (6), (8), (9), (11), (12), (13), чтобы оценить изменение дисперсионной длины и потерь мощности при наличии SPM и ХРМ (рисунки 4 и 5).

Количество каналов при применении формата модуляции RZ выражается формулой:

$$M = \frac{\Delta F + CS}{CW + CS} = \frac{\Delta F + CS}{2B + CS}, \quad (16)$$

где ΔF – общая ширина частот в рассматриваемом диапазоне, CW – ширина оптического канала, необходимая для декодирования, CS – расстояние между каналами. Используемые параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Используемые параметры для расчетов и графиков

С-диапазон	$\Delta F = 4,4$ ТГц
Дисперсия групповых скоростей волокна, TF	$\beta_{2,TF} = -21,7$ пс ² /км
Дисперсия групповых скоростей компенсирующего волокна, DCF	$\beta_{2,DCF} = 102,08$ пс ² /км
Длина волокна, TF	$L_{TF} = 80$ км
Скорость передачи, B	$B = 40$ Гбит/с
Формат модуляции	RZ-DQPSK

На рисунках 4 и 5 представлены потери мощности при воздействии SPM и XPM с учетом компенсации CD и PMD.

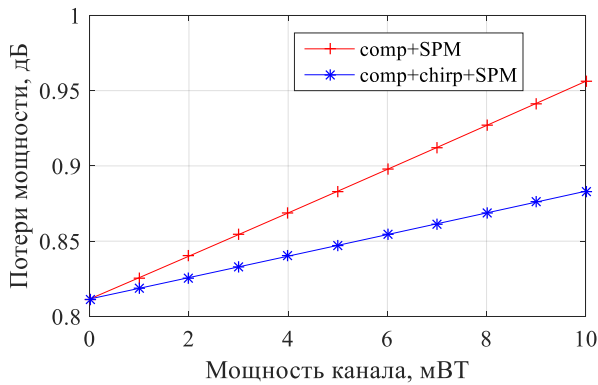


Рисунок 4 – Потери мощности из-за совместного влияния CD, PMD и SPM.

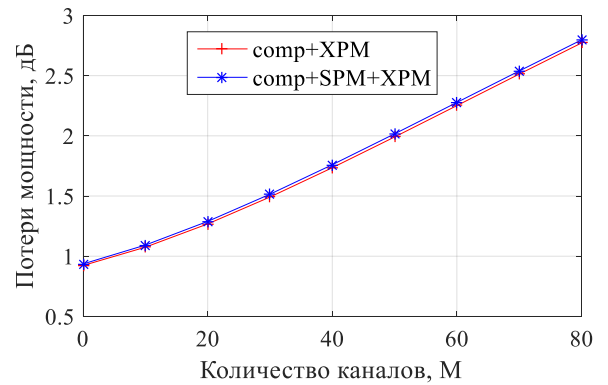


Рисунок 5 – Потери мощности при наличии XPM и при $P_{in} = 1$ мВт.

Рассмотрены способы применения фильтра с конечной импульсной характеристикой (FIR -фильтра) для электронной компенсации дисперсии и использования адаптивных эквалайзеров с помощью алгоритмов постоянного модуля СМА и наименьшего квадрата LMA для компенсации PMD при когерентных системах передачи в DSP-модули (DSP – Digital Signal Processing).

Приведено сравнение передаточных характеристик одномодовых оптических волокон для уменьшения влияния нелинейных эффектов. Для сравнения передаточных характеристик различных типов ОВ была разработана

оптическая мера качества (FOM – figure of merit) на основе модели гауссовского шума, определяющаяся формулой:

$$FOM(\text{дБ}) = \frac{2}{3} 10 \log \left(\frac{A_{\text{eff}} n_{2,\text{ref}}}{A_{\text{eff,ref}} n_2} \right) - \frac{2}{3} (\alpha - \alpha_{\text{ref}}) \cdot L - \frac{1}{3} 10 \log \left(\frac{z_{\text{eff}}}{z_{\text{eff,ref}}} \right) + \frac{1}{3} 10 \log \left(\frac{D}{D_{\text{ref}}} \right), \quad (17)$$

где A_{eff} , L , D – эффективная площадь, нелинейный показатель n_2 , коэффициент затухания, длина пролета и коэффициент CD , а $A_{\text{eff,ref}}$, $n_{2,\text{ref}}$, α_{ref} , $z_{\text{eff,ref}}$, D_{ref} – эффективная площадь, нелинейный показатель преломления, коэффициент затухания, эффективная длина и коэффициент CD , соответственно, в качестве эталонного волокна. Результаты расчетов FOM приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов FOM для различных ОВ

Тип ОВ	Коэффициент хроматической дисперсии D , пс/(нм·км)	Затухание α , дБ/км	Эффективная площадь/радиус модового поля, A_{eff} / r , мкм ² /мкм	FOM, дБ
NZ-DSF-B (Ref.)	4,2	0,25	55/4,2	-
NZ-DSF-A	4,5	0,25	72/4,8	1,07
SSMF	17	0,22	80/5,05	4,94
SMF-28 ULL Corning	18	0,163	85/5,2	8,21
Волокно TXF™ Corning	21	0,168	125/6,3	9,59

Кроме того, улучшение значения OSNR количественно обсуждается для сравнения передаточных характеристик оптического волокна. Максимизированное OSNR ($OSNR_{\text{max}}$) для передающих волокон, имеющих различные характеристики, было сформировано аналитически и может быть описано формулой:

$$OSNR_{\text{max}}(\text{дБ}) = \frac{2}{3} 10 \log |DL_{\text{eff}}| - \frac{2}{3} 10 \log (\gamma L_{\text{eff}}) - \frac{2}{3} \alpha L - 10 \log (N_{\text{span}}) + C, \quad (18)$$

где N_{span} – число пролетов, C – коэффициент, не зависящий от параметров оптического волокна и определяемый системой передачи. Например, значение C установлено 38,4 дБ из эксперимента для DWDM-систем передачи со скоростью 100 Гбит/с и с форматом модуляции DP-QPSK.

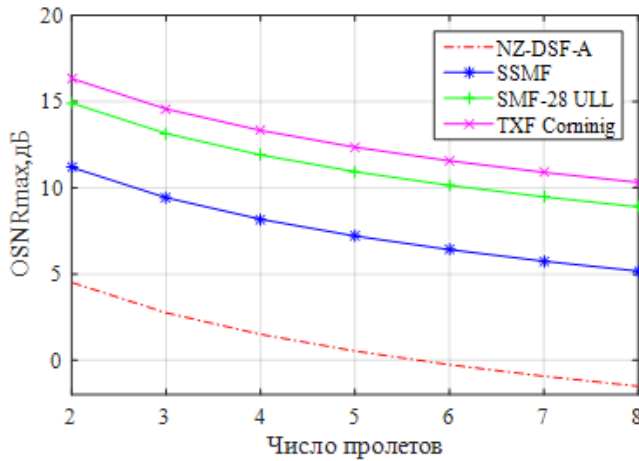


Рисунок 6 – Зависимость $OSNR_{max}$ от числа пролета.

В четвертом разделе описано применение полученных решений, связанных с компенсацией линейных и нелинейных эффектов, рассмотренных в третьем разделе в определении длины регенерационного (усилительного) участка и величины OSNR. Рассмотрена уточненная и предлагаемая методика расчета регенерационного (усилительного) участка с учетом нормы потерь по дисперсиям и компенсации хроматической и поляризационной дисперсии при наличии фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции и при применении Рамановского усилителя для скорости передачи 40 Гбит/с и оптических волокон G.652, G.655 и TXFTM Corning.

Длина регенерационного (усилительного) участка за счет дисперсии и применения Рамановского усилителя имеет следующий вид:

$$l_{pe(yy)} = \frac{S - 2\alpha_p - s_1 - s_2 - s_3}{\alpha_{OB} + \frac{\alpha_{np}}{l_{cd}}}, \quad (19)$$

где S – допустимый энергетический потенциал, дБм (передача-прием) для, α_p – затухание разъемного соединителя, 0,3 дБ, α_{np} – затухание неразъемного соединителя, 0,1 дБ, α_{OB} – коэффициент затухания оптического волокна, l_{cd} – строительная длина оптического кабеля, 4 км, s_1 – энергетический запас на старение и ремонт, равный 3 дБ, s_2 – потери из-за влияния CD и PMD при наличии SPM и XPM, s_3 – потери при применении Рамановского усилителя.

С учетом воздействия CD и PMD при наличии SPM и XPM после компенсации дисперсии, s_2 принимает следующий вид:

$$s_2 = 5 \cdot \log \left(1 + \left(\frac{z}{L_{D,comp+FEC}^{CD+PMD+SPM+XPM}} \right)^2 \right), \quad (20)$$

где $L_{D,comp+FEC}^{CD+PMD+SPM+XPM}$ – дисперсионная длина с учетом решения компенсации CD и

Результаты исследования на основе FOM и OSNR показывают, что использование волокна TXFTM Corning позволяет получить выигрыш 2-3 дБ по отношению сигнал/шум по сравнению с волокном SMF-28 ULL. Кроме того, представлен другой способ компенсации нелинейных эффектов на базе цифрового обратного преобразования DBP.

PMD при наличии влияния SPM и XPM. В этом случае дисперсионная длина становится следующей формулой:

$$L_{D,comp+FEC}^{CD+PMD+SPM+XPM} = \frac{L_{D,comp+FEC}^{CD+PMD} \left[1 + \left(\frac{z}{L_{D,comp+FEC}^{CD+PMD}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[1 + \sqrt{2} \frac{z}{L_{D,comp+FEC}^{CD+PMD}} \Phi_{XPM} + \left(1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} (\Phi_{XPM})^2 \right) \left(\frac{z}{L_{D,comp+FEC}^{CD+PMD}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (21)$$

На рисунках 7 и 8 представлена зависимость регенерационного (усилительного) участка от энергетического потенциала и количества каналов.

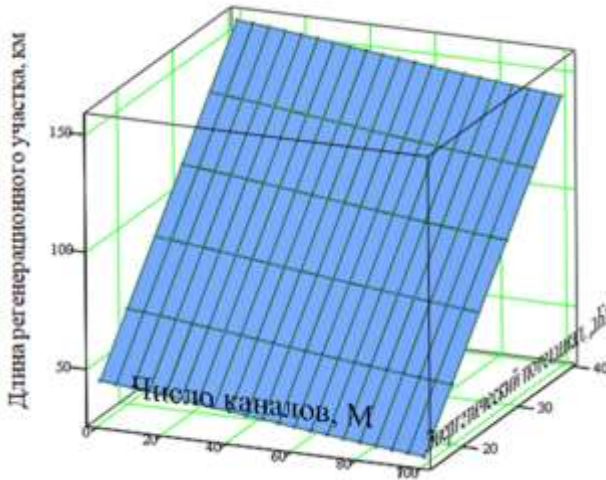


Рисунок 7 – Длина регенерационного участка для G.652 и $B=40$ Гбит/с.

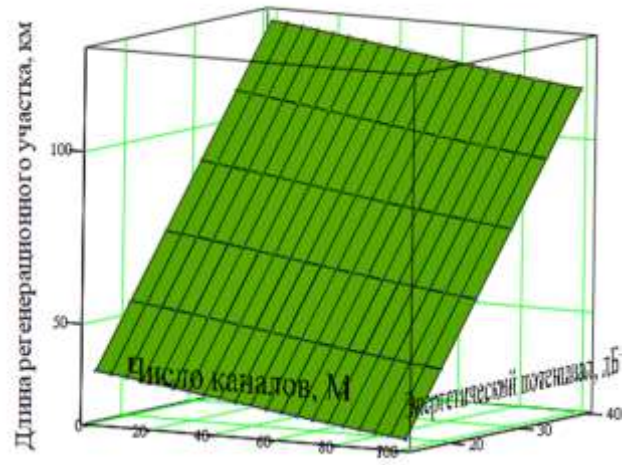


Рисунок 8 – Длина регенерационного участка для G.655 и $B=40$ Гбит/с.

С учетом полученных решений по компенсации CD и PMD при наличии SPM и XPM, величина OSNR определяется следующими выражениями:

- при передаче с одним пролетом и длине волны 1550 нм

$$OSNR = 58 + P_{in} - \alpha \cdot L - NF - 5 \cdot \log \left(1 + \left(\frac{L}{L_{D,comp+FEC}^{CD+PMD+SPM}} \right)^2 \right); \quad (22)$$

- для многоканальных передач и с N_{span} пролетами, уравнение (22) принимает следующий вид:

$$OSNR = 58 + P_{in} - 10 \log(M) - \alpha \cdot L - NF - 10 \log(N_{span}) - 5 \cdot \log \left(1 + \left(\frac{L}{L_{D,comp+FEC}^{CD+PMD+SPM+XPM}} \right)^2 \right), \quad (23)$$

где NF – шум-фактор усилителя, N_{span} – число пролетов.

Получены решения, которые позволяют точно определить коэффициент битовых ошибок при проектировании высокоскоростных наземных волоконно-оптических линий связи.

Согласно Агравалу, прямая зависимость BER от OSNR вычисляется следующим соотношением:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{10 \frac{OSNR}{10}}}{8} \right], \quad (24)$$

где $\operatorname{erfc}(x)$ – дополнительная функция ошибок, OSNR измеряется в децибелах.

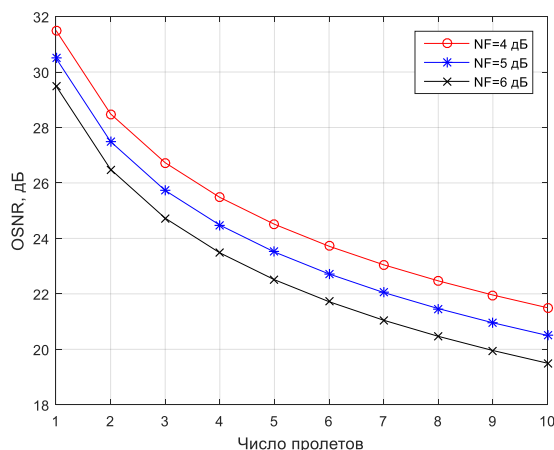


Рисунок 9 – Зависимость значения OSNR от числа пролетов.

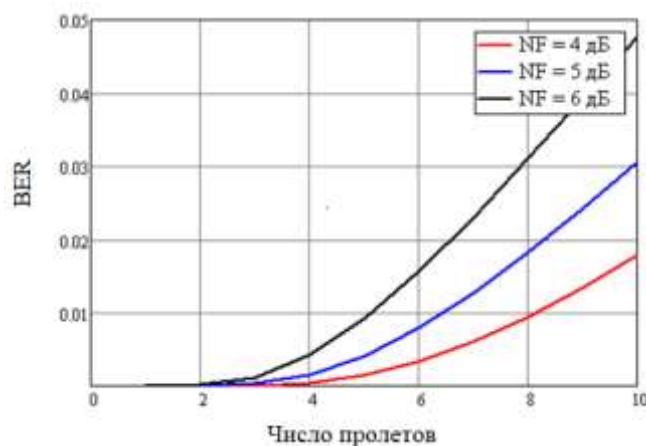


Рисунок 10 – Зависимость BER от числа пролетов.

Приведено сравнение методики определения величины OSNR согласно методике, предлагаемой в диссертационном исследовании, и методике ITU-T G.692.

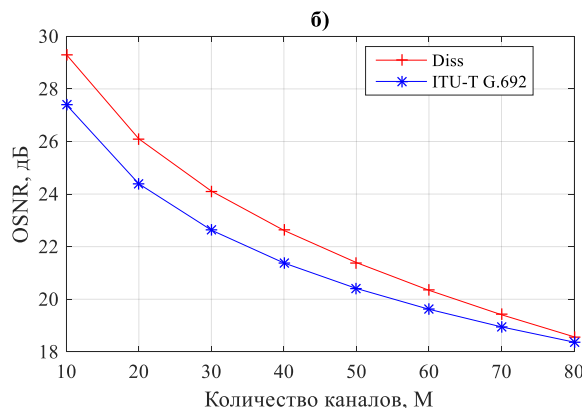
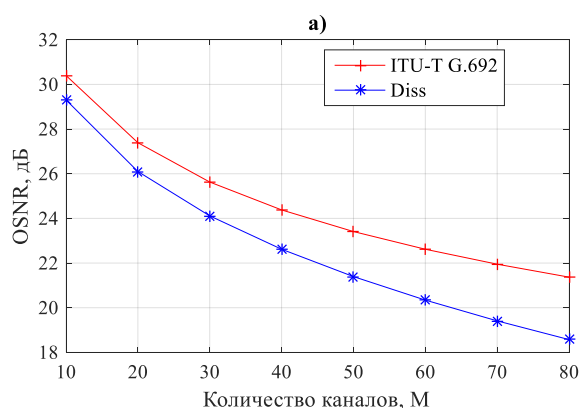


Рисунок 11 – Сравнение значения OSNR по методике ITU-T G.692 и предлагаемой методике, полученной в диссертационной работе – а) без учета дополнительных потерь – б) учетом дополнительных потерь 3 дБ (G.692).

Представлена методика расчета значения OSNR для когерентных систем передачи и использованием оптических волокон TXF™ Corning.

Учитывая вклад шума усиленного спонтанного излучения (ASE) и нелинейностей волокна, в частности эффекта Керра, характеристики системы оптической связи после распространения без управления дисперсией можно

описать с помощью, так называемого эффективного отношения сигнал/шум при применении EDFA-усилителя или усилителя Рамана:

$$SNR_{eff} \approx \frac{P_{ch}}{P_N + P_{S-S} + P_{S-N}}, \quad (25)$$

где P_N – уровень ASE-шума системы передачи; P_{S-S} – уровень шума из-за нелинейных взаимодействий сигнал-сигнал; P_{S-N} – уровень шума из-за взаимодействия сигнал-шум.

Связь между SNR и OSNR определяется выражением:

$$OSNR = \frac{pR_s}{2\Delta\nu_{ref}} SNR, \quad (26)$$

где параметр $p=1$ тогда применяется одна поляризация и $p=2$ в случае поляризационного мультиплексирования; R_s – символьная (бодовая) скорость, ГБод, $\Delta\nu_{ref}$ – эталонная оптическая полоса пропускания (обычно выбирается равной 0,1 нм, или 12,5 ГГц на длине волны 1550 нм).

При применении только электронной компенсации дисперсии (EDC – Electronic Dispersion Compensation) в DSP при когерентном детектировании вклад нелинейного взаимодействия сигнал-сигнал намного больше, чем вклад взаимодействия сигнал-шум. В этом случае можно пренебречь взаимодействием сигнал/шум. Следовательно, уравнение (27) становится следующим:

$$SNR_{EDC} \approx \frac{P_{ch}}{P_N + P_{S-S}} \approx \frac{P_{ch}}{N_{span} (P_{ASE} + \eta P_{ch}^3)}, \quad (27)$$

где P_{ASE} – мощность спонтанного излучения ASE.

В случае применения компенсации нелинейных эффектов на основе DBP как части DSP на приемной или передаточной стороне нелинейное взаимодействие сигнал/сигнал устраняется и учитывается только взаимодействие сигнал/шум и шума усиленного спонтанного излучения ASE. Таким образом, уравнение (25) принимает следующий вид:

$$SNR_{DBP} \approx \frac{P_{ch}}{P_N + P_{S-N}} \approx \frac{P_{ch}}{P_{ASE} (N_{span} + 3\eta\zeta P_{ch}^2)}. \quad (28)$$

где P_{ch} – средняя вводимая мощность канала, η – константа нелинейного искажения и ζ – фактор, зависящий от числа пролетов. η и ζ имеют следующий вид:

$$\eta = \left(\frac{2}{3}\right)^3 \frac{\gamma^2 \cdot z_{eff}}{\pi |\beta_2| R_s^2} \arcsin h \left(\frac{\pi^2}{2} z_{eff} R_s^2 M^{2\frac{R_s}{CS}} \right), \quad (29)$$

$$\zeta = \frac{N_{span} (N_{span} - 1)}{2}. \quad (30)$$

В таблице 3 приведены используемые параметры.

Таблица 3 – Параметры систем

Параметры передачи	Значение для волокна TXF™ Corning
Затухание α , дБ/км	0,168
Дисперсия групповых скоростей β_2 , пс ² /км	26,9
Коэффициент нелинейности γ , 1/Вт· км	0,71
Эффективная длина z_{eff} , км	24,7
Длина пролета L , км	80
Шум-фактор NF , дБ	3,5
Коэффициент усиления G , дБ	16
Параметры сигнал и модуляции	Значение
Символьная скорость R_s , ГБод	32
Центральная длина волны, нм	1550
Число поляризации, p	1
Межканальный интервал CW , ГГц	25
Количество каналов, M	10
Число пролетов, N_{span}	10

Сравнение OSNR и BER в зависимости от различных методов компенсаций и вводимой мощности, рассмотренных в диссертационном исследовании, изображено на рисунках 12 и 13.

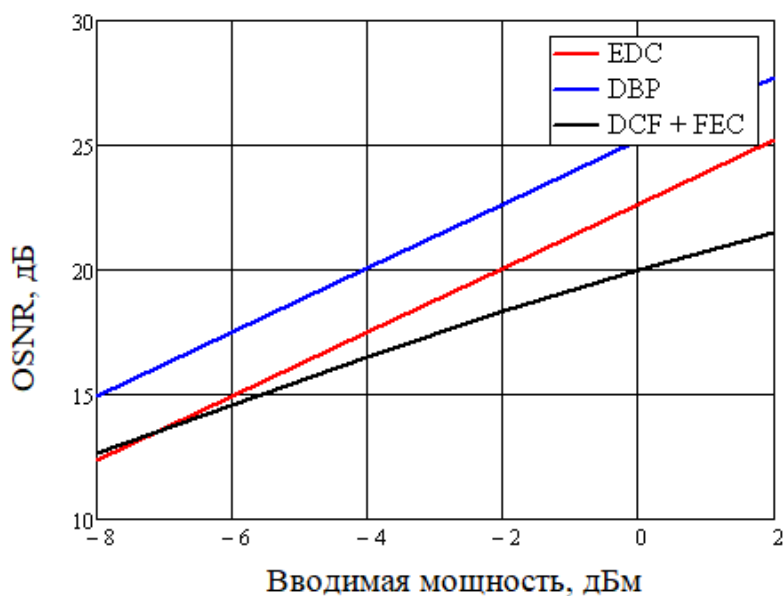


Рисунок 12 – Зависимость OSNR от вводимой мощности при различных методах компенсации.

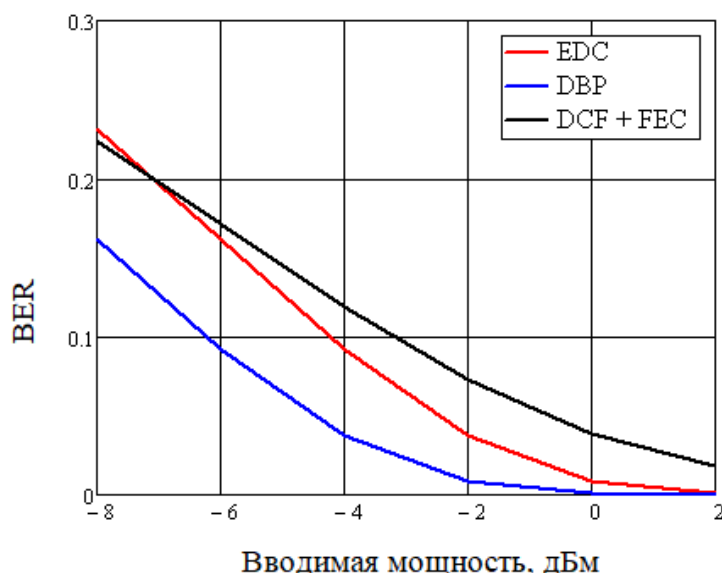


Рисунок 13 – Зависимость BER от вводимой мощности при различных методах компенсации.

Заключение

Основные результаты выполненного диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Разработана новая и оригинальная методика определения дисперсионной длины под действием хроматической и поляризационной модовой дисперсий при наличии фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции с учетом формата модуляции для одномодовых оптических волокон G.652, G.655, G.654.E (TXF™ Corning) и скоростей передачи 10-100 Гбит/с.
2. Введение дисперсионной длины позволяет не только определить потери мощности при воздействии проведенных эффектов, но и определить значение Q-фактора, определяющего значение коэффициента битовых ошибок (BER).
3. Доказанная необходимость оценки и учета проведенных эффектов для нахождения оптимального способа улучшения окна работоспособности подтверждена экспериментами зарубежных исследований.
4. Разработана методика улучшения окна работоспособности путем уменьшения влияния негативных воздействий при распространении сигнала по оптическому волокну. Получены решения, связанные с компенсацией линейных и нелинейных эффектов, которые позволяют в значительной степени уменьшить потери мощности при совместном воздействии исследуемых эффектов.
5. Разработана методика расчета длины регенерационного (усилительного) участка с учетом решения, связанного с компенсацией хроматической и поляризационной модовой дисперсий при наличии фазовой

само модуляции и фазовой кросс-модуляции с использованием рамановского усилителя для скорости передачи 40 Гбит/с и различного количества каналов.

6. Разработана методика определения отношения сигнал/шум с учетом решения по компенсации дисперсий и нелинейных эффектов. Проведено сравнение методики, полученной в диссертационной работе и методики ITU-T G.692 для эмпирического определения отношения сигнал/шум.
7. Получены решения, связанные с определением отношения сигнал/шум с учетом влияния линейных и нелинейных эффектов для когерентных систем, позволяющие точно определить коэффициент битовых ошибок. Это целесообразно для проектирования высокоскоростных волоконно-оптических линий связи.

На основании представленных выше положений можно сделать вывод о том, что цель диссертационного исследования достигнута, научная задача решена.

Список публикаций

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. **Rabenandrasana, J.** The influence of phase self-modulation and phase cross-modulation for the transmission of signals optical fiber / J. Rabenandrasana, E.L. Portnov // T-comm – Telecommunications and Transport. – 2017, Vol. 11, No.11. – P. 80-83.
2. **Rabenandrasana, J.** Analysis of the intrachannel nonlinear effects in optical communication systems / J. Rabenandrasana, E.L. Portnov // T-comm – Telecommunications and Transport. – 2019. – Vol. 13, No.1. – P. 66-69.
3. **Рабенандрасана, Ж.** Совместное воздействие хроматической, поляризационной модовой дисперсий и фазовой само модуляции на дисперсионную длину / Ж. Рабенандрасана, Э.Л. Портнов // T-comm – Телекоммуникации и транспорт. – 2019. – Том 13, №2. – С. 31-35.
4. **Рабенандрасана, Ж.** Влияние хроматической и поляризационной модовой дисперсий на дисперсионную длину под действием фазовой кросс-модуляции / Ж. Рабенандрасана, Э.Л. Портнов // T-comm – Телекоммуникации и транспорт. . – 2019. – Том 13, №9. – С. 62-64.

Публикации в изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS

5. **Rabenandrasana, J.** The Choice of Optical Fiber with the Best Transmission Characteristics / J. Rabenandrasana, E.L. Portnov // IEEE, Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2020. – P. 1-5.
6. **Rabenandrasana, J.** Effects of Polarization Mode Dispersion on the quality of signal transmission and compensation methods / J. Rabenandrasana,

A. Vyukusenge// IEEE, Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. — 2020. — P. 1-6.

Публикации в других изданиях

7. **Рабенандрасана, Ж.** Нелинейные эффекты в оптическом волокне и возможности управления ими / Ж. Рабенандрасана, Э.Л. Портнов // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» Международного форума информатизации МФИ-2017. – МТУСИ, 2017. – С.110–112.
8. **Рабенандрасана, Ж.** Изменение окна работоспособности под действием нелинейных эффектов / Ж. Рабенандрасана // Международная научно-техническая конференция «Технологии информационного общества – ТИО-2019». – М.: МТУСИ, 2019 – С. 83-84.
9. **Рабенандрасана, Ж.** Внутриканальная фазовая кросс-модуляция ВОСП-СР / Ж. Рабенандрасана // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» Международного форума информатизации МФИ-2019. – МТУСИ, 2019. – С.71-73.
10. **Рабенандрасана, Ж.** Улучшения характеристик оптического волокна для передачи больших мощностей / Ж. Рабенандрасана, Э.Л. Портнов // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» Международного форума информатизации МФИ-2019. – МТУСИ, 2019. – С.73-77.
11. **Рабенандрасана, Ж.** Сравнение передаточных характеристик одномодовых оптических волокон для высокоскоростных передач / Ж. Рабенандрасана, Э.Л. Портнов // Международная научно-техническая конференция «Технологии информационного общества – ТИО-2020». – М.: МТУСИ, 2020 – С. 81-84.