

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.391:621.395-042.4

Мойсевич
Юрий Сергеевич

Моделирование тракта высокоскоростной оптической системы передачи

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-45 80 01 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Научный руководитель
Тарченко Надежда Владимировна
кандидат технических наук, доцент

Минск 2019

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных телекоммуникационных сетей неизменно идет по пути увеличения объемов передаваемой информации. В магистральных сетях связи сохраняется экспоненциальный рост трафика, который увеличивается приблизительно в 10 раз каждые 7 лет. Постоянно возрастающая потребность в увеличении скорости передачи данных приводит к появлению и становлению новых волоконно-оптических технологий и подходов, позволяющих поддерживать текущие темпы роста трафика и передавать сигналы с более высокой скоростью на большие расстояния. В ближайшем будущем планируется полностью перейти на оптические технологии.

Прогресс в увеличении производительности систем связи основан на внедрении и совершенствовании спектрально эффективных форматов модуляции в сочетании с когерентным детектированием и цифровой обработкой сигналов. На сегодняшний момент приоритетными направлениями развития магистральных систем связи являются расширение используемого спектрального диапазона, интеграция фотоники и электроники, развитие многосердцевинных волокон и соответствующих оптических усилителей.

Основной проблемой является оптимальное построение волоконно-оптической линии связи, которая должна обеспечивать заданные техническим заданием характеристики. В этой связи актуальным является моделирование линейного тракта оптических сетей, которое позволит найти оптимальный вариант построения сети при заданных условиях функционирования. Сложность заключается в учете огромного количества характеристик и параметров элементов оптической сети, таких как оптические передатчики, оптические модуляторы, оптические усилители, оптические мультиплексоры/демультиплексоры, оптические приемники, которые заметно влияют на качество передаваемой информации.

Проектируемые и внедряемые в настоящее время волоконно-оптические системы передачи на магистральных участках имеют значительную протяженность и большое количество узлов, и использование возможностей информационной емкости оптического волокна не в полном объеме ведет к увеличению стоимости проектируемой сети. Поэтому вопрос моделирования волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) со спектральным разделением каналов является актуальным и требует детального рассмотрения, поскольку на параметры сигнала при распространении по оптическому волокну накладываются дополнительные ограничивающие факторы, такие как нелинейные эффекты в оптическом волокне, мощность шумов усиленного спонтанного излучения оптических усилителей, межканальные помехи,

искажения за счет дисперсии, некогерентность детектирования, квантовый шум передатчиков и другие.

Актуальность темы магистерской диссертации обусловлена повсеместным использованием ВОСП, в том числе и со спектральным уплотнением. При постоянном увеличении пропускной способности ВОСП совершенствуются способы обработки оптического сигнала как в передающем и приемном оборудовании, так и в процессе передачи по оптическому волокну. Моделирование высокоскоростного волоконно-оптического тракта позволит сравнить различные варианты детектирования и построения линейного тракта при обеспечении требуемых качественных характеристик.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Целью исследовательской работы является разработка математической модели и моделирование высокоскоростного оптического линейного тракта с различными вариантами построения. Особое внимание уделено способам детектирования оптического сигнала и оценке оптического (ООСШ) и электрического (ЭОСШ) отношения сигнал/шум для обеспечения заданной вероятности ошибки.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1 проведена классификация ВОСП;
- 2 проведен анализ методов детектирования оптических сигналов с учетом результирующего ЭОСШ в точке регенератора;
- 3 исследованы влияния характеристик современных компонентов ВОСП на ООСШ в линейном тракте;
- 4 разработаны математические модели элементов оптического линейного тракта;
- 5 проведен расчет оптического линейного тракта с максимальным учетом оптических компонентов.

Тема диссертационной работы соответствует пункту 6 приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016 – 2020 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 190 от 12 марта 2015 г., «Электроника и фотоника».

В работе проведен сравнительный анализ способов построения оптических приемников и способов детектирования оптических сигналов. Получены графики оценки ЭОСШ в точке принятия решения от ООСШ на входе, скорости передачи цифрового сигнала, мощности сигнала на входе для когерентного и непосредственного приема и мощности гетеродина для

когерентного приема. Приведена оценка ООСШ в линейном тракте с учетом влияния современных компонентов ВОСП.

Материалы исследования были представлены в виде доклада на 54-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, г. Минск, 23 – 27 апреля 2018 г., а также опубликованы статьи в сборнике материалов XXIII Международной научно-технической конференции в Белорусской государственной академии связи, 2018 г., и в сборнике материалов международного научно-технического семинара БГУИР, 2018 г.

Диссертация проверена на плагиат, все заимствованные материалы имеют ссылки на литературные источники.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Способы организации передачи информации по оптическому волокну многообразны и постоянно совершенствуются. Существенную помощь при их изучении и моделировании оказывает классификация. В результате проведения библиографического поиска и анализа научно-технической литературы в первом разделе предложена классификация ВОСП по основным классификационным признакам (тип передаваемого сигнала, способ модуляции, метод уплотнения, способ приема, протяженность), с помощью которых можно описать любую проектируемую либо эксплуатируемую систему передачи.

На сегодняшний момент активно внедряются и используются цифровые магистральные ВОСП со спектральным уплотнением каналов, поэтому при моделировании линейного тракта особое внимание уделено этой системе передачи.

Проведенная классификация показала, что существует большое разнообразие методов и реализаций ВОСП, что требует понимания и обоснования, в каких условиях какую реализацию применять. Дополнительным критерием применения той или иной системы является стоимость реализации.

Во втором разделе проведен анализ ЭОСШ для оптических приемников разного типа: прямого детектирования и когерентных (гетеродинного и гомодинного). В результате получены математические выражения для расчета теоретического предела ЭОСШ. Гетеродинный прием обеспечивает выигрыш не менее чем в 2 раза по сравнению с непосредственным приемом (в случае применения идеального фотодетектора), а гомодинный – в 4 раза.

Показано, что для реальных систем переход к когерентному детектированию позволяет на 10 – 15 дБ увеличить ОСШ в точке принятия решений при одной и той же падающей мощности в рабочем диапазоне. В случае использования балансного приемника можно получить дополнительный

выигрыш до 3 дБ для всех способов приема. Также выявлено, что при увеличении скорости передачи информации выигрыш от использования когерентного приемника увеличивается.

Предложенные во втором разделе модели позволяют при проектировании цифровых ВОСП оценить с учетом выбранного вида модуляции параметры оптических приемников и выбрать наилучший метод приема, при котором обеспечивается требуемое качество при минимальной чувствительности, что обеспечивает максимальную протяженность участка регенерации в системах со спектральным разделением каналов.

В третьем разделе проведена оценка ООСШ для сетевых элементов оптического линейного тракта. На передающей стороне рассмотрены шумовые характеристики оптических передатчиков, для которых основным параметром, оказываемым на уровень шума на выходе, является относительная интенсивность шума (RIN). Для большой скорости передачи существенным фактором при оценке ООСШ на выходе передатчика является ширина спектра излучения сигнала.

На линейном участке рассмотрены типы применяемых оптических усилителей. Приведены формулы для расчета основных характеристик усилителей различных типов – коэффициента шума и коэффициента усиления. Оценено влияние на результирующее ООСШ каскадного включения усилителей, описаны способы и места включения их на линейном участке. Показано, что существенное влияние на ООСШ на выходе всего линейного тракта оказывают шумовые характеристики первого усилителя, поэтому целесообразно использовать малощумящие усилители мощности.

Для оптических мультиплексоров ввода/вывода проведена оценка перекрестного влияния на оптический канал. Рассмотрены линейные и нелинейные эффекты, возникающие в оптическом волокне, и их влияние на ООСШ. Ограничением максимальной мощности, вводимой в оптическое волокно, являются допустимый порог стимулированного бриллюэновского рассеяния (SBS), стимулированное рамановское рассеяние (SRS), уровень допустимых искажений для четырехволнового смещения (FWM), фазовая самомодуляция (SPM).

На сегодняшний день не существует точной оценки нелинейных эффектов, поэтому они учитываются в виде штрафа ООСШ от 1 дБ до 6 дБ в зависимости от реализованной системы передачи.

Приведены формулы для оценки длины регенерационного участка с учетом оптического усиления и компенсации дисперсии. Из двух величин протяженности участка регенерации при работе по оптическому волокну, рассчитанных с учетом дисперсионных свойств оптического линейного тракта

и энергетических свойств, выбирается наименьшее значение, которое и будет являться протяженностью участка регенерации волоконно-оптической линии связи.

Если задана длина оптического участка, то необходимо оценить допустимую и результирующую дисперсии. Результирующая дисперсия для систем со спектральным разделением каналов состоит из хроматической и поляризационно-модовой дисперсии (ПМД). Последняя проявляется и учитывается при скорости передачи выше 10 Гбит/с. Если результирующая дисперсия превысила допустимую, то необходима компенсация дисперсии. Для хроматической дисперсии это реализуется это как правило установкой компенсирующего волокна с отрицательной дисперсией. Для ПМД на нынешнем этапе развития не существует эффективных способов компенсации дисперсии, поэтому она учитывается в виде штрафа для ООСШ.

В общем виде ООСШ на выходе линейного тракта оценивается выражением:

$$\text{ООСШ}_{\text{ПР}}^* = 10 \lg \frac{P_C}{P_{\text{ш.пд}} + \sum P_{\text{ш.у}}} - \Delta_{\text{ни}} - \Delta_{\text{д}} - \Delta_{\text{м}} - \Delta_{\text{мв}} - \Delta_{\text{нд}}, \text{ дБ},$$

где P_C – мощность сигнала на выходе оптического линейного тракта, мВт;

$P_{\text{ш.пд}}$ – шум оптического передатчика, мВт;

$\sum P_{\text{ш.у}}$ – суммарный шум оптических усилителей, мВт;

$\Delta_{\text{ни}}$ – штраф оптической мощности, связанный с нелинейными искажениями, возникающими в оптическом волокне при распространении сигнала, дБ;

$\Delta_{\text{д}}$ – штраф оптической мощности, вызванный некомпенсированной дисперсией, дБ;

$\Delta_{\text{м}}$ – штраф оптической мощности, обусловленный видом модуляции оптической несущей, дБ;

$\Delta_{\text{мв}}$ – штраф оптической мощности, учитывающий межканальное перекрестное влияние, дБ;

$\Delta_{\text{нд}}$ – штраф оптической мощности из-за некогерентности детектирования, дБ.

Другие, более точные оценки по видам происхождения шумов в настоящее время неизвестны.

Любая система передачи строится с учетом требуемого качества функционирования, который выражается вероятностью ошибки по битам. В четвертом разделе выведены выражения для оценки вероятности ошибки через

ЭОСШ на выходе фотодетектора. Вероятность ошибки зависит от формата модуляции, поэтому в разделе приведены формулы для вероятности ошибки наиболее применяемых на современном этапе развития ВОСП форматов модуляции (модуляции по интенсивности, M-QAM и MPSK). Показано, что повышение формата модуляции предъявляет более высокие требования к ЭОСШ для MPSK. В связи с этим перспективным направлением по повышению эффективности ВОСП является развитие и совершенствование M-QAM модуляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продолжающийся рост потребностей в широкополосных услугах телекоммуникационной среды требует дальнейшего развития транспортных сетей связи на всех участках (магистральных, внутризональных, местных). Одним из первых этапов разработки и внедрения ВОСП является моделирование. Правильная модель позволит на стадии проектирования системы выявить сильные и слабые стороны, проверить сеть на гибкость, оценить устойчивость к изменениям исходных данных, которые могут возникнуть на стадии внедрения.

Существует большое количество методов и реализаций ВОСП, что показала проведенная классификация. Выделенные основные классификационные признаки, которые помогают определить объект исследования, позволяют описать любую проектируемую либо эксплуатируемую волоконно-оптическую систему передачи.

В работе разработана математическая модель линейного тракта высокоскоростной ВОСП со спектральным разделением каналов, т.к. системы с данным видом уплотнения на современном этапе развития волоконно-оптических технологий получили широкое распространения.

Получены математические выражения для оценки ООСШ, выявлены компоненты ВОЛС, которые оказывают наибольшее влияние на результирующее ООСШ. Совершенствование элементной базы оптического линейного тракта (оптические транспондеры, усилители, мультиплексоры и т.д.) требует постоянной оценки их влияния на системы передачи. Полученные результаты помогут определить, какой выигрыш в ООСШ даст внедрение тех или иных решений, и сделать вывод, насколько целесообразным и эффективным будет их использование. Этот вопрос наиболее остро стоит на протяженных магистральных волоконно-оптических линиях связи.

Особое внимание уделено способам детектирования оптических сигналов, т.к. на сегодняшний день это область, в которой есть существенный резерв в развитии. Когерентные методы приема позволяют использовать

высокоформатные виды модуляции, обеспечивают выигрыш в 10 – 15 дБ по сравнению с непосредственным детектированием, имеют малую чувствительность когерентного приема к нежелательному фоновому излучению. При достаточной мощности гетеродина когерентные методы приема позволяют достичь квантового предела детектирования оптического сигнала.

Недостатком когерентного приема является техническая сложность обеспечения согласования волновых фронтов и поляризации на поверхности фотодиода принимаемого излучения и излучения гетеродина. В настоящее время для смешивания сигнала и гетеродина используются устройства интегральной оптики. Высокие требования предъявляются к стабильности частот и фаз несущих частот источника излучения и гетеродина.

Предложенная методика для расчета тракта высокоскоростной оптической системы передачи позволяет оценить вероятность ошибок в точке принятия решения при заданных условиях и характеристиках компонентов ВОСП.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1-А Тарченко, Н.В. Сравнительный анализ способов построения оптических приемников в цифровых волоконно-оптических системах передачи / В.Н. Тарченко, Ю.С. Мойсевич // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы междунар. науч.-техн. семинара. – Минск : БГУИР, 2018 – С. 47 – 52.

2-А Тарченко, Н.В. Сравнительный анализ методов детектирования оптических сигналов / Н.В. Тарченко, Ю.С. Мойсевич // Современные средства связи: материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : Белорусская государственная академия связи, 2018 – С. 31 – 33.