

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

УДК _____

Бушило
Виктор Николаевич

Кодирование и модуляция в высокоскоростных оптических системах передачи

АВТОРЕФЕРАТ

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

(подпись магистранта)

Научный руководитель
Тарченко Надежда Владимировна
к.т.н., доцент

(подпись руководителя)

Минск 2020

КРАТКОЕ ВЕДЕНИЕ

В современных условиях по инфокоммуникационным сетям передаются большие объемы информации, которые должны передаваться по сети с соответствующим качеством. Для увеличения пропускной способности используются оптические компоненты и технологии, в том числе и спектральное разделение каналов. При этом постоянно увеличивается скорость передачи информации на отдельной длине волны за счет использования разнообразных методов модуляции. В процессе проектирования инфокоммуникационных сетей и оптических линейных трактов необходимо знать, как выбор кодирования и модуляции линейного сигнала влияет на протяженность участка регенерации.

Выбор оптимальных методов кодирования и модуляции в высокоскоростных оптических системах передачи основан на обеспечении эффективного использования спектральных каналов в системах спектрального разделения каналов и снижении чувствительности информационных сигналов к искажениям из-за дисперсии или нелинейности.

Целью данной магистерской диссертации является исследование и сравнительный анализ методов кодирования и модуляции в высокоскоростных оптических системах передачи.

Для достижение поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- провести анализ видов кодирования в высокоскоростных оптических системах передачи;
- провести анализ видов модуляции в высокоскоростных оптических системах передачи;
- разработать математические модели, позволяющие с единых позиций оценить характеристики линейного сигнала при различных видах модуляции и кодирования;
- разработать программный продукт по моделированию линейных сигналов при различных видах модуляции и кодирования.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель работы. Целью работы является исследование и сравнительный анализ методов кодирования и модуляции в высокоскоростных оптических системах передачи.

Задачи работы. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проведен анализ видов кодирования в высокоскоростных оптических системах передачи;

- проведен анализ видов модуляции в высокоскоростных оптических системах передачи;

- разработаны математические модели, позволяющие с единых позиций оценить характеристики линейного сигнала при различных видах модуляции и кодирования;

- разработан программный продукт по моделированию линейных сигналов при различных видах модуляции и кодирования.

Приоритетные направления научных исследований. Работа выполнялась в рамках Государственной программы инновационное развитие Республики Беларусь на 2016 – 2020 годы, пункт 15.2, подпрограмма «Инфраструктура информатизации», утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 23 февраля 2016 г. № 148.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в том, что основные результаты по анализу, выбору и программной реализации различных методов модуляции и кодирования были получены лично соискателем. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем.

Апробация работы и внедрение результатов. Результаты исследования были представлены на международной научно-практической конференции «Кодирование и цифровая обработка сигналов в инфокоммуникациях» 2020 года, 55 и 56-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР 2019 и 2020 годов. Результаты магистерской диссертации могут быть использованы в учебном процессе и для расчета характеристик линейного тракта при проектировании высокоскоростных оптических систем.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Кодирование в высокоскоростных оптических системах передачи

В оптических системах передачи линейный цифровой сигнал является двухуровневым. Логической «1» соответствует импульс излучения, а логическому «0» – отсутствие импульса излучения

Элементом линейного сигнала является видеоимпульсный сигнал, представляющий сочетание видеоимпульсов и пауз внутри тактового интервала T , рисунок 1. Если принять, что импульсы имеют прямоугольную форму, их длительность равна T или $T/2$, передний фронт совпадает с началом или серединой тактового интервала, а амплитуда равна A , то для оптического линейного тракта возможное число разнотипных элементов видеоимпульсных сигналов $S_k(t)$ будет равно четырем.



Рисунок 1 – Элементы видеоимпульсных сигналов линейного кода цифровой волоконно-оптической системы передачи

Основными видами кодирования являются коды без возврата к нулю (Non Return to Zero, NRZ), с возвратом к нулю (Return to Zero, RZ). При формировании кодов NRZ и RZ меняется амплитудное значение, но остается неизменной фаза импульсов

Код без возврата к нулю относится к безыбыточным кодам, формируемым с использованием элементов видеоимпульсного сигнала, представленных на рисунке 1, $S_1(t)$ для кодирования «1» исходной двоичной последовательности и $S_4(t)$ для кодирования «0» исходной двоичной последовательности соответственно.

Преимуществом формата NRZ является большая спектральная эффективность по сравнению с RZ. При этом системы линейного кодирования с возвратом к нулю RZ являются гораздо более устойчивыми к поляризационной модовой дисперсии первого порядка, вносимой дифференциальной групповой задержкой и, следовательно, более подходящими для высокоскоростной передачи сигналов на сверхдальние расстояния.

Еще одним преимуществом формата RZ является более высокая устойчивость к нелинейности волокна. Эту особенность можно объяснить тем

фактом, что, когда импульс изолирован (в отличие от NRZ), каждый «1» символ не зависит от своих соседей. В NRZ, последовательности «1» порождают непрерывные пакеты световых сигналов, нестабильных при нелинейном распространении в периферии.

Наилучшим из альтернативных видов кодирования является chirпированный код с возвратом к нулю (Chirped Return to Zero, CRZ). Недостатком данного кода в более широком спектре, чем у RZ-сигнала, что ограничивает максимально достижимую спектральную эффективность и, таким образом, пропускную способность. Данный формат получил широкое распространение в 10 Гбит/с подводных системах.

Формат с возвратом к нулю с подавленной несущей (Carrier Suppressed RZ, CSRZ) в свою очередь не очень эффективен против внутриканальных нелинейных эффектов.

Таким образом, целесообразно осуществить программную реализацию форматов NRZ и RZ для сравнительного анализа характеристик тракта передачи с использованием различных форматов кодирования.

Модуляция в высокоскоростных оптических системах передачи

При многоуровневом амплитудном кодировании (Amplitude Shift Keying, ASK) вместо передачи оптических сигналов единичной амплитуды с периодом $T = 1/B$ (что характерно для бинарных форматов) можно передавать сигналы, принимающие M значений, с интервалом $T_N = N/B = (\log_2 M)/B$, сохраняя скорость передачи информации. Так как длительность импульса увеличилась от $T = 1/B$ до $T_N = N/B$, спектр (точнее, расстояние между первыми нулями в спектре) передаваемого (прямоугольного) импульса уменьшился от $2B$ до $2B/N = 2B/\log_2 M$. Четырехуровневый сигнал позволит в 2 раза увеличить спектральную эффективность, при этом либо увеличить в 2 раза скорость передачи, сохранив неизменной ширину спектра сигнала, либо уменьшить в 2 раза этот спектр, сохранив скорость передачи. В первом случае в DWDM-системе можно сохранить число каналов, увеличив скорость передачи по каждому из них, во втором случае, сохранив B неизменной, можно увеличить число каналов и дальность передачи без использования компенсации хроматической дисперсии. Уменьшение ширины спектра сигнала позволяет уменьшить мощность шумов, но из этого не обязательно следует увеличение дальности передачи, так как разность значений мощности между сигналами с близкими значениями символов уменьшается (появляются дополнительные возможности закрывания «зрачков» глаз-диаграммы). Преимущества многоуровневых форматов наиболее заметны в локальных системах связи (LAN) на основе многомодового волокна, где ограничения скорости и дальности передачи определяются межмодовой дисперсией.

В отличие от рассмотренных выше форматов, в DPSK информация содержится в разности фаз между двумя последовательными импульсами, при

этом мощность излучения информации не несет. Экспериментальные исследования показали, что при скорости передачи 40 Гбит/с DPSK-сигналы удавалось передать на большие расстояния с меньшими потерями, чем сигналы в других форматах. Однако в этом случае необходимы дорогие терминалы.

Применение популярных ASK-форматов при постоянном росте количества передаваемой информации препятствует дальнейшему увеличению пропускной способности линий передачи, потому что частота модуляции электрического сигнала ограничена величиной 40 Гбит/с. Кроме того, высокоскоростная бинарная модуляция характеризуется низкой спектральной эффективностью и меньшей устойчивостью к дисперсии. В какой-то степени эти проблемы решает многоуровневое кодирование сигналов, например, четырехуровневые форматы ASK и PSK. Однако реализация четырехуровневой схемы очень сложна. Увеличение числа уровней значений приводит к тому, что он хуже распознается приемником из-за плохого раскрытия глаз-диаграммы. Наиболее действенным способом увеличения спектральной эффективности является использование многоуровневой амплитудно-фазовой модуляции, при которой информация кодируется как амплитудой, так и фазой сигнала. Иногда для обозначения амплитудно-фазовой модуляции используется термин «квадратурная модуляция» ASK-QPSK.

Таким образом, целесообразно осуществить программную реализацию форматов RZ-DPSK, NRZ-ASK-QPSK и RZ-ASK-QPSK для сравнительного анализа характеристик тракта передачи с использованием различных форматов модуляции.

Модулятор Маха-Цендера и его математическое описание

Электрооптический модулятор Маха-Цендера предназначен для модуляции излучения мощного оптического лазера. Структурная схема данного модулятора представлена на рисунке 2. Непрерывное излучение лазера E_0 Y-разветвителем направляется по двум каналам (плечам интерферометра). Далее в каждом из каналов Y_1 и Y_2 непрерывное световое излучение попадает в фазовые модуляторы, которые позволяют изменять показатель преломления волновода пропорционально напряжению U_1 и U_2 . На выходе сдвинутые по фазе сигналы складываются в процессе интерференции, получая E_{out} .

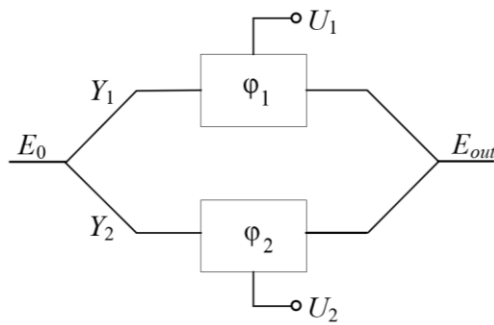


Рисунок 2 – Схема модулятора Маха-Цендера

Выходное значение E_{out} принимает следующий вид:

$$E_{out} = \frac{E_0}{2} \left(e^{j\varphi_1(t)} + e^{j\varphi_2(t)} \right),$$

где E_0 – входное оптическое излучение; φ_1 и φ_2 – сдвиги фаз в верхнем Y_1 и нижнем Y_2 плечах.

Формирование фазового сдвига связано с изменением управляющего напряжения:

$$\varphi_1(t) = \frac{U_1}{V_{\pi 1}} \pi, \varphi_2(t) = \frac{U_2}{V_{\pi 2}} \pi.$$

Существует два режима работы модулятора Маха-Цендера. В режиме «push-push» в обоих плечах модулятора формируется одинаковый фазовый сдвиг $\varphi(t) = \varphi_1(t) = \varphi_2(t)$ (например, при $U_1(t) = U_2(t) = U(t)$ и $V_{\pi 1} = V_{\pi 2} = V_{\pi}$), что позволяет осуществлять фазовую модуляцию. При этом амплитуда входного сигнала не изменяется. В режиме «push-pull» обоих плечах формируется одинаковый по величине, но разный по знаку фазовый сдвиг $\varphi_1(t) = -\varphi_2(t)$ (например, при $U_1(t) = -U_2(t) = U(t)/2$ и $V_{\pi 1} = V_{\pi 2} = V_{\pi}$), что приводит к чистой амплитудной модуляции.

Разработка программного продукта для расчета (оценки) характеристик линейных сигналов

Для удобства исследования и модификации программного продукта была выбрана среда программирования Matlab, преимуществом которой является наличие большого объема встроенных библиотек математических функций с открытым кодом и детальной документацией к ним, что позволяет легко адаптировать программу при изменении версии интерпретатора Matlab.

Разработаны алгоритмы работы программ, реализующих модуляции: NRZ, RZ, RZ-DPSK, NRZ-ASK-QPSK, RZ-ASK-QPSK. Основными блоками

разработанных алгоритмов являются блок ввода данных, генерации исходного сигнала, модулятор MZ в различных режимах работы, вычисление спектра, вычисление глаз-диаграммы.

Программный продукт реализован в виде библиотеки файлов-сценариев, которые будут безошибочно скомпилированы любой версией интерпретатора Matlab. Программный продукт включает следующие файлы-сценарии: nrz_mzm.m, rz_mzm.m, dpsk_mzm.m, qpsk_ask_nrz.m, qpsk_ask_rz.m. Файл nrz_mzm.m реализует математическое моделирование передатчика высокоскоростного оптического NRZ-сигнала с использованием модулятора MZ. Файл rz_mzm.m реализует математическое моделирование передатчика высокоскоростного оптического RZ-сигнала с использованием двух модуляторов MZ. Файл dpsk_mzm.m реализует математическое моделирование передатчика высокоскоростного оптического DPSK-сигнала с использованием двух модуляторов MZ. Файл qpsk_ask_nrz.m реализует математическое моделирование передатчика высокоскоростного оптического QPSK-ASK-NRZ-сигнала с использованием трех модуляторов MZ. Файл qpsk_ask_rz.m реализует математическое моделирование передатчика высокоскоростного оптического QPSK-ASK-RZ-сигнала с использованием четырех модуляторов MZ.

Разработанный программный продукт позволяет построить графики информационного сигнала, высокоскоростного модулированного сигнала, спектры исходного и модулированного сигнала, глаз-диаграмму модулированного сигнала, что позволяет оценить характеристики линейных сигналов в высокоскоростном оптическом тракте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения магистерской работы проведено исследование и сравнительный анализ методов кодирования и модуляции в высокоскоростных оптических системах передачи.

Проведен анализ видов кодирования в высокоскоростных оптических системах передачи: NRZ, RZ с различными процентами заполнения.

Проведен анализ видов модуляции в высокоскоростных оптических системах передачи: NRZ-DPSK, RZ-DPSK, NRZ-ASK-QPSK, RZ-ASK-QPSK, P-DPSK, NRZ-DQPSK, RZ-DQPSK, DP-QPSK, O-OFDM SCM, OPFDM-DQPSK.

Рассмотрен принцип работы модулятора Маха-Цендера как основного элемента передатчика высокоскоростных оптических сигналов.

Разработаны математические модели модулятора Маха-Цендера, передатчиков с использованием NRZ и RZ кодирования, RZ-DPSK, NRZ-ASK-QPSK, RZ-ASK-QPSK модуляции, позволяющие с единых позиций оценить характеристики линейного тракта.

Разработана программная реализация выбранных методов кодирования и модуляции, позволяющая оценить характеристики передаваемых высокоскоростных оптических сигналов в линейном тракте. Полученные экспериментальные данные соответствуют теоретическим сведениям.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Бушило В.Н., Тарченко Н.В. Модулятор Маха-Цендера // Международная научно-практическая конференция «Кодирование и цифровая обработка сигналов в инфокоммуникациях», Минск, март – апрель 2020. (в печати)

2. Бушило В.Н. Модулятор Маха-Цендера // 56-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР, Минск, 2020. (в печати)

Библиотека БГУИР