

Предисловие

Постоянно растущий спрос как на традиционные, так и на новые услуги связи предъявляют новые требования к современным сетям связи и качеству предоставляемых услуг. В свою очередь, совершенствование телекоммуникационного оборудования и развитие на его основе современных сетей связи приводит к значительным капитальным затратам на создание таких сетей. В связи с этим вопросы планирования построения современных телекоммуникационных сетей различного масштаба приобретают актуальность и особую значимость.

В настоящее время любые решения, связанные с проектированием волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), принимаются по итогам оценки их экономической эффективности. При этом очень редко удаётся осуществить оптимальное проектирование и найти наиболее эффективное решение поставленных задач. Оценка проектов ВОЛС, подверженных влиянию различных факторов, учёт неопределённости и, как следствие, их экономическая эффективность напрямую зависят от выбора математической модели. Правильное обоснование и грамотный выбор математической модели позволяют не только обеспечить приемлемую формализацию неопределённости, но и принимать оптимальные решения при управлении реальными инвестиционными процессами.

Планирование сетей подразумевает определённую последовательность и этапность принятия организационно-технических решений по выбору архитектуры, топологии, структуры, базовых технологий, аппаратуры и волоконно-оптических кабелей на основе некоторых принципов и технических требований к цифровой сети. Рекомендации по оптимизации указанных решений в условиях неопределённости являются основным предметом рассмотрения представленной вниманию читателей книги.

Стоимость сети, безусловно, является одним из главных факторов при её планировании. Однако окончательное решение необходимо принимать на основании соотношения стоимости и производительности, отдачи сети, достигая её максимальной эффективности.

В работе выбор элементов сети проводится на основе показателя эффективности NPV (Net Present Value, чистой текущей стоимости,

ЧТС). Необходимые сведения по данному и другим показателям, оценивающим эффективность проекта, представлены в Приложении 1.

Метод NPV признан основным инструментом оценки среди всех способов принятия инвестиционных решений ещё в прошлом веке. Однако взгляды на него претерпели серьёзные изменения и, прежде всего, в вопросе оценки неопределённости. Изменился общий подход к анализу неопределённости как составной части процесса принятия инвестиционных решений. При определении NPV, т. е. стоимости проекта, необходимо учитывать, какие возможности он открывает перед акционерами и менеджерами. Если один проект даёт возможность руководству действия по строго определённом курсу, то другой — обеспечивает возможность манёвра принятия решений в будущем, когда появится больше информации. Теория оценки опционов предоставляет в распоряжение менеджеров методы количественной оценки гибкости проекта.

Авторы выражают благодарность и признательность рецензентам и всем, принявшим участие в обсуждении книги. Авторы с благодарностью примут замечания и предложения по содержанию и оценке монографии.

1 Эволюция и перспективы развития ВОЛС

1.1. Эволюция ВОЛС

ВОЛС ведут свой отсчёт, начиная с 70-х годов прошлого века, когда впервые были созданы оптические волокна (ОВ), представляющие собой двухслойные цилиндрические кварцевые нити, состоящие из сердцевины и оболочки (диэлектрические волноводы). Световая энергия распространяется в сердцевине оптического волокна, испытывая полное внутреннее отражение на границе с оболочкой за счёт разных коэффициентов преломления материалов, из которых изготовлено ОВ.

В своём развитии ВОЛС прошли несколько этапов, на каждом из которых решались свои фундаментальные проблемы.

Начальный этап история оптической связи включает следующие даты:

1970–1973 гг. — американская компания Corning Glass Company осваивает производство оптического волокна с затуханием менее 20 дБ/км. Ж.И. Алфёров разработал полупроводниковый лазер, работающий при комнатной температуре. Получены лазерные диоды со сроком службы 1000 часов;

1974 г. — разработано градиентное многомодовое волокно;

1976 г. — открыто третье окно прозрачности ОВ на длине волны $\lambda_3 = 1,55$ мкм. Срок службы лазеров увеличен до 100 000 часов (10 лет).

В развитии оптических систем разработчики стремились реализовать два принципа: «быстрее» и «дальше» [1]. Если второй принцип связан с решением проблемы затухания сигнала в волокне, то первый принцип — с дисперсией (расширением) оптического сигнала по мере его распространения по направляющей среде.

Первые световоды были многомодовыми. В многомодовых оптических волокнах (МОВ) одновременно распространяется большое число мод — лучей, введённых в сердцевину ОВ (диаметры сердцевины многомодовых волокон в настоящее время составляют 50 и 62,5 мкм). Основным недостатком такого волокна является наличие

межмодовой дисперсии, возникающей из-за того, что разные моды проделывают в волокне разный оптический путь. В результате оптический импульс на выходе значительно расширяется во времени относительно входного импульса, что препятствует передаче импульсных последовательностей с высокими скоростями из-за межсимвольной интерференции (наложения) сигналов. Эта проблема была отчасти решена разработкой многомодовых волоконных световодов с градиентным профилем показателя преломления (ППП).

Первые оптические линии связи работали с системами передачи плезиохронной цифровой иерархии (ПЦИ, или PDH). В качестве типовых цифровых трактов PDH в России используются следующие уровни европейской иерархической системы:

- первичный уровень — скорость передачи 2,048 Мбит/с;
- вторичный уровень — скорость передачи 8,448 Мбит/с;
- третичный уровень — скорость передачи 34,368 Мбит/с;
- четверичный уровень — скорость передачи 139,264 Мбит/с.

Дальнейшая эволюция ВОЛС связана с одномодовым этапом развития оптических сред передачи (диаметр сердцевин одномодовых оптических волокон — до 10 мкм).

Диаметр сердцевин, соизмеримый с длиной волны передаваемого сигнала, и соотношение показателей преломления сердцевин и оболочки выбраны таким образом, что в ней (сердцевине) может распространяться только одна мода (строго говоря, две моды с взаимно ортогональными состояниями поляризации). Значительное уменьшение размеров сердцевин потребовало совершенствования технологии производства волокна и, следовательно, повышения его себестоимости. Однако по мере развития технологии и со стремительным увеличением объёма производства одномодовых волокон (за счёт эффекта на масштабе) себестоимость их производства в настоящее время ниже, чем многомодовых. Остается преимущество МОВ в монтаже систем связи.

Одномодовые ОВ позволили значительно повысить за счёт отсутствия межмодовой дисперсии скорость передачи информации:

1981 г. — получена скорость передачи сигнала 140 Мбит/с, соответствующая четверичному уровню цифровой иерархии, на $\lambda_2 = 1,31$ мкм (во втором окне прозрачности) в одномодовом ОВ;

1982 г. — скорость передачи в одномодовом волокне ($\lambda_2 = 1,31$ мкм) достигла 400 Мбит/с.

Переход в третье спектральное окно прозрачности ($\lambda_3 = 1,55$ мкм) дал возможность снизить потери в одномодовых ОВ до 0,2 дБ/км.

Параллельно с развитием оптических направляющих сред совершенствовались цифровые системы передачи — появились технологии SDH, ATM. Системы синхронной цифровой иерархии (SDH) стандартизованы в соответствии с Рекомендациями МСЭ-Т и обеспечивают образование синхронных транспортных модулей (STM) со скоростями: STM-1 — 155,52 Мбит/с; STM-4 — 622 Мбит/с; STM-16 — 2,488 Гбит/с; STM-64 — 9,953 Гбит/с; STM-256 — 39,813 Гбит/с.

Однако увеличению скорости передачи в одномодовых системах препятствует *хроматическая дисперсия* (ХД) в волокнах. ХД, являясь внутримодовой дисперсией, возникает из-за того, что скорость распространения волны меняется при изменении длины волны. Любой источник генерирует сигнал не на одной длине волны (λ), а в определённом спектральном диапазоне ($\Delta\lambda$). В результате различные спектральные составляющие передаваемого сигнала имеют разную скорость распространения, что приводит к их различной задержке на выходе волокна.

Дальнейшее развитие систем оптической связи обусловило создание нескольких типов одномодовых ОВ, которые можно классифицировать по критерию «*хроматическая дисперсия*». Различают стандартные одномодовые волокна (SM), волокна со смещённой дисперсией (DS) и волокна с ненулевой смещённой дисперсией (NZDS).

Длина волны нулевой дисперсии в DS-волокнах лежит в третьем окне прозрачности ($\lambda_3 = 1,55$ мкм).

Для увеличения дальности передачи информации использовались регенераторы сигнала, которые преобразовывали оптический сигнал в электрический, восстанавливали его форму, а затем формировали оптический сигнал для дальнейшей трансляции по волокну.

Следующий этап — использование оптических усилителей (ОУ). ВОЛС с ОУ и волокном G.653 позволили обеспечить скорость передачи информации 40 Гбит/с на расстояние до 100 км и выше.

Оптические усилители открыли качественно новый этап в развитии ВОЛС — появились системы со спектральным уплотнением по технологии WDM — Wavelength Division Multiplexing. В этой технологии применён метод волнового мультиплексирования, который предусматривает объединение на передающем конце линии передачи нескольких оптических несущих ($\sum \lambda_i$), передачи их одновременно по одному ОВ с последующим выделением (демультиплексированием) этих несущих на приёмном конце. Таким образом, линейный тракт как бы делится одновременно на несколько линейных трактов, каждый из которых образован своей несущей λ_i . Основные даты рассматриваемого этапа:

1993 г. — начало практического использования оптических усилителей;

1995 г. — начало практического использования волоконно-оптических систем со спектральным уплотнением;

1997 г. — разработка оптических мультиплексоров адресного ввода-вывода.

Первые системы WDM работали в разных спектральных окнах (втором, $\lambda_2 = 1,31$ мкм, и третьем, $\lambda_3 = 1,55$ мкм). Но системы со спектральным уплотнением более целесообразно использовать в одном окне прозрачности, так как в этом случае один ОУ усиливает все информационные каналы, расположенные в этом окне. В настоящее время используются пять оптических диапазонов:

О — первичный диапазон (Original) — 1260...1360 нм;

E — расширенный диапазон (Extended) — 1360...1460 нм;

S — коротковолновый диапазон (Short wavelength) — 1460...1530 нм;

C — стандартный диапазон (Conventional) — 1530...1570 нм;

L — длинноволновый диапазон (Long wavelength) — 1570...1625 нм.

Шаг оптических несущих частот регламентирован в рекомендациях МСЭ-Т.

Системы WDM разделяются на системы неплотного спектрального уплотнения (CWDM), плотного спектрального уплотнения (DWDM) и сверхплотного спектрального уплотнения (HDWDM), создание которых осуществлялось уже в начале 2000-х гг. Пропускная способность достигла 1,6 Тбит/с.

Естественный путь повышения эффективности построения волоконно-оптической системы передачи со спектральным уплотнением — увеличение числа λ -каналов и увеличение скорости отдельных каналов. При увеличении дальности передачи приходится усиливать оптические сигналы в каждом λ -канале и при большой суммарной мощности в волокне начинают проявляться нелинейные эффекты. При эффекте четырёхволнового смешения (ЧВС) в спектре полезного сигнала появляются составляющие из других каналов, т. е. перекрёстные помехи. При дешифровании оптических сигналов это приводит к ошибкам в передаче информации. Четырёхволновое смешение наиболее сильно сказывается в случае равенства скоростей распространения оптических сигналов в λ -каналах. Поэтому ОВ со смещённой дисперсией (G.653) не используются в DWDM-системах. Для уменьшения влияния ЧВС были разработаны волокна со смещённой ненулевой дисперсией (G.655).

На скоростях более 10 Гбит/с появляется проблема, связанные с ещё одним видом дисперсии — *поляризационно-модовой дисперсией* (ПМД, PMD).

Как уже указывалось, в одномодовых ОВ одновременно распространяются две ортогонально поляризованные моды. В волокне с идеально оптически круглой симметричной сердцевинкой обе эти моды распространяются с одинаковыми скоростями. Однако в реально производимых волоконных световодах из-за неизбежной асимметрии сердцевинки, а также внутренних напряжений в ОВ рассматриваемые моды имеют разные скорости распространения, что и приводит к PMD. Решение этой проблемы потребовало новых мероприятий в области изготовления волокон, их монтажа и эксплуатации ВОЛС.

Важным этапом эпохи принципиального совершенствования стандартного оптического волокна была разработка в 1998 году ОВ «без пика воды» — Zero Water Peak, в результате чего у волокна G.652, работавшего ранее только в диапазоне длин волн 1310 и 1550 нм, появилось возможность осуществлять передачу в диапазоне от 1270 до 1625 нм [2]. Данный результат был закреплён в новых редакциях рекомендации G.652 (после 2000 года) введением новых категорий C/D, отличающихся от предыдущих A/B тем, что они содержат требования к максимально допустимому затуханию на «пике воды» (1383 нм), которое не должно превышать 0,4 дБ/км. Сами категории C и D отличаются между собой только требованиями к ПМД.

Были созданы также специальные конструкции волокна без легирующих добавок в сердцевине с коэффициентом затухания менее 0,15...0,16 дБ/км на длине волны 1550 нм (класс ULL — Ultra Low Loss — сверхнизкое затухание). Производство таких волокон остаётся весьма дорогим и требует высокой технологичности изготовления.

Ещё одним направлением улучшения стандартного ОВ в последние годы является придание им меньшей чувствительности к изгибам. Рекомендация G.657 относится к классу волокон, малочувствительных к изгибам. Такие ОВ особенно востребованы на сетях доступа.

Экспоненциальный рост потребности в скорости и объёме получения информации, особенно с развитием Интернета, ставил в новом тысячелетии перед операторами связи задачу увеличения пропускной способности их опорных WDM-систем. Для решения этой проблемы существуют два пути: уменьшать расстояния между канала-

ми и увеличивать канальную скорость. Второй путь — экономически более перспективен [3], так как увеличение канальной скорости приводит к снижению стоимости и уменьшению энергии, затрачиваемой на передачу единицы информации по сравнению с первым вариантом.

В оптических системах связи со скоростями до 10 Гбит/с включительно использовались бинарные амплитудные форматы модуляции. Однако при увеличении канальной скорости до 40 Гбит/с потребовалось внедрение новых, более эффективных форматов модуляции. Наиболее перспективными оказались те, которые используют *когерентное детектирование* [4]. Однако когерентные приёмники и передатчики достаточно дороги и их использование было экономически оправдано в системах с канальной скоростью 100 Гбит/с.

Что касается межканального расстояния (МКР), то при МКР, равном 50 ГГц, в DWDM-системах можно использовать 80 спектральных каналов в стандартном С-диапазоне. В этом случае получаем скорость передачи информации 8 Тбит/с по одному ОВ при канальной скорости 100 Гбит/с. Важно отметить, что когерентный приём и цифровая обработка сигналов позволяют отказаться от специальных компенсаторов дисперсии.

В силу больших территорий и относительно незначительной плотности населения в России остро стоит технико-экономическая задача увеличения протяжённости ВОЛС без использования регенерации. Протяжённость линий связи DWDM определяется требуемым отношением сигнал/шум оптического сигнала (OSNR), обеспечивающим уровень ошибок, не превышающий допустимый. Поэтому ключевым параметром экономичности транспондеров является требуемое OSNR, обеспечивающее работу систем связи с заданным качеством [5].

В конце 2000-х — начале 2010-х гг. происходило внедрение когерентных систем связи с цифровой обработкой сигналов.

Выводы. Прошло пятьдесят лет с момента появления первых ВОЛС. Согласно волновой теории русского экономиста Н.Д. Кондратьева — это срок одной длинной конъюнктурной волны в экономическом развитии общества. Развитие ВОЛС пришлось на пятый технологический уклад (ТУ) и включает в себя несколько этапов. Каждый этап сопровождался совокупностью базисных инноваций.

Первый этап связан с появлением оптического (ступенчатого, а затем градиентного) многомодового волокна. В качестве систем передачи использовались СП плезиохронной цифровой иерархии.