

Почему волоконная оптика не заменит кабели из витых пар в обозримой перспективе

Семенов Андрей Борисович, д.т.н., директор по науке ООО СУПР,
профессор кафедры Автоматизации, механизации и роботизации в
строительстве и кафедры Многоканальных телекоммуникационных систем
МТУСИ

Саранск, 21 октября 2025 года

Вместо эпиграфа

“Мы следуем за рынком”

С.Г. Акопов, технический директор представительства Corning в Москве

Богу - богово, кесарю – кесарево (вариант “Кесарю - кесарево, а Божие – Богу”)

Каждому своё (лат. *suum cuique* [сúум кúйкўэ] — всякому своё, каждому по его заслугам) — классический принцип справедливости. В новейшее время фраза получила известность как надпись, сделанная нацистами над входом в концентрационный лагерь Бухенвальд. В современном использовании, особенно в Германии и оккупированных ею во время Второй мировой войны странах, фраза воспринимается преимущественно с негативным оттенком,

Основной смысл приведенных утверждений применительно к сложным техническим системам (кабель из витых пар в основной массе случаев применяется в составе сложных технических систем) заключается в том, что перед применением какого-либо технического решения его необходимо обязательно проконтролировать на целесообразность.

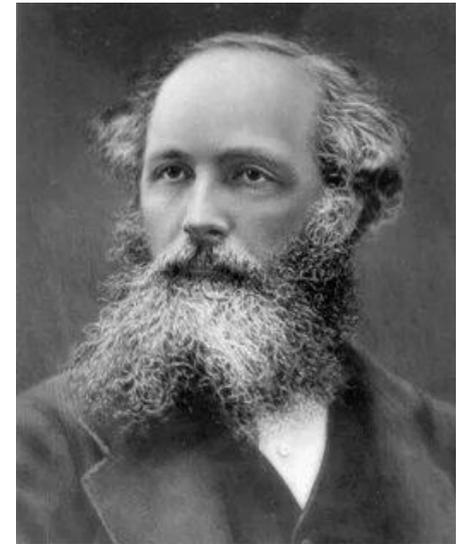
Объективность появления и широкого коммерческого использования ВОСП – 1(2)

Телекоммуникации – передача информации от точки А до точки В (в простейшем случае) с помощью электромагнитных сигналов, которые берут на себя функции ее переносчика. Для выполнения передачи осуществляется преобразование исходного сообщения в первичные электрические сигналы, которые затем тем или иным способом доставляются на приемный конец. Телекоммуникации традиционно делятся на проводную и радио связь.

Согласно классической электродинамике Максвелла существует ток проводимости и ток смещения, т.е. де-факто любая телекоммуникационная система использует в процессе своего функционирования общие принципы.

При функционировании телекоммуникационного оборудования, использующего для передачи сигнала ток проводимости, часть энергии тока неизбежно тратится на разогрев медного проводника. Таким образом, такие системы принципиально не могут быть бесконечно “дальнобойными”, т.е. доставлять сигнал от передатчика к его получателю без его дополнительного периодического восстановления. Под восстановлением в данном случае понимается усиление и компенсация амплитудно-частотных искажений в аналоговых системах, регенерация, которая наряду с усилением включает в себя также полное или частичное (частичная регенерация) восстановление формы в цифровых и т.д.

Периодичность указанного восстановления зависит от ряда факторов, в т.ч. от типа направляющей системы электромагнитных колебаний (кабельные системы), а также состояния среды распространения радиосигнала и т.д.



Джеймс Максвелл
(1831–1879)

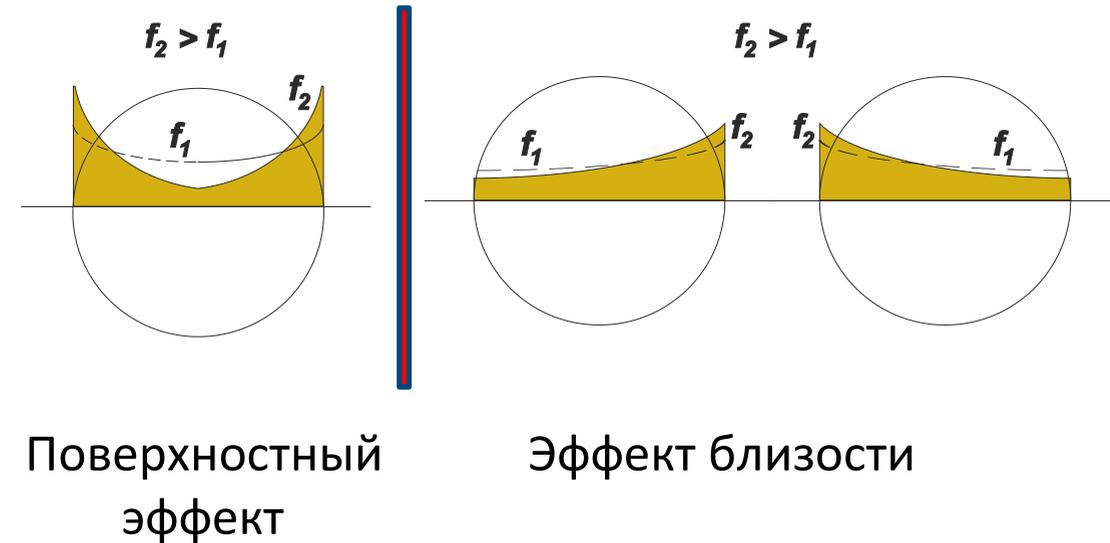
Объективность появления и широкого коммерческого использования ВОСП – 2(2)

По мере роста скоростей передачи и расширения спектра сигнала в случае применения систем передачи с использованием в линейной части токов проводимости проблемы, указанные на предыдущем слайде, неизбежно усиливаются из-за двух известных эффектов: поверхностного и близости. Их интенсивность монотонно растет по мере увеличения частоты передаваемого сигнала. Таким образом, традиционные системы на электропроводных кабелях являются относительно узкополосными и их возможности

перестали соответствовать потребностям практики уже к началу 70-х гг. прошлого века.

Выходом из сложившейся ситуации является переход на другие принципы передачи, в которых вместо тока проводимости в роли переносчика информации выступает ток смещения.

Эффективность применения тока смещения без каких-либо вспомогательных средств препятствует принцип Френеля: любой элемент волнового фронта представляет собой центр вторичного возмущения и порождает вторичные сферические волны. Результирующее световое поле в каждой точке пространства будет определяться интерференцией этих волн. Это приводит к неизбежной расходимости излучаемого потока энергии, что из-за конечного размера приемной антенны эквивалентно появлению дополнительных потерь



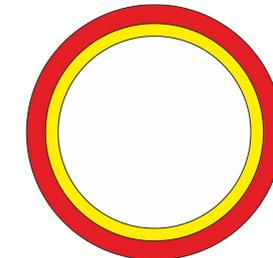
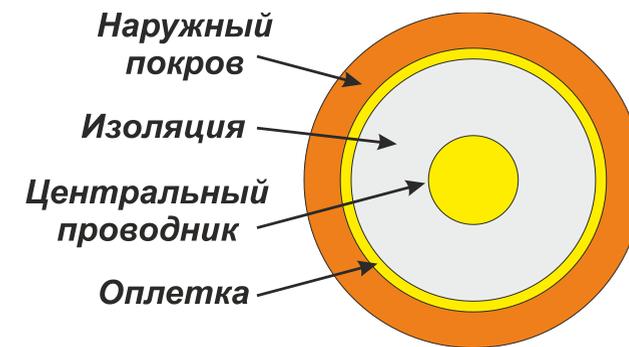
Волноводные линии

Под волноводом понимается устройство, которое ведет волну, в результате она сосредоточена в определенном пространстве и передается в заданном направлении.

Конструктивно волновод представляет трубку круглого или прямоугольного поперечного сечения, которая изготовлена из хорошо проводящего материала (обычно медь). По волноводам электромагнитная энергия передается по таким же принципам, как в воздухе, т.е. с использованием токов смещения. Фактически волновод очень сильно напоминает коаксиальный кабель. Применяется в РРЛ на участке между аппаратурой и антенной.

Волновод можно рассматривать как “вырожденный случай” коаксиального кабеля. При возбуждении в коаксиальном кабеле сильных токов смещения внутренний проводник становится ненужным и начинается распространение энергии по законам волноводной передачи. Для волны типа H_{01} силовые линии не замыкаются на проводящие стенки, т.е. потери перехода энергии в джоулево тепло отсутствуют.

Главный недостаток волновода (частично перешедший в оптические волокна) – сильная зависимость его затухания от деформаций и неоднородностей из-за неустойчивости волны типа H_{01} .



Преимущества и недостатки волоконного световода как среды передачи

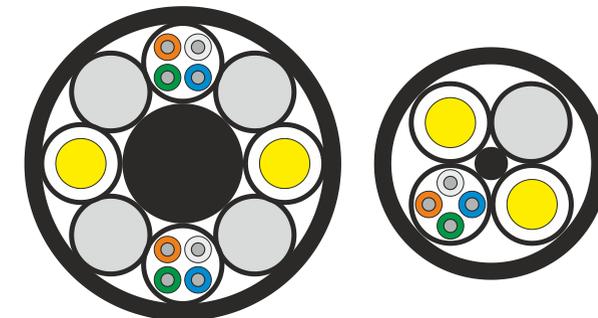
Преимущества

- работа в оптическом диапазоне длин волн, что потенциально по крайней мере на несколько порядков расширяет доступную для использования полосу пропускания и, соответственно, кратно увеличивает скорость передачи данных;
- заметно меньшая рабочая длина волны, что позволяет уменьшить поперечное сечение волокна как волновода и, соответственно, улучшить массогабаритные и гибкость параметры кабеля;
- отсутствие джоулевой составляющей потерь, что значительно снижает общее затухание сигнала в линии;
- потенциальная гальваническая развязка приемника и передатчика.

$$W = \Delta F \cdot \log_2 \left(1 + \frac{C}{\Pi} \right) \text{ бит / с}$$

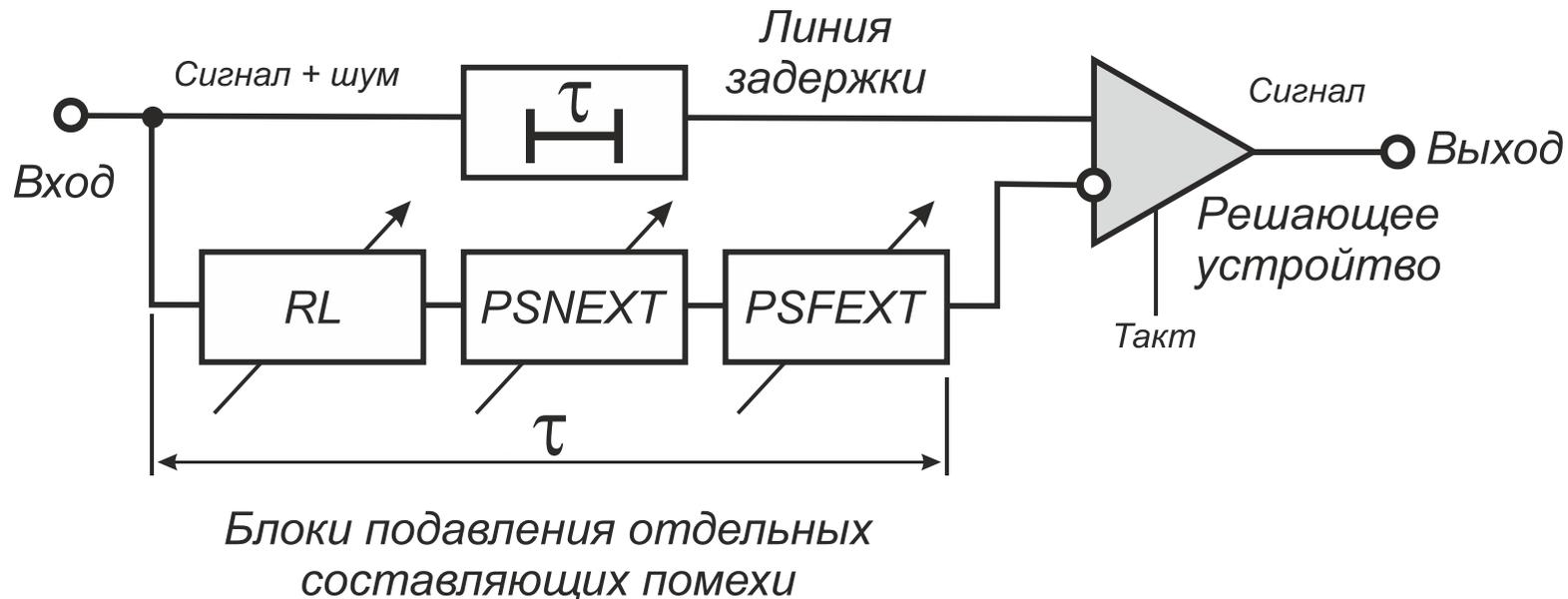
Недостатки

- крайне слабая энергетика;
- заметно меньшая чувствительность приемника (проигрыш по этому параметру примерно 20 дБ) из-за наличия принципиально неустранимых квантовых шумов;
- очень малые поперечные размеры волоконного световода, что затрудняет как согласование с ним в первую очередь источника оптического излучения, а также монтаж самого оптического тракта, так и последующую техническую эксплуатацию;
- невозможность организации дистанционного питания.



Обработка принимаемого сигнала в медножильных трактах

В процессе приема многоуровневого сигнала перед до решающего устройства сетевой интерфейс выполняет его обработку для подавления отдельных помеховых составляющих. Для этого в момент настройки приемника в линию подается тестовый сигнал и фиксируется создаваемая им переходная помеха на ближний и дальний концы, а также сигнал обратного отражения. При



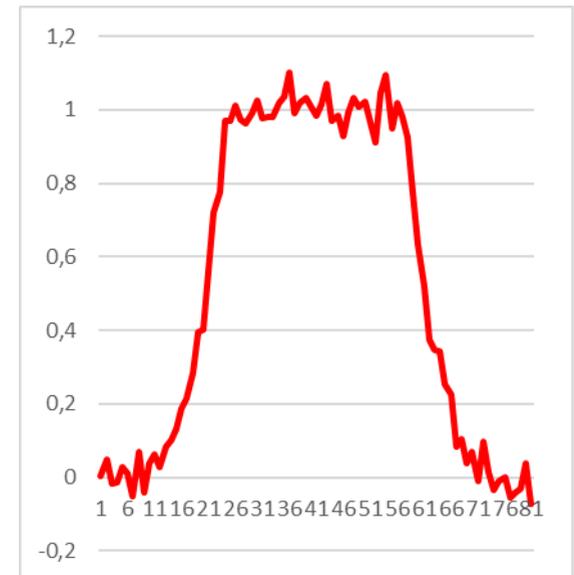
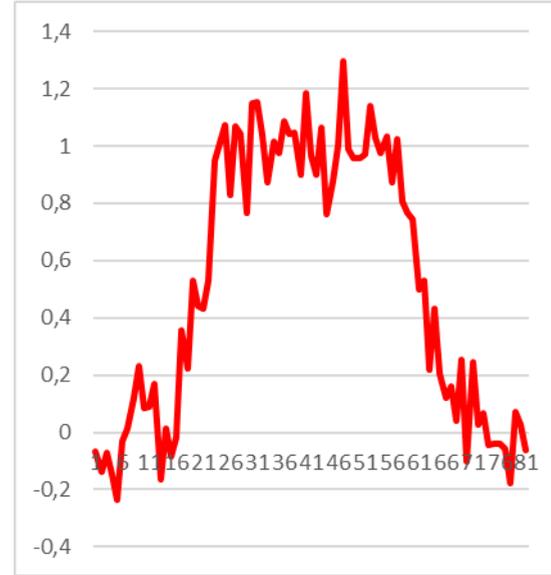
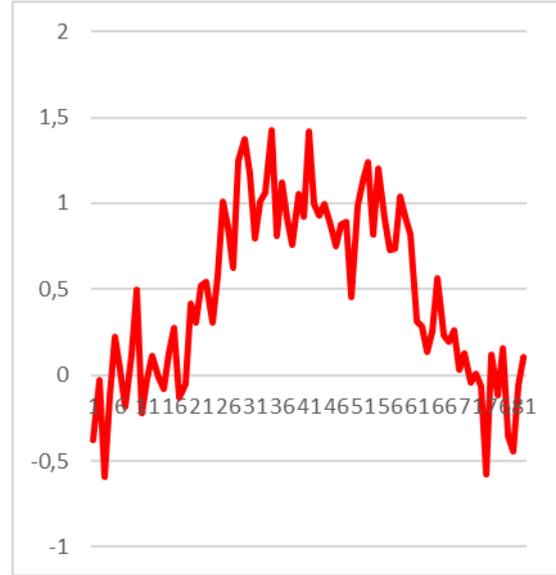
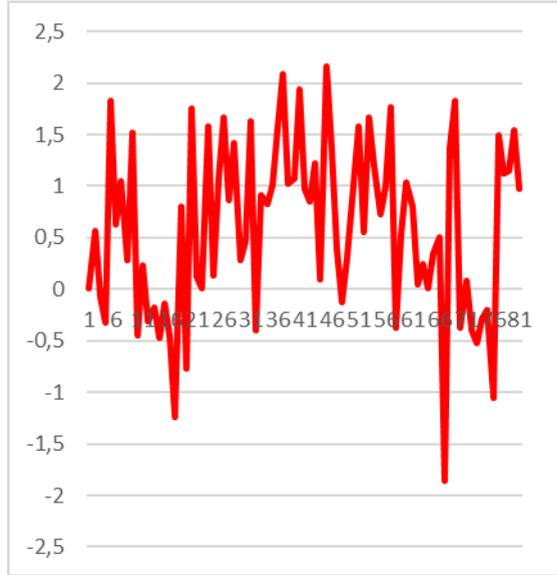
поступлении сигнала приемник формирует модель этой помехи, которая вычитается из суммы сигнала с шумом, в результате чего резко улучшается отношение сигнала к шуму и происходит соответствующее уменьшение вероятности ошибки как основного из ключевых параметров, определяющих качество передачи информации.

Степень подавления отдельных помеховых составляющих приведена в таблице.



Разновидность помехи	RL	PSNEXT	PSFEXT
Степень подавления, дБ	70	50	30

Моделирование работы блоков подавления помех



Эпюры в качественной форме показывают последовательное улучшение отношения сигнала к шуму на входе решающего устройства приемника одного из каналов сетевого интерфейса по мере последовательной обработки входного сигнала блоками подавления помех.

Частотные характеристики помехи

Расчет в среде MathCad дает частотные параметры отдельных помеховых составляющих и затухания, которые представлены на эскизе.

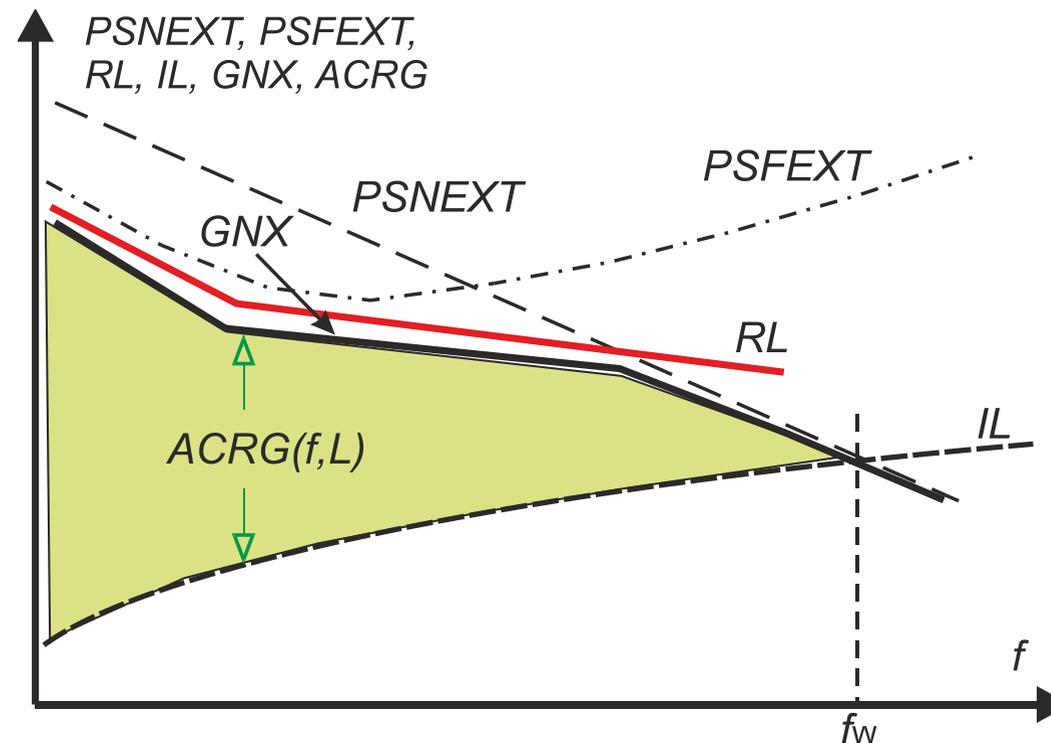
Полученные результаты позволяют определить шенноновскую пропускную способность симметричного канального тракта как

$$W(L) = 4 \cdot 0,6 \cdot \int_0^{f_w} \log_2 [1 + ACRG(f, L)] df,$$

где

$$ACRG(f, L) = GNX(f, L) - IL(f, L)$$

Уравнение для определения верхней граничной частоты кабельного тракта



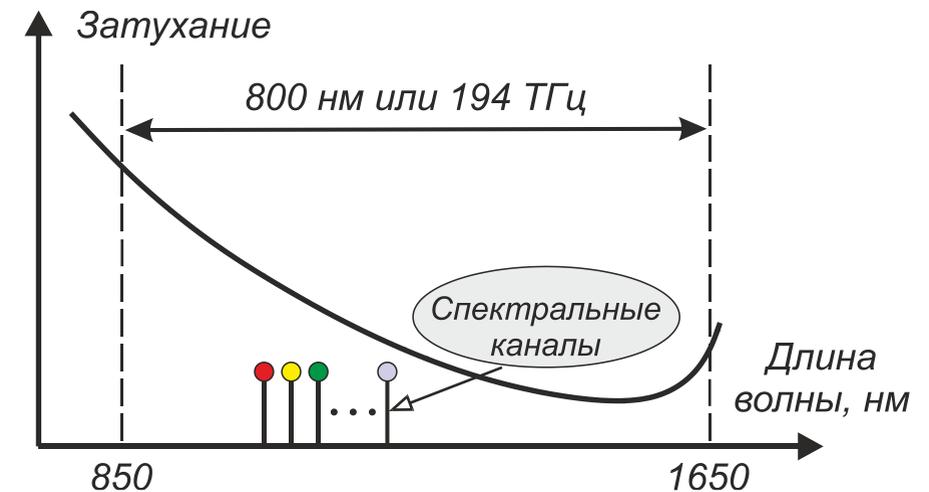
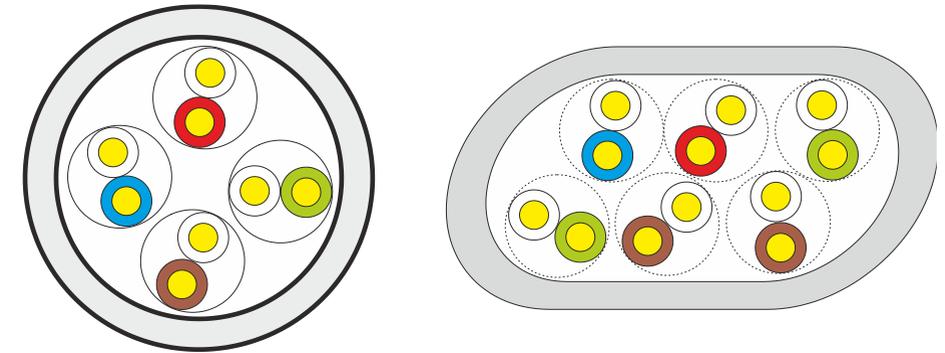
$$GNX(f, L) - IL(f, L) = 0 \text{ dB.}$$

Причины ограниченного функционала симметричных трактов

Наличие “медного предела” симметричных кабельных трактов носит объективный характер и определяется следующими двумя основными обстоятельствами:

- ограничением по числу цепей передачи в формируемом тракте (в рамках используемых схем организации связи) их количество ограничено четырьмя – нехватка цепей передачи;
- неудовлетворительными (по сравнению с волоконно-оптической техникой) частотными свойствами витой пары как среды передачи информации (проигрыш в 5 порядков), что блокирует внедрение такого эффективного приема как спектрального мультиплексирования – нехватка широкополосности.

Нельзя сбрасывать со счетов также такое дополнительное преимущество спектрального мультиплексирования, которым становится, в частности, возможность эффективного решения проблемы “скоростного тупика” современной электроники и наращивания скорости передачи в канале связи в обозримой перспективе до крайней мере до 3,2 Тбит/с.



О востребованности линий большой протяженности во внутриобъектовых ИТС

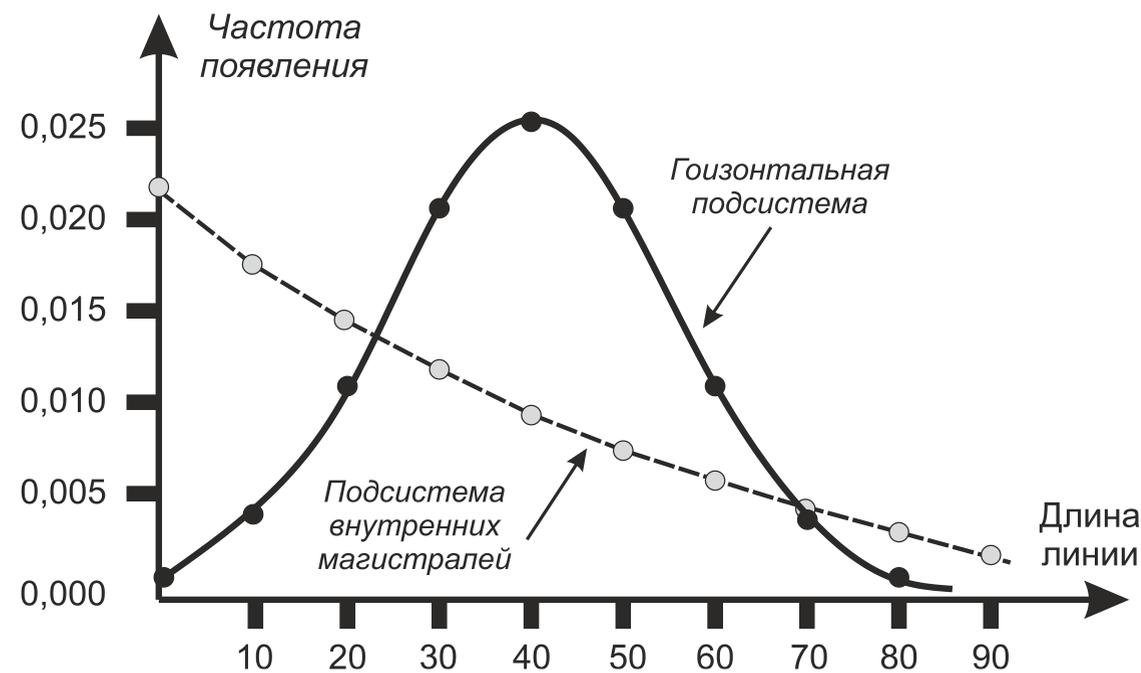
Для оценки ожидаемой протяженности линий внутриобъектовой кабельной связи воспользуемся статистическими данными по офисным информационным системам, которая приведена на эскизе.

Соответствующие вычисления функции плотности вероятности распределения длин кабельных трактов дают величину, которая приведена в правой нижней части слайда.

Из нее в качестве оценки сверху получаем пару важных чисел

- в 64% случаев протяженность кабельного тракта не превысит 90 м;
- грубая оценка сверху ожидаемой средней протяженности тракта дает величину 83 м (реальное значение по данным Билайн составляет 60 м).

Иначе говоря, как простые, так и составные кабельные тракты большой протяженности при построении внутриобъектовых ИТС практически не востребованы!



$$\varphi_{\xi+\zeta}(x) = \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{-2\lambda(x-b)-(\lambda\sigma)^2}{2}} \int_0^{\infty} e^{\frac{-[\tau-(x-b-\sigma^2\lambda)]^2}{2\sigma^2}} d\tau$$

Принципы и особенности построения ВОСП

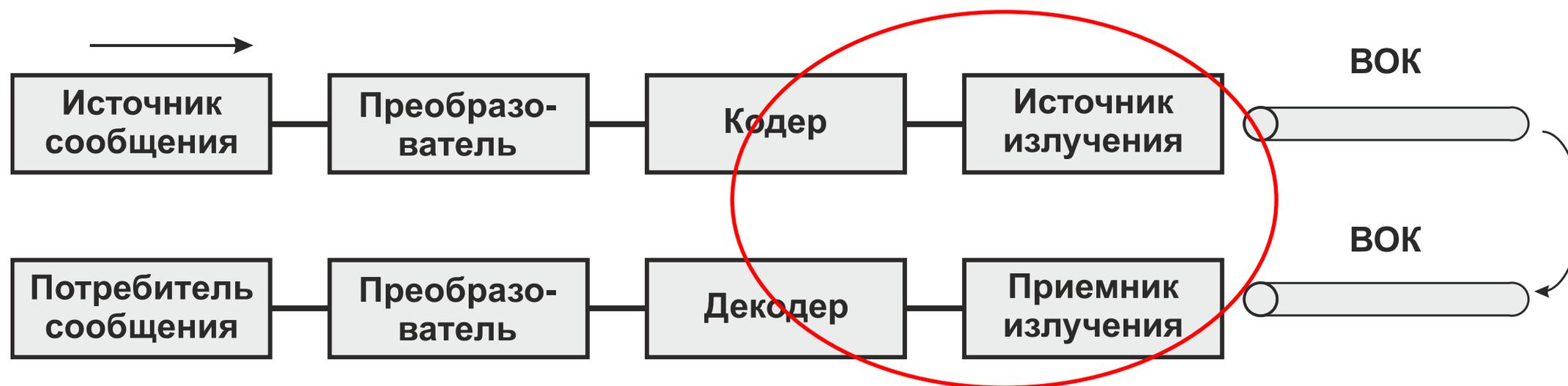
Структурная схема ВОСП оптического диапазона длин волн преимущественно совпадает по структуре с системами, использующими при передаче другие принципы и спектральные диапазоны. Целесообразность такого подхода объясняется соображениями унификации аппаратуры, а согласование с конкретным типом среды передачи осуществляется простой сменой интерфейсного модуля.

Первоначальный аналоговый или цифровой сигнал, создаваемый источником, поступает на преобразователь, где формируется первичный электрический сигнал.

Избыточное кодирование, выполняемое кодером, обеспечивает требуемую помехоустойчивость, удобство синхронизации, контроля исправности промежуточных узлов тракта и т.д.

Далее сигнал поступает на модулятор, с выхода которого снимается оптический сигнал, вводимый в волоконный световод оптического кабеля.

На приемном конце выполняется обратное преобразование.

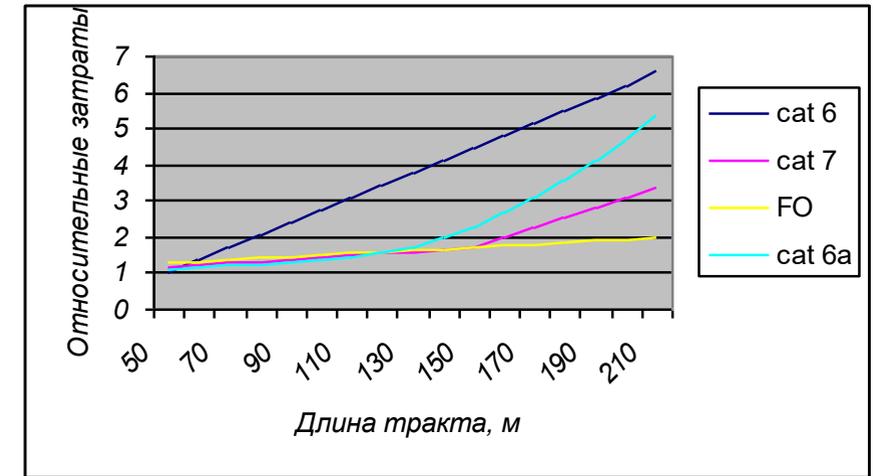


Фокусные области применения ВОСП в телекоммуникациях – 1(2)

Области использования ВОСП как продукта массового применения на сетях электросвязи в многом определяются сочетанием философского закона о единстве и борьбе противоположностей и правила о том, что недостатки любого технического решения часто являются прямым продолжением его достоинств.

Основное достоинство волоконно-оптической техники – широкополосная “дальнобойность”, главный недостаток – слабая энергетика, недостаточная, например, для прямого преобразования электрического сигнала в акустический в телефонии. Последнее означает, что электропроводные и волоконно-оптические решения неизбежно вынуждены будут сосуществовать вместе.

По мере роста скорости передачи граница безусловного перехода от электропроводных решений к волоконно-оптическим сдвигается в сторону меньших длин, но даже на скорости 10 Гбит/с составляет примерно 150 м. С учетом того, что человек как один из главных потребителей ресурсов электросвязи не воспринимает информацию со скоростью свыше 50 Мбит/с, это означает, что электропроводным решениям жить по крайней мере в обозримой перспективе.



Стоимостное сравнение оптической и электропроводной систем на скорости 10 Гбит/с



Фокусные области применения ВОСП в телекоммуникациях – 2(2)

Уровень сети	ВОСП	
Глобальные сети	+++	Public
Магистральные сети	+++	Public
Зоновые сети	++	Public
Сети масштаба города	++	Public
Сети доступа	+	Public
Внутриобъектовые сети	85% линий – витая пара	Private



Главный вывод – волоконно-оптическая техника представляет собой решение в первую очередь операторского класса, хотя довольно интенсивно используется во внутриобъектовых сетях. С учетом этой особенности даже на сетях доступа часто применяются гибридные сети: до подъезда доходит волоконно-оптический кабель, а абонентская разводка выполняется витой парой. Во внутриобъектовых сетях на оптической технике реализуются линии магистрального уровня, а подключение терминальной техники выполняется по витой паре.



Заключение

1. Волоконно-оптические и медножильные электропроводные решения будут совместно использоваться при построении физического и транспортного уровней различных информационных систем как в настоящее время, так и по крайней мере в обозримой перспективе.
2. Соотношение между волоконно-оптическими и медножильными решениями меняется в довольно широких пределах в различных информационных системах, но доминирования одного вида техники не наблюдается ни в одной из областей массового применения сетей связи.
3. Основным и первичным критерием по выбору волоконно-оптической техники становится необходимость передачи высокоскоростных информационных потоков на большие расстояния.
4. В качестве граничных значений целесообразно принять скорость не менее 10 Мбит/с и выше при минимальной дальности связи 500 м (по чисто экономическим причинам).
5. С учетом больших объемов терминальной техники внутриобъектовых систем, функционирование которой в части электропитания обеспечивается по схеме с центральной батареей, а также характерных для рассматриваемой области средней дальности связи около 40 м кабели из витых пар будут иметь доминирующее значение в этой области.
6. При переходе к операторским сетям роль волоконной оптики быстро растет даже на уровне доступа, не говоря уже о магистральной части сети, но опять же она не становится безусловно доминирующей.

