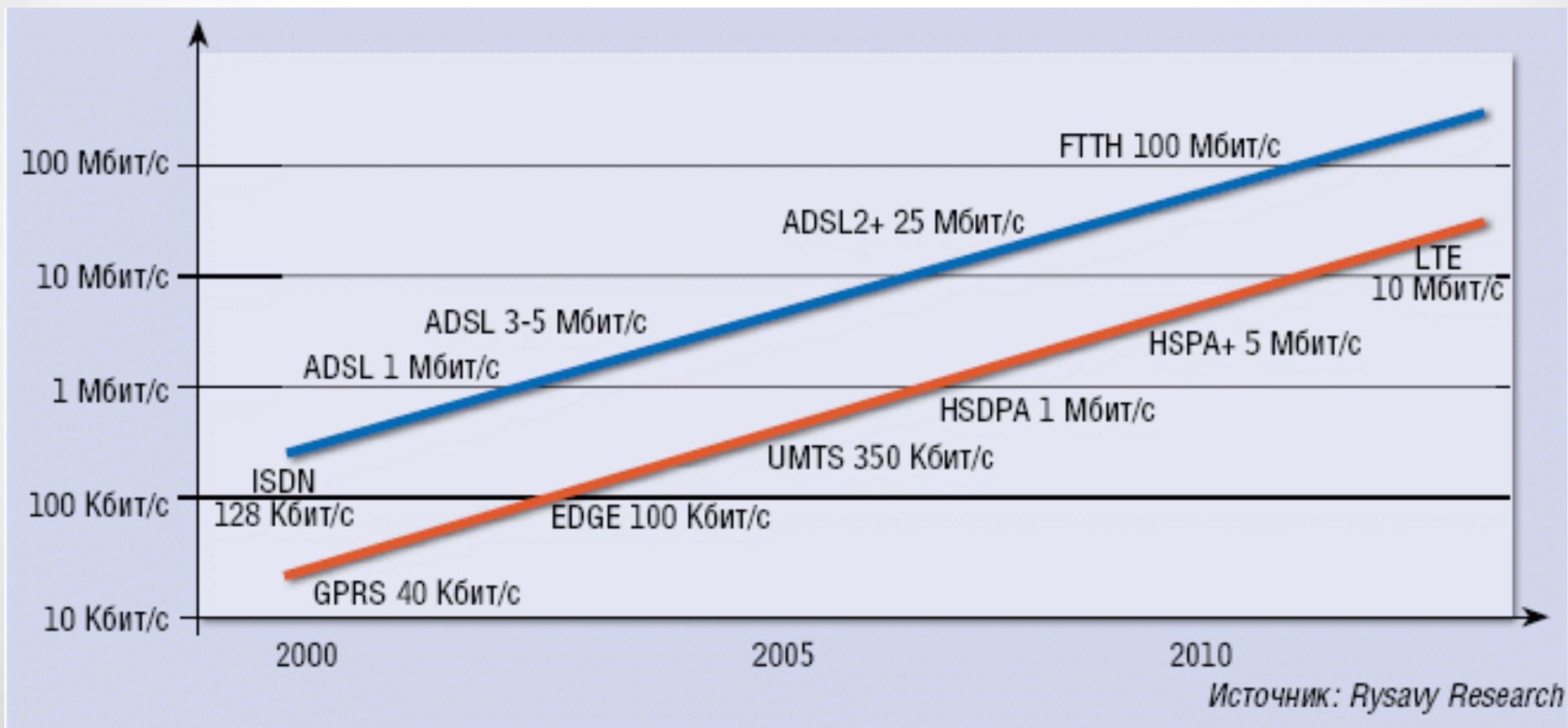


APPLIED
RESEARCH
CENTER FOR
COMPUTER
NETWORKS

Оптические сети передачи данных

Доп. главы Компьютерных сетей и
телекоммуникации
проф. Смелянский Р.А.

Рост пропускной способности в кабельных и беспроводных сетях



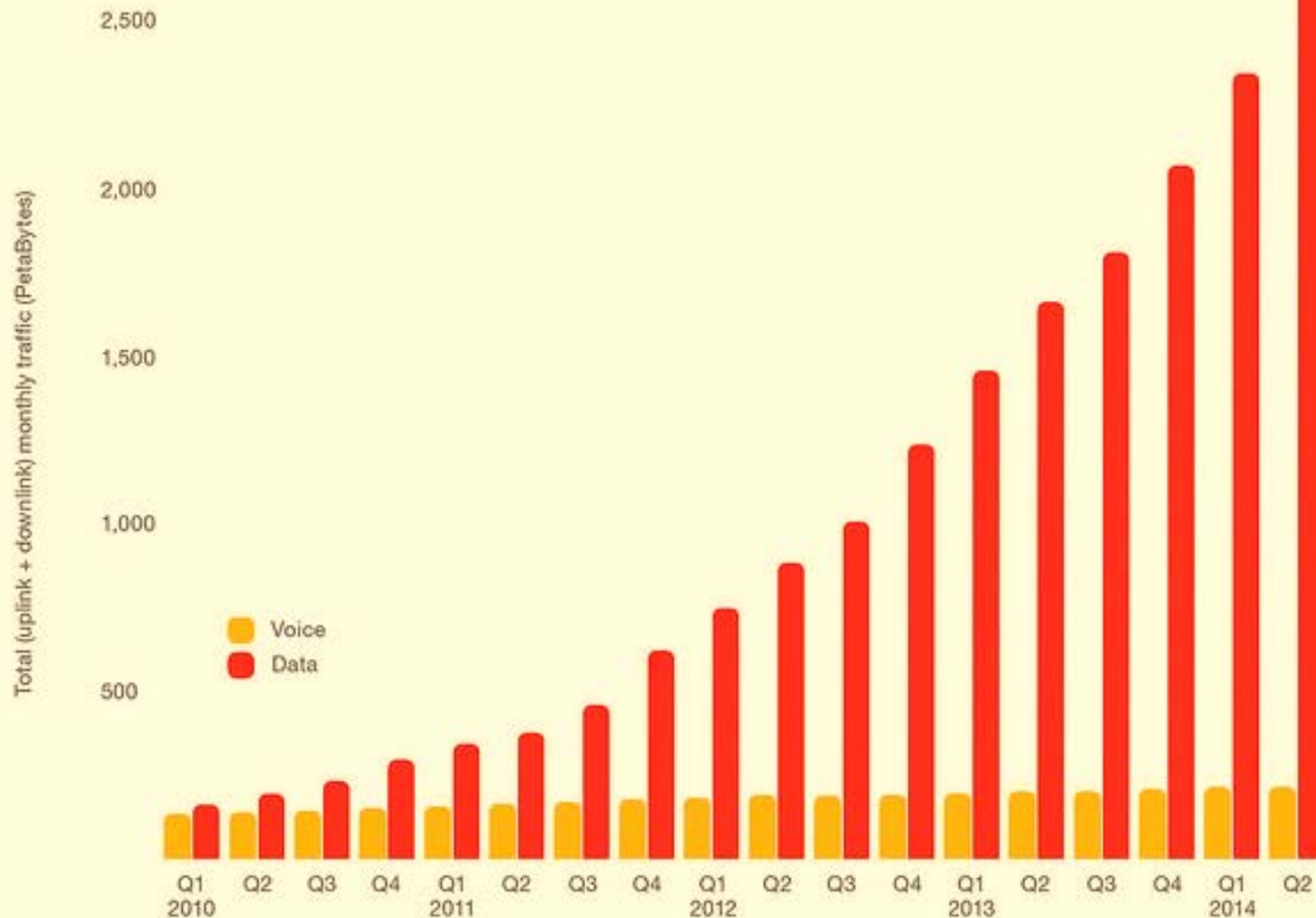
Рост мобильности в мире



Мобильные компьютеры вытесняют настольные



Темпы роста трафиков в мобильных сетях



Темпы роста передачи данных с проводных и беспроводных устройств в мире (млн. чел.)



Источник: comScore, 2014г.

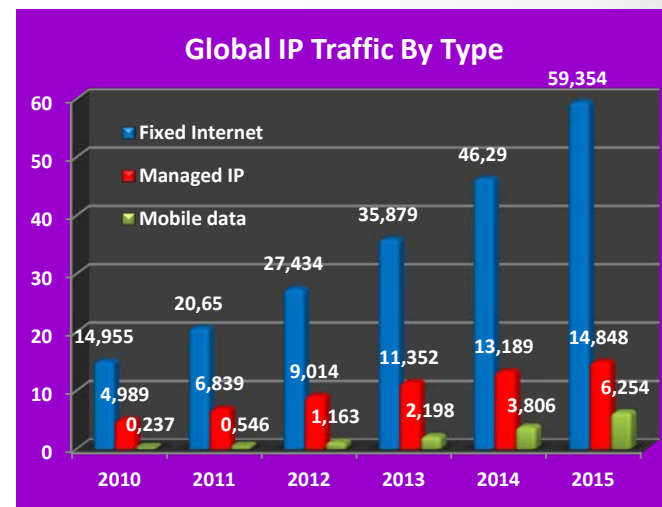


APPLIED
RESEARCH
CENTER FOR
COMPUTER
NETWORKS

Тенденции и требования рынка

Ключевые тенденции

- Изменение модели вычислений (outsourcing & robosourcing);
- Быстрый рост трафика: к 2016 году объем трафика возрастет в 6 раз
- Изменение структуры трафика: к 2016 г. 90 % - видеотрафик;
- Взрывной рост мобильности;
- Несоответствие темпов роста трафика и темпов роста доходов операторов



Эрик Шмит, Google

К 2003 г. в Интернет было сгенерировано 5 экзбайт. Сегодня такой объем – за 2-3 дня



Стоимость часа простоя

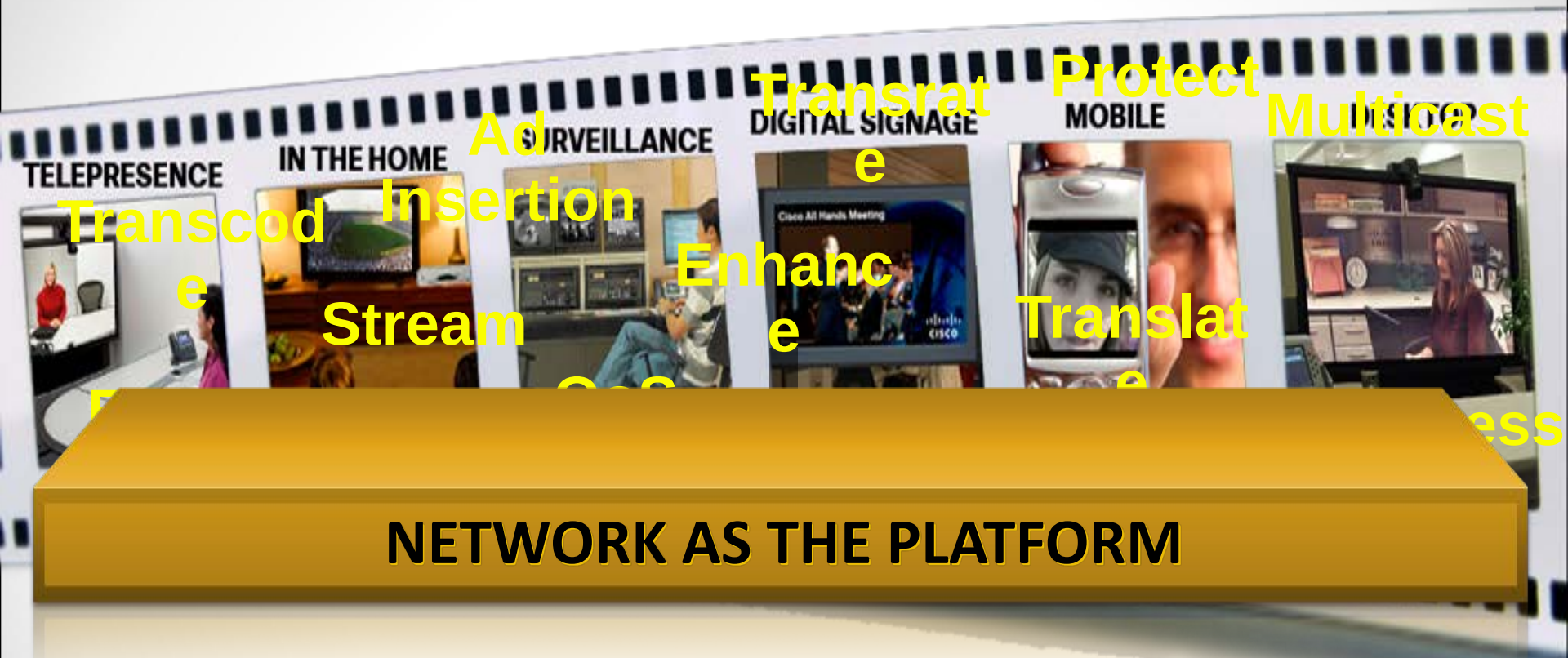
Отрасль	Бизнес/операция	Средняя стоимость часа простоя
Финансовый сектор	Брокерские операции	6,5 млн.долл.
Финансовый сектор	Авторизация оплаты с помощью кредитной карты	2,6 млн.долл.
Медиа	Платное кабельное телевидение	1,1 млн.долл.
Розничная торговля	«Магазин на диване» (ТВ)	113 тыс.долл.
Розничная торговля	Торговля по каталогу	90 тыс.долл.
Перевозки	Бронирование авиабилетов	89,5 тыс.долл.

*<http://www-07.ibm.com/servisec/th/its/brcs/has/downtime.html>



APPLIED
RESEARCH
CENTER FOR
COMPUTER
NETWORKS

Сеть - это услуги



INFORMATION SUPERHIGHWAY



Требования к сети vs типы услуг

Оптимальная сеть
предоставления услуг

Тип	Примеры	Ключевые требования	Сеть с пакетной коммутацией	Сеть OTN
Пакетные Услуги	Общий доступ в Интернет, частный доступ в Интернет, виртуальные частные сети Ethernet (EVPL)/ виртуальные частные локальные сети (VPLS), абонентские услуги до 1 Гбит/с, услуги OTT	Экономическая эффективность, несколько классов обслуживания: от «лучшего из возможного» с коэффициентом доставки пакетов 99,5% до высшего класса обслуживания с коэффициентом 99,995%	✓	
Услуги на базе облака	Соединения внутри центров обработки данных, миграция виртуальных машин, Доступ к облаку	Пиковая, высокая пропускная способность, относительно низкий уровень задержки, низкая устойчивость к потере пакетов – минимальные потери для некоторых приложений	✓ (изменяется)	✓
Высоко-производительные услуги	Частные услуги с высокой пропускной способностью, класс High-fidelity, оптовые услуги, частные линии 1G и 10G и эволюция до линий 40G и 100G	Низкий уровень задержки, без потерь, низкий уровень или отсутствие джиттера, высокая надежность, быстрое восстановление		✓
Специальные услуги		Выделенная инфраструктура (без совместного использования), с низким уровнем задержки и без потерь, низкий уровень или отсутствие джиттера, высокая надежность, быстрое восстановление		✓



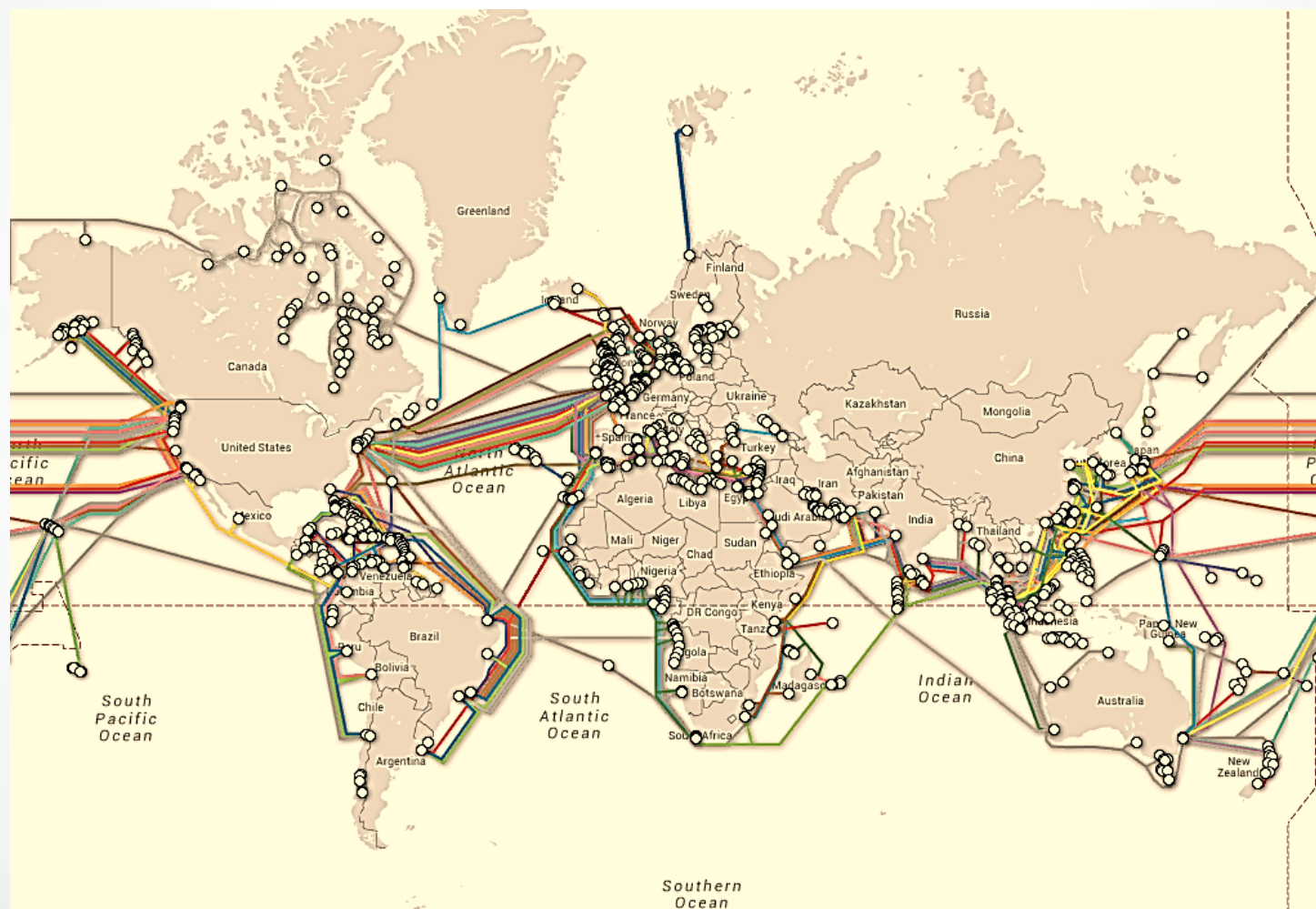
Рынок оптических сетей

- 76% респондентов планируют развертывание коммутации OTN;
- к 2015 г. OTN будет играть центральную роль в 77% узлов дальней связи и 46% узлов городских сетей;
- 94% респондентов признают коммутацию OTN ключевым средством повышения коэффициента использования длин волны 40G и 100G;
- 69% респондентов считают, что коммутация OTN позволит автоматизировать конфигурацию сети для реализации новых услуг.



APPLIED
RESEARCH
CENTER FOR
COMPUTER
NETWORKS

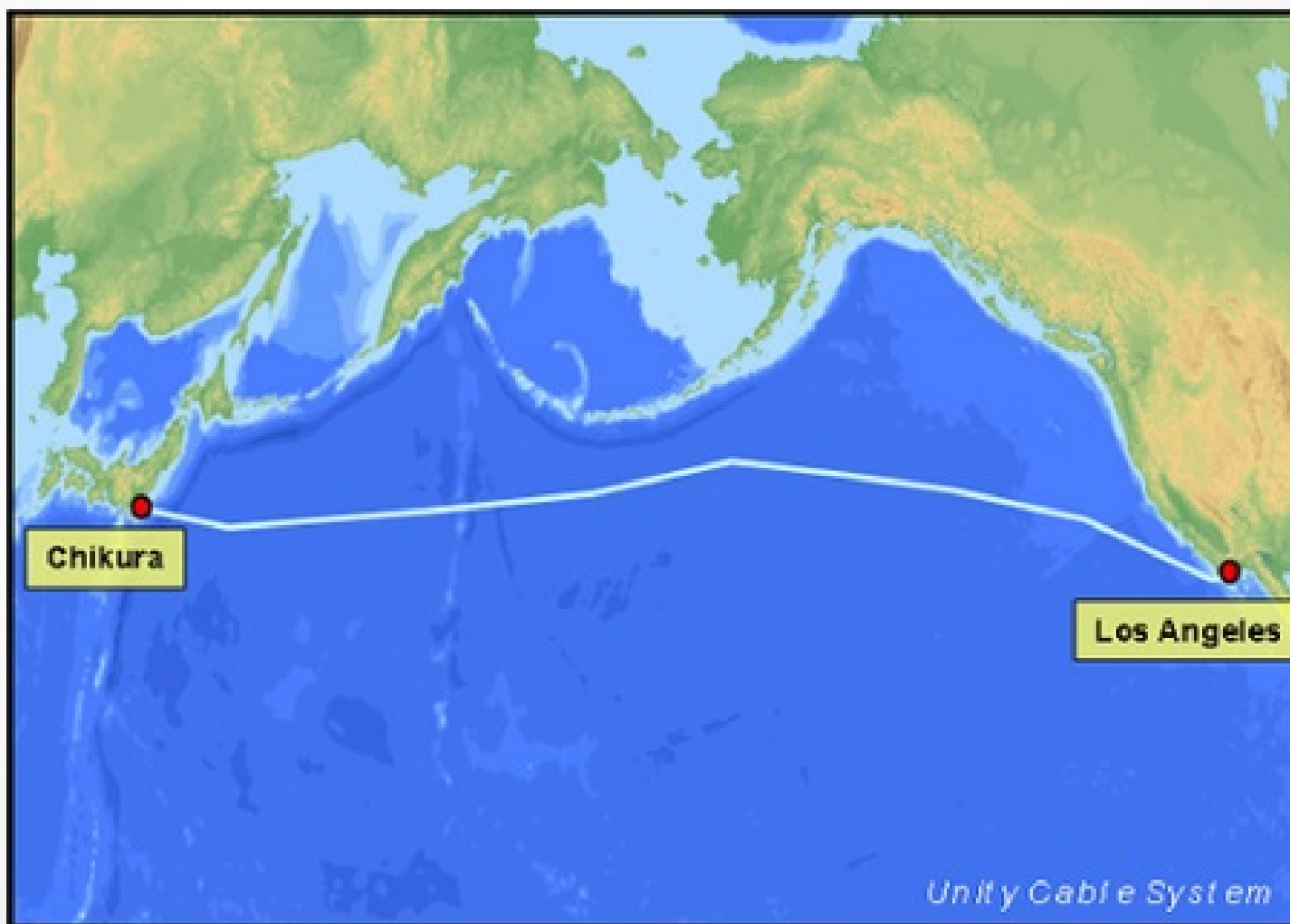
Трансокеанские оптические линии



Суммарная пропускная способность трансатлантических линий связи (Тб/с)



Оптические линии Unity от Google



Прокладка транс тихоокеанского кабеля

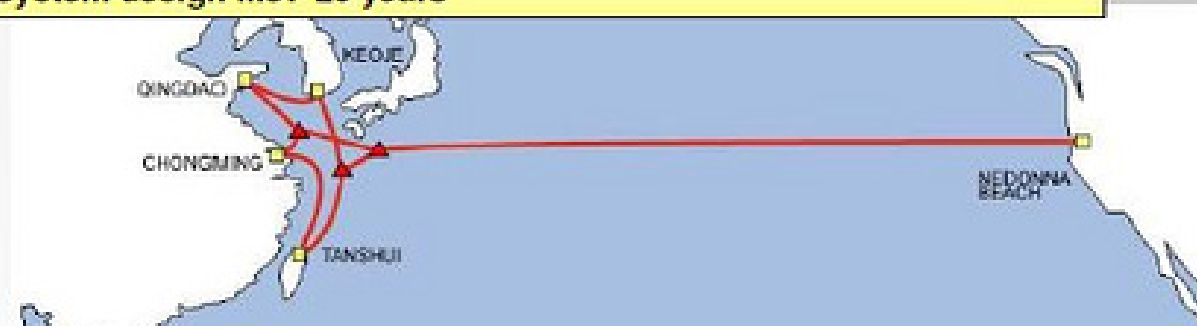


Азиатско-американский оптический шлюз



TPE Overview System Configuration

- 4-fiber pair cable
- Design capacity: 5.12 Tbps (128 wavelengths per fiber pair)
- Initial equipped capacity: 1.28 Tbps (32 wavelengths per fiber pair)
- Length: approximately 18,000 Km/11,000 miles
- Configuration: Linear Trans-Pacific route with Intra-Asia ring
- System design life: 25 years



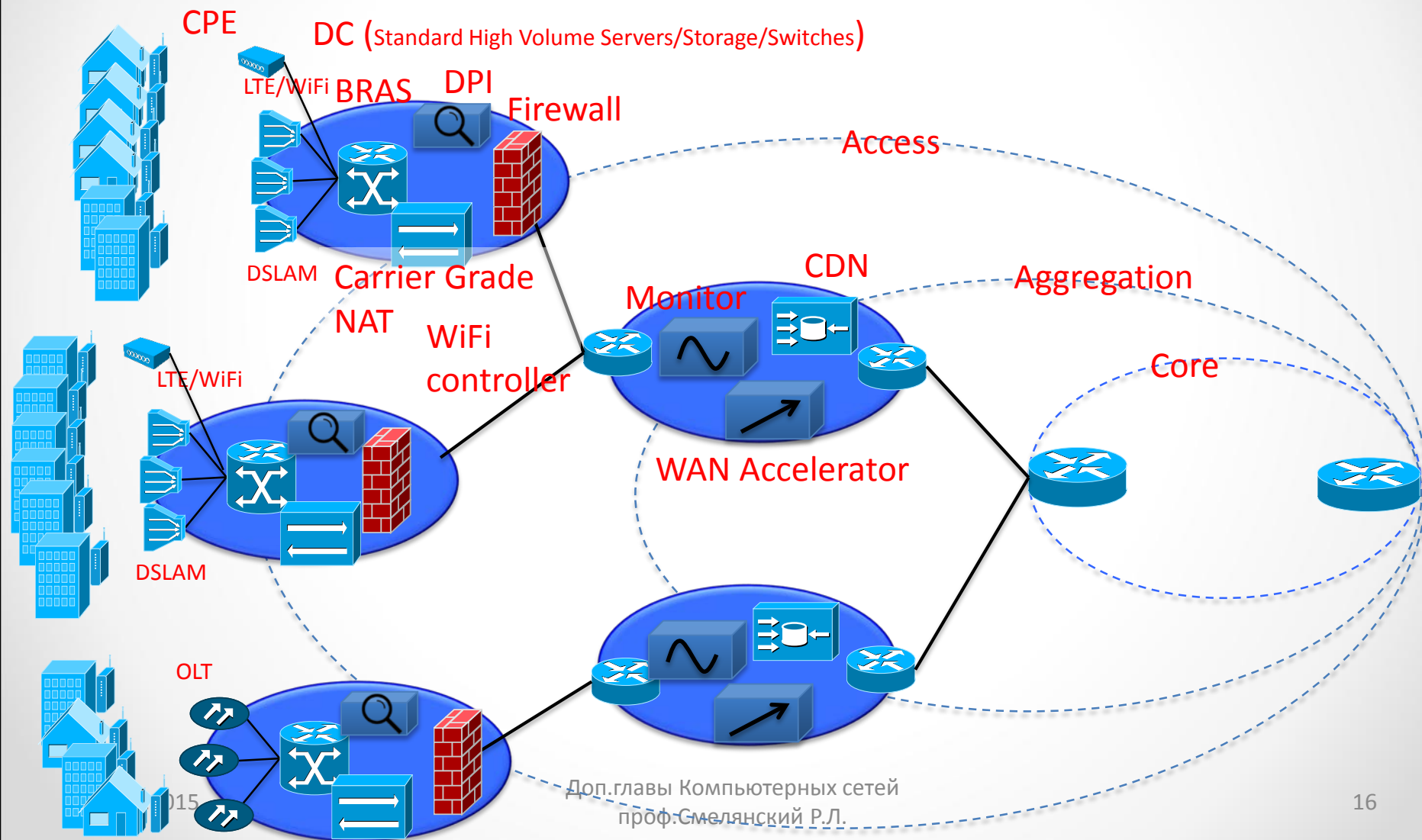
Basic Configuration:

- Cables from four Asian Terminals (two landings in China, one each in Korea and Taiwan) are brought together via branching units (BU) forming an intra-Asian ring
- A single, 4-fiber pair cable connects to a branching unit and crosses the Pacific to the U.S. landing station at Nedonna Beach, Oregon



APPLIED
RESEARCH
CENTER FOR
COMPUTER
NETWORKS

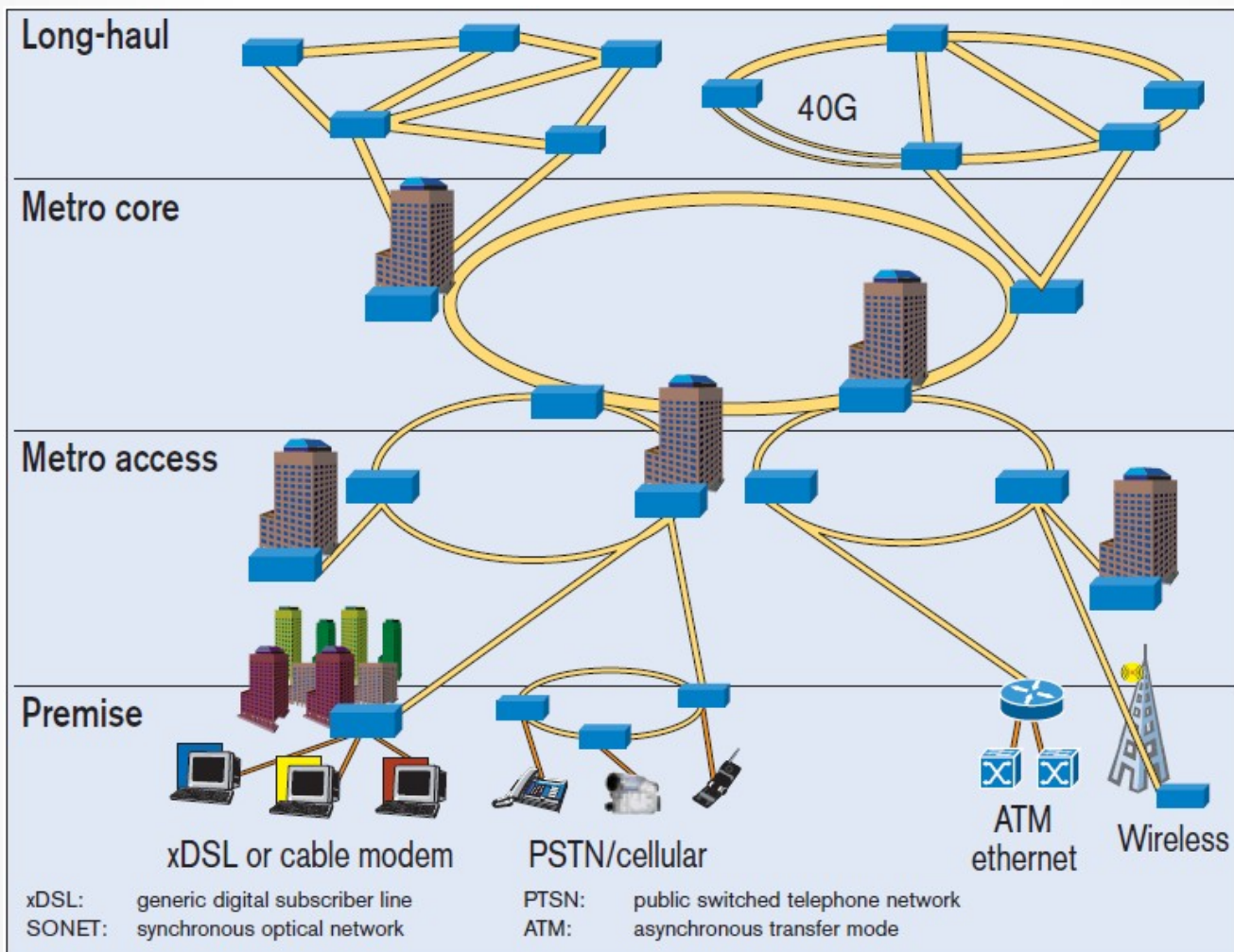
Устройство сети обычного телеком оператора





APPLIED
RESEARCH
CENTER FOR
COMPUTER
NETWORKS

Структура современной сети



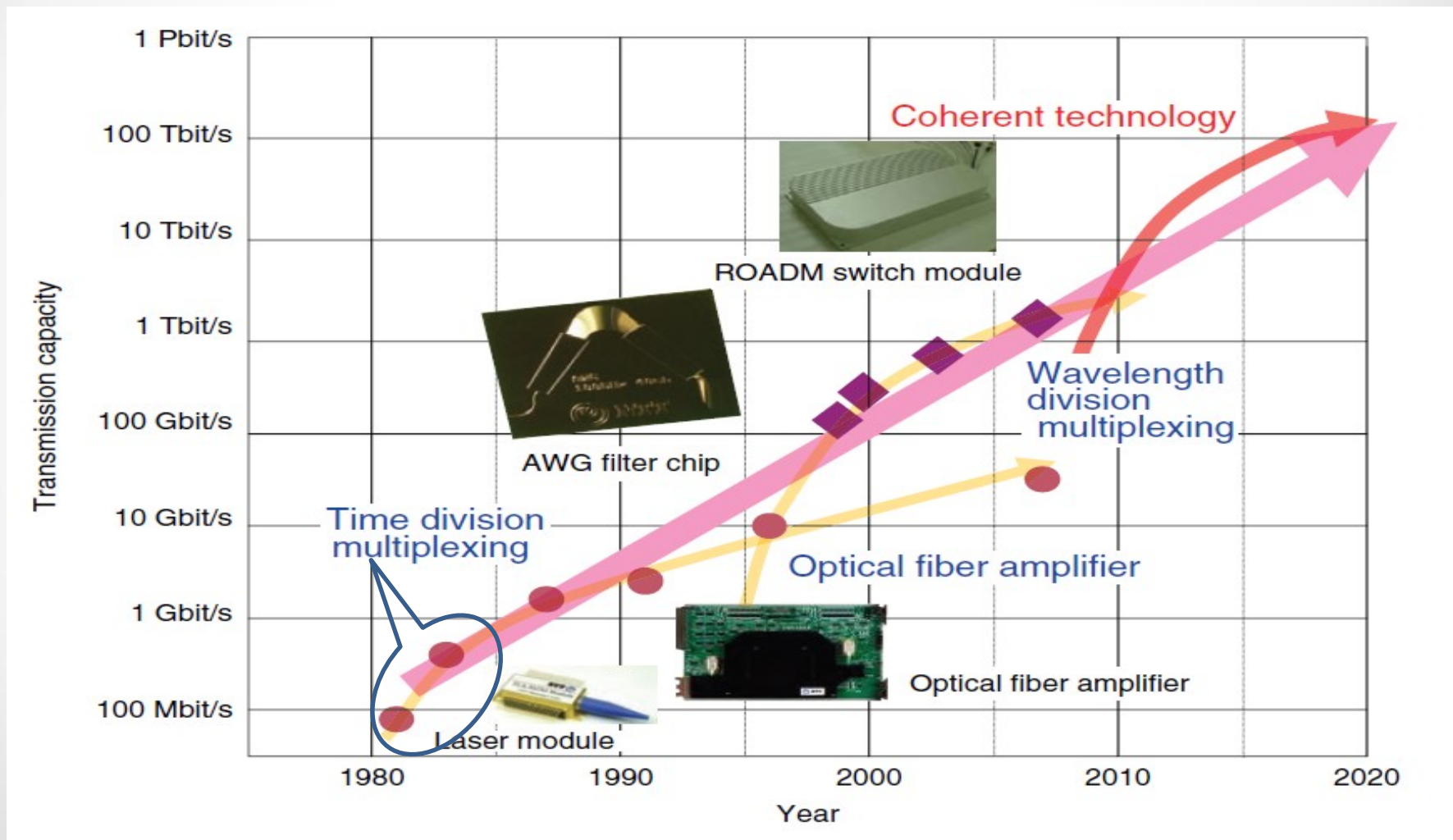
Магистральная сеть Ростелекома





APPLIED
RESEARCH
CENTER FOR
COMPUTER
NETWORKS

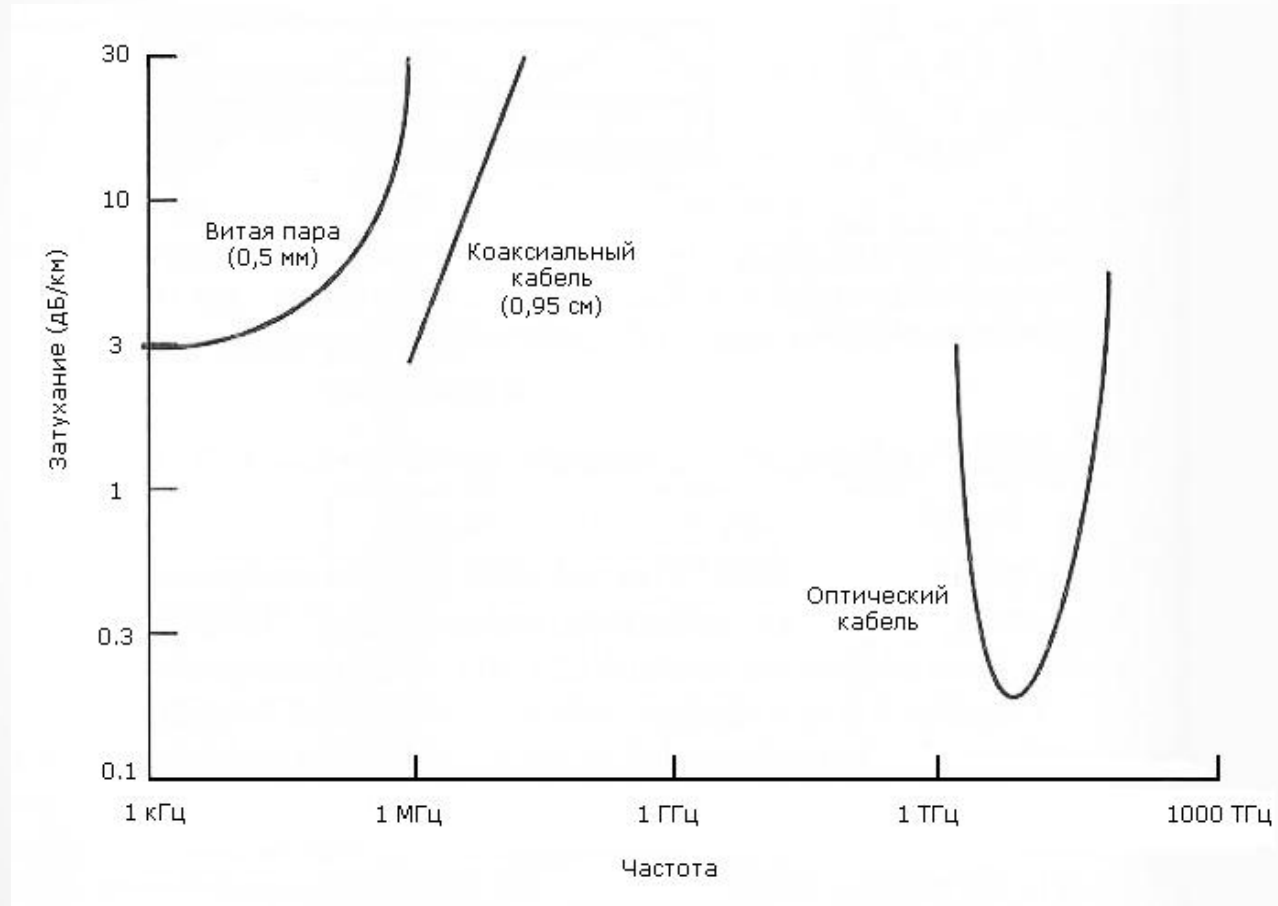
Развитие систем дальней связи: рост скорости передачи





APPLIED
RESEARCH
CENTER FOR
COMPUTER
NETWORKS

Затухание в кабельных средах





Физические свойства носителей

Table 4.1 Point-to-Point Transmission Characteristics of Guided Media [GLOV98]

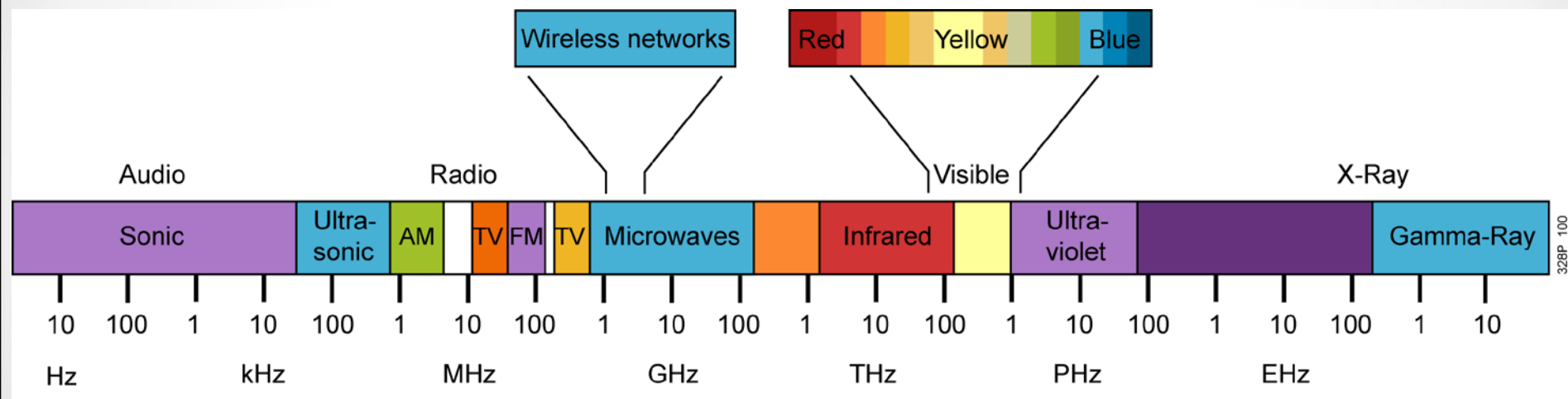
	Frequency Range	Typical Attenuation	Typical Delay	Repeater Spacing
Twisted pair (with loading)	0 to 3.5 kHz	0.2 dB/km @ 1 kHz	50 μ s/km	2 km
Twisted pairs (multi-pair cables)	0 to 1 MHz	3 dB/km @ 1 kHz	5 μ s/km	2 km
Coaxial cable	0 to 500 MHz	7 dB/km @ 10 MHz	4 μ s/km	1 to 9 km
Optical fiber	180 to 370 THz	0.2 to 0.5 dB/km	5 μ s/km	40 km

THz = TeraHerz = 10^{12} Hz.



APPLIED
RESEARCH
CENTER FOR
COMPUTER
NETWORKS

Оптический спектр



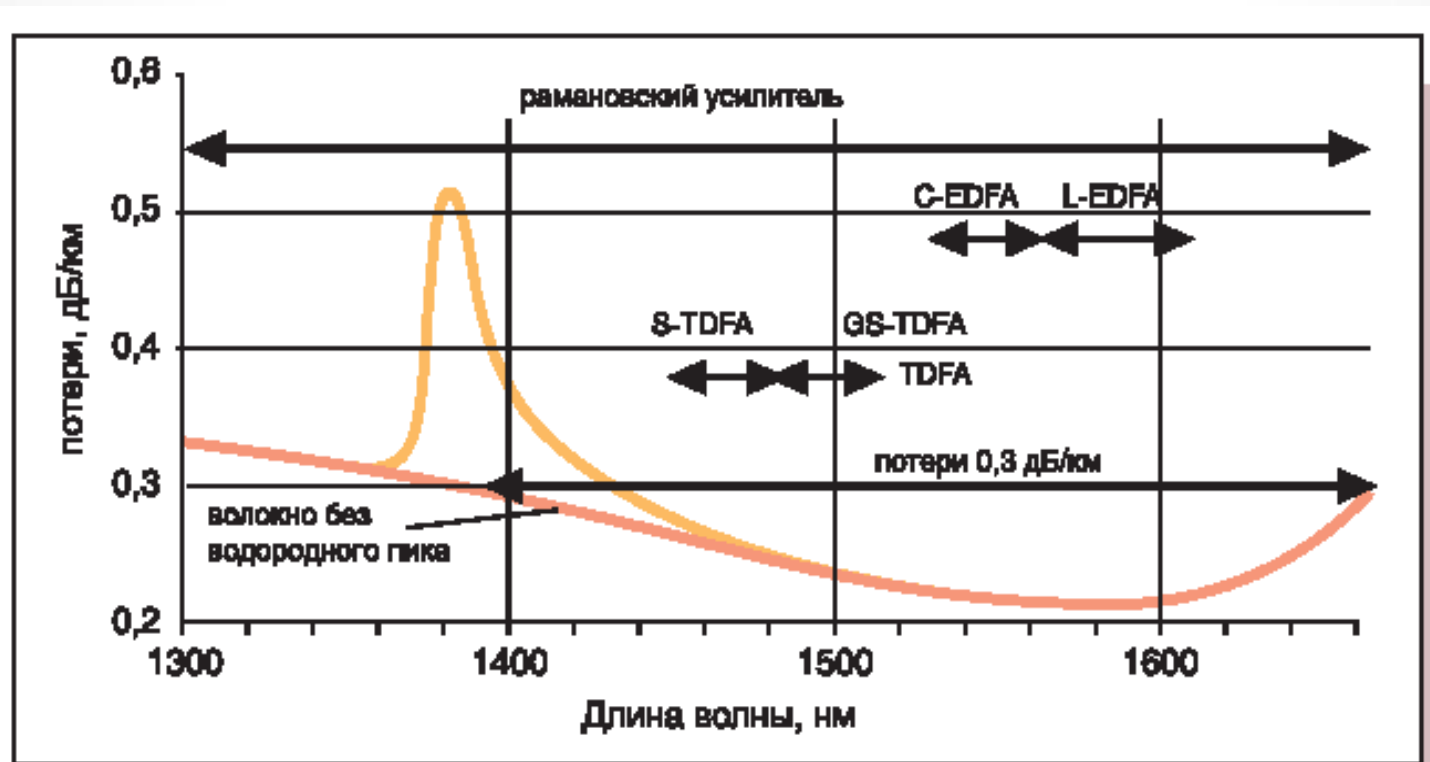


Связь ширины спектра в нм с шириной спектра в ТГц

Частота (ν) [ТГц]	Ширина ($\Delta\nu$) спектра [ТГц]	Ширина ($\Delta\lambda$) спектра [нм]	Коэфф. K перевода [нм/ТГц]	Длина (λ) волны [нм]
200	0,1	0,75	7,5	1500
193,3	0,1	0,80	8,0	1550
187,3	0,1	0,85	8,5	2424



Спектр затухания сигнала в оптоволокне



Теоретические основы передачи сигналов

Скорость передачи, определения

Число импульсов-символов, передаваемых системой связи за 1 секунду, называется **символьной скоростью**, B_s
единица измерения – бод

Количество информации, передаваемой системой связи за 1 секунду, называется **скоростью передачи информации (битовой скоростью)**

$$B_{INF} = B_s \cdot \log_2 M$$

Если используется K независимых каналов передачи информации, то суммарная скорость передачи информации увеличивается в K раз:

$$B_{TOT} = B_{INF} \cdot K$$



Взаимосвязь пропускной способности канала и его полосы пропускания

- шум в канале измеряется как соотношение мощности полезного сигнала к мощности шума: S/N (измеряется в децибелах $1\text{dB} = 10 \log_{10}(S/N)$).
- для случая канала с шумом есть Теорема Шеннона

$$V_{max} = H \log_2 (1 + S/N) \text{ bps},$$

где S/N - соотношение сигнал-шум в канале; здесь уже неважно количество уровней в сигнале.

Это - теоретический предел, который редко достигается на практике.

Способы кодировки данных

Потенциальный код NRZ

- 0 – высокий потенциал
- 1 – низкий потенциал

Биполярный код NRZI

- 0 – нет перепада уровня сигнала в начале битного интервала
- 1 – перепад уровня сигнала в начале интервала

Биполярный код AMI

- 0 – отсутствие сигнала
- 1 – положительный или отрицательный потенциал, обратный по отношению к потенциалу в предыдущий период

Манчестерский код

- 0 – переход с высокого на низкий потенциал в середине интервала
- 1 – переход с низкого на высокий потенциал в середине интервала

Потенциальный код 2B1Q

Использует 4 уровня сигналов, значение уровня определяет значение пары битов данных

Примеры кодов

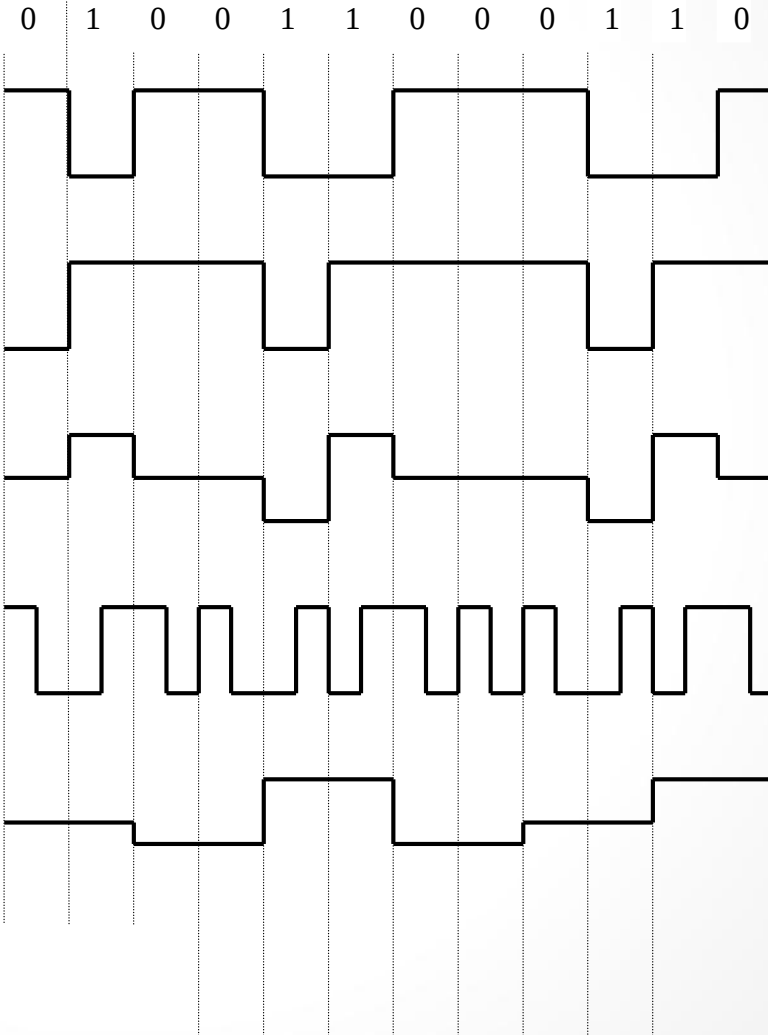
Потенциальный код NRZ

Потенциальный код NRZI

Биполярный код AMI

Манчестерский код

Потенциальный код 2B1Q



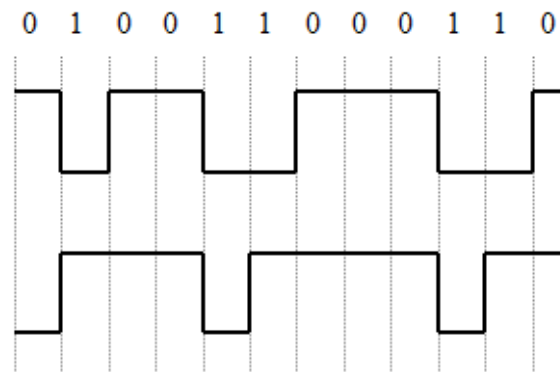


Потенциальный NRZ код

- NRZ – Non Return to Zero – без возврата к нулю на битовом интервале
- Основным недостатком этого кода является отсутствие синхронизации.
- Модификацией NRZ кода и хорошим примером дифференциального кодирования является NRZ-I код

Потенциальный код
NRZ

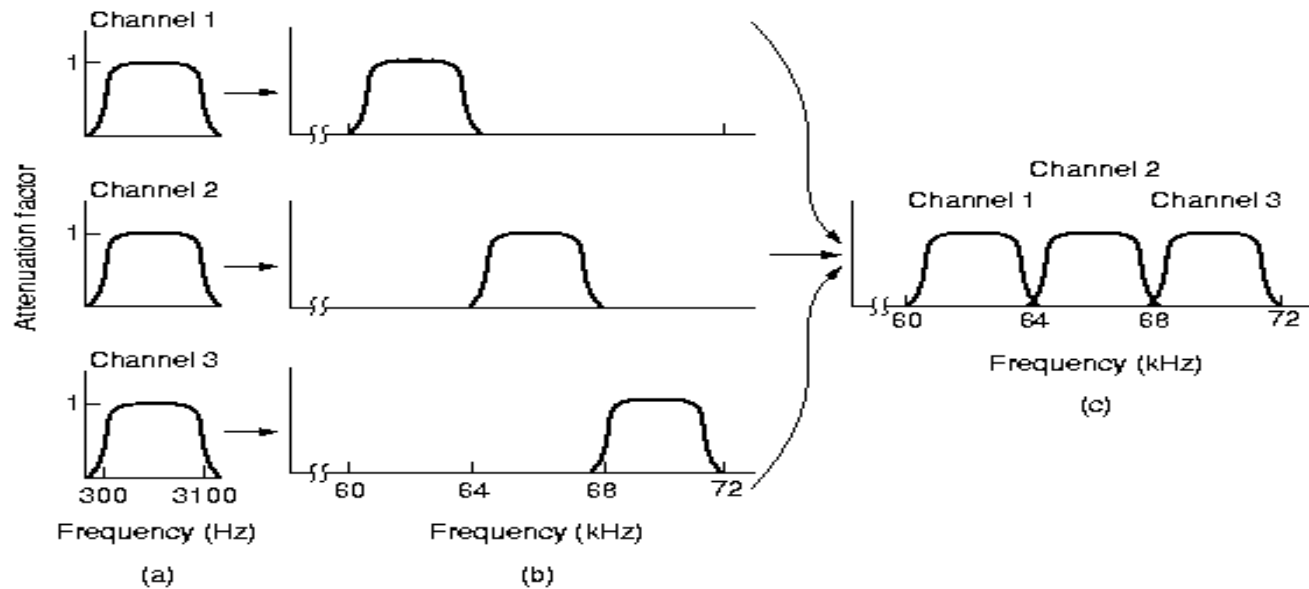
Биполярный код
NRZI



Мультиплексирование

- Мультиплексирование с разделением частот.
- Мультиплексирование с разделением по времени.
- Мультиплексирование с разделением длины волны.

Мультиплексирование с разделением частот

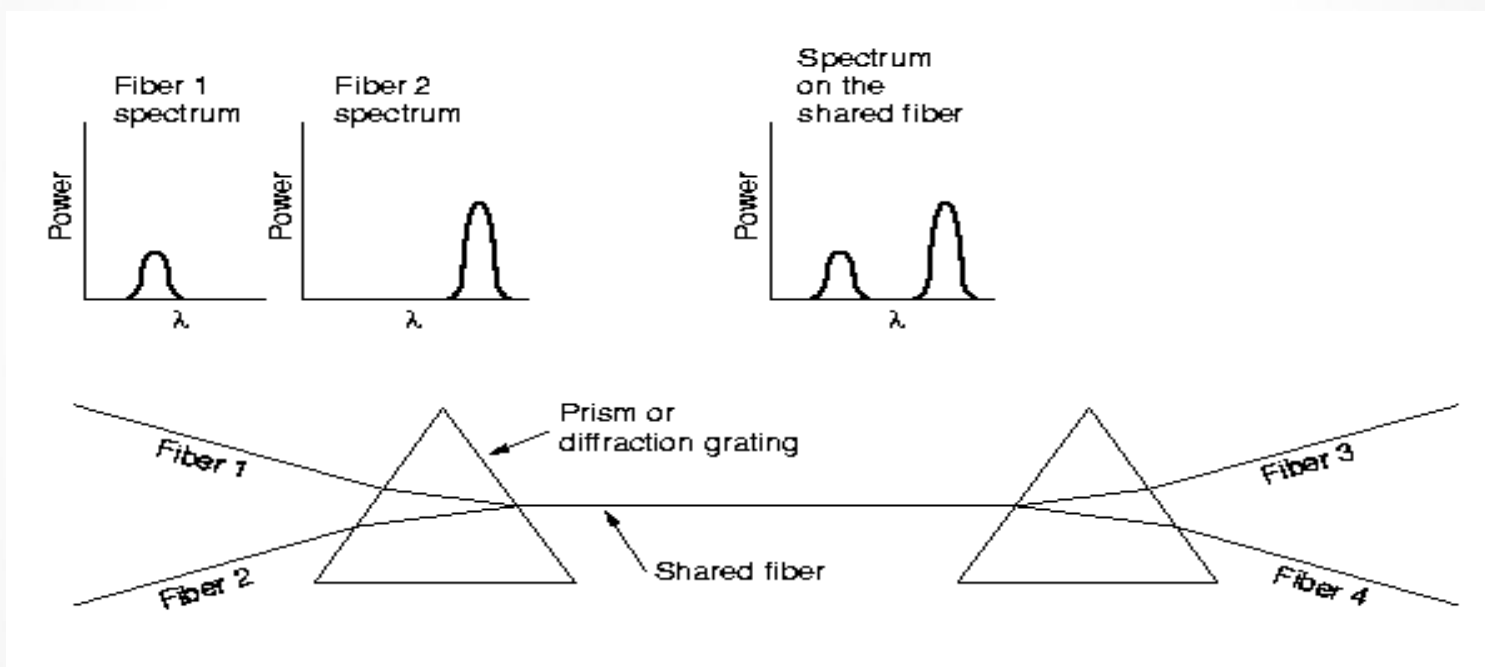


© A.Tenenbaum Computer Networks 1996



APPLIED
RESEARCH
CENTER FOR
COMPUTER
NETWORKS

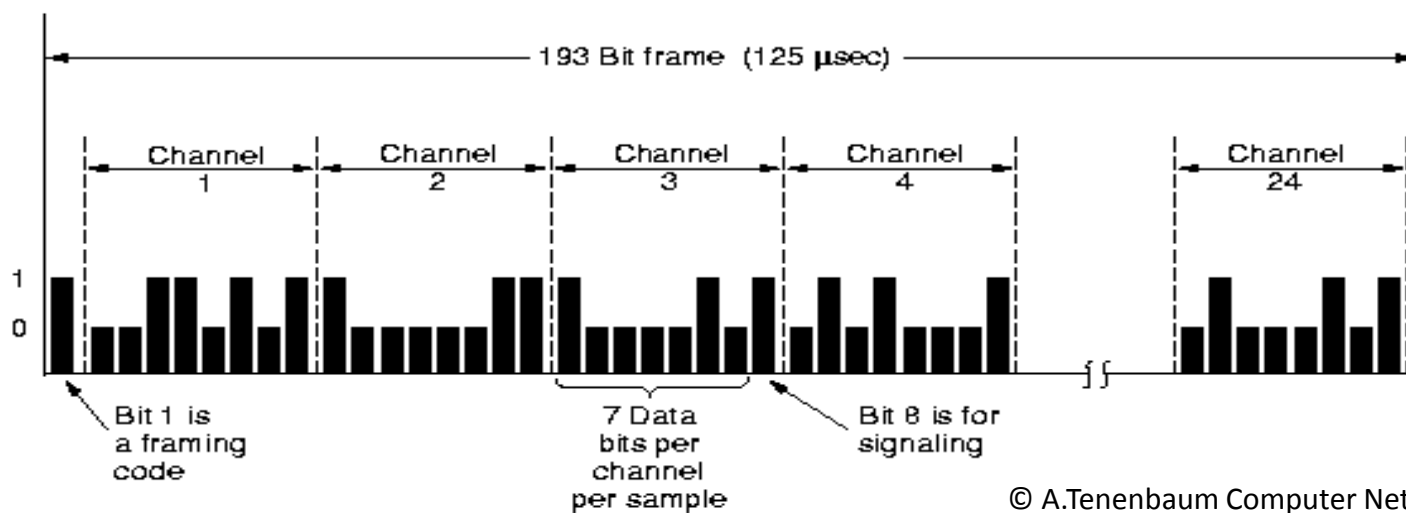
Спектральное мультиплексирование (по длине волны)



© A.Tenenbaum Computer Networks 1996



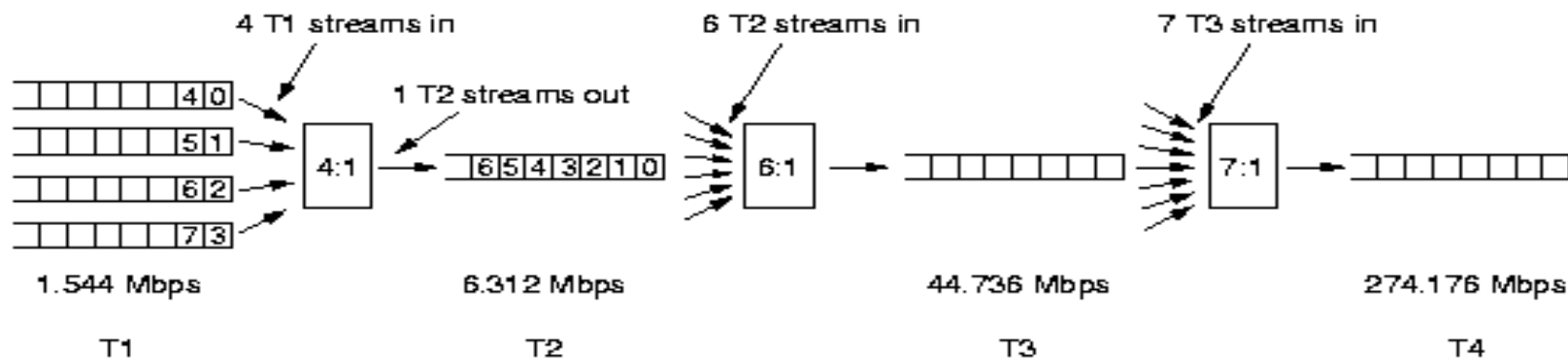
Мультиплексирование с разделением по времени



© A.Tenenbaum Computer Networks 1996



Мультиплексирование по стандарту T



© A.Tenenbaum Computer Networks 1996

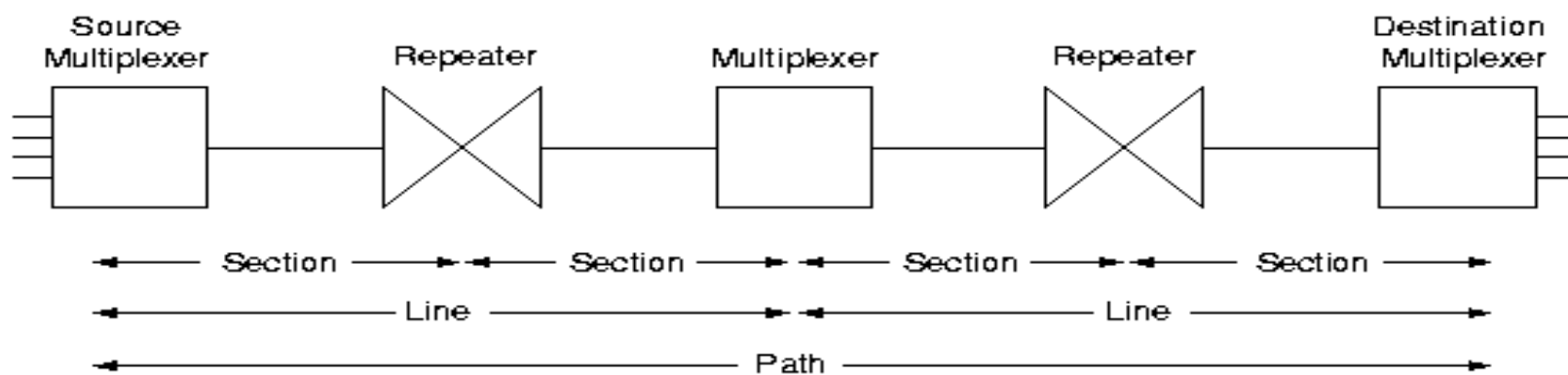
Стандарт SONET/SDH



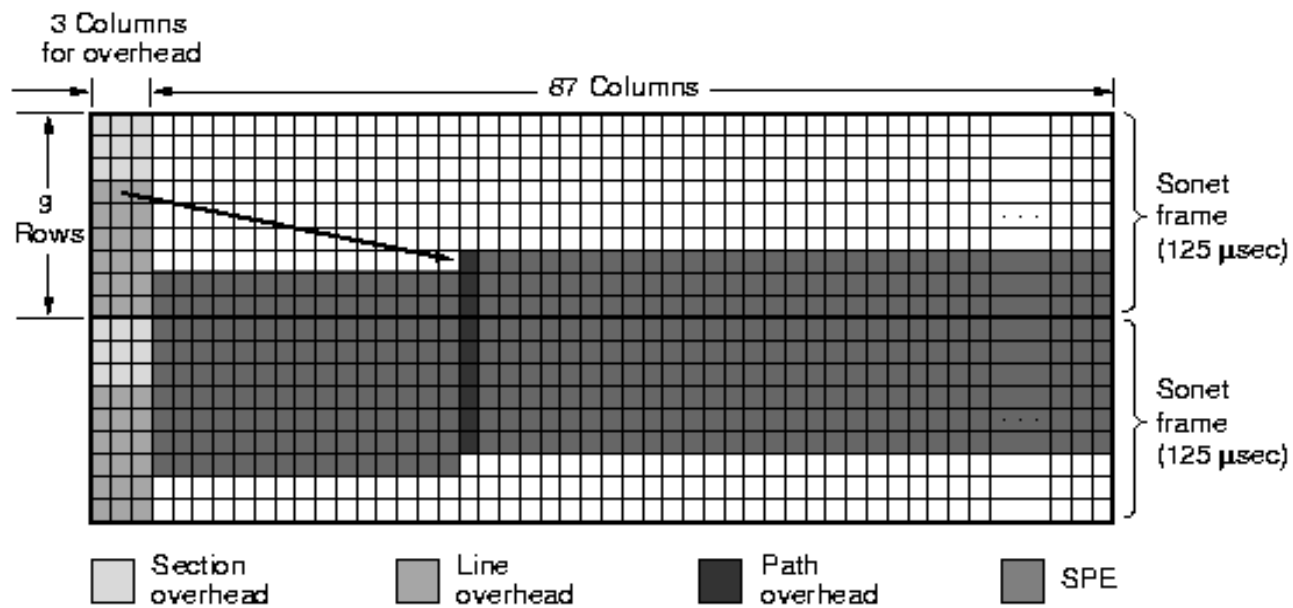
SONET

Стандарт должен был позволить:

- использовать разные физические среды в сети. Это требовало проработки стандарта на кодировку на физическом уровне, выбор длины волны, частоты, временных характеристик, структуры фрейма.
- обеспечить иерархическое мультиплексирование нескольких цифровых каналов. унифицировать Американские, Европейские и Японские цифровые системы.
- определить правила функционирования, администрирования и поддержки.

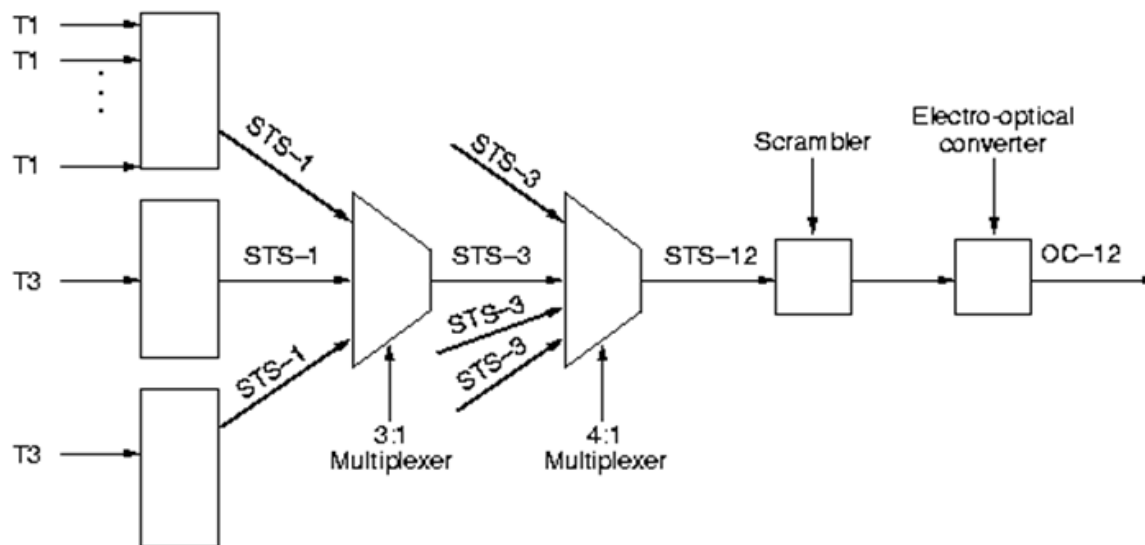


© A.Tenenbaum Computer Networks 1996



© A. Tenenbaum Computer Networks 1996

Два смежных SONET кадра



Мультиплексирование SONET кадров

© A.Tenenbaum Computer Networks 1996

SONET		SDH	Data rate (Mbps)		
Electrical	Optical	Optical	Gross	SPE	User
STS-1	OC-1		51.84	50.112	49.536
STS-3	OC-3	STM-1	155.52	150.336	148.608
STS-9	OC-9	STM-3	466.56	451.008	445.824
STS-12	OC-12	STM-4	622.08	601.344	594.432
STS-18	OC-18	STM-6	933.12	902.016	891.648
STS-24	OC-24	STM-8	1244.16	1202.688	1188.864
STS-36	OC-36	STM-12	1866.24	1804.032	1783.296
STS-48	OC-48	STM-16	2488.32	2405.376	2377.728

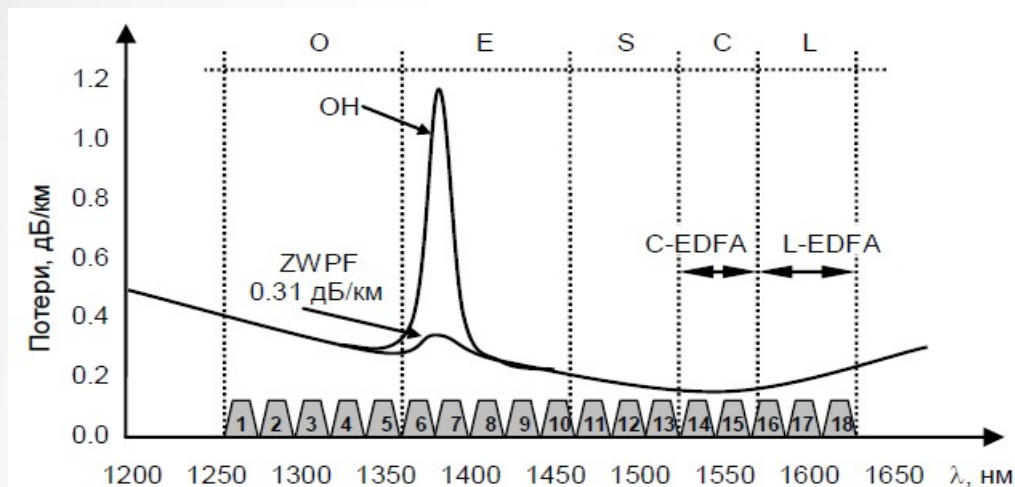
© A.Tenenbaum Computer Networks 1996

Соотношение скоростей при мультиплексировании в SONET и SDH

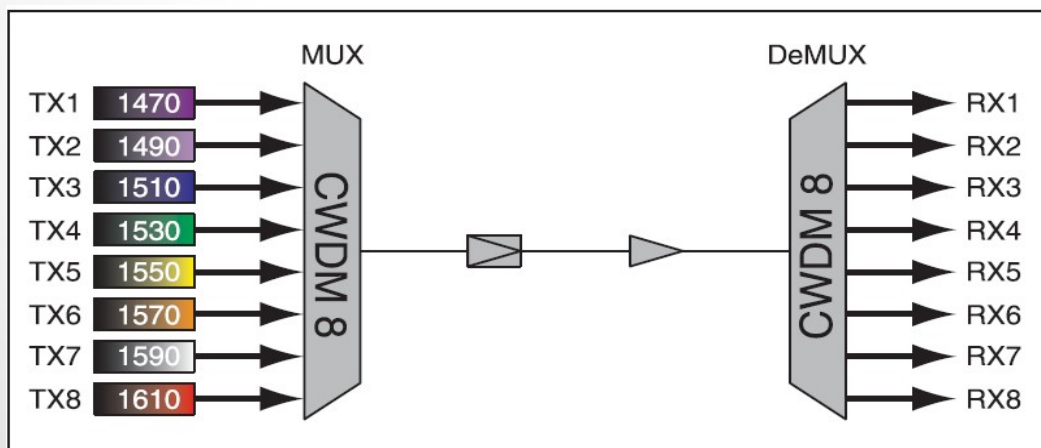
WDM СПД



Принцип работы WDM систем связи



*Стандартом определены
18 спектральных каналов
CWDM, обычно
используются 8.*



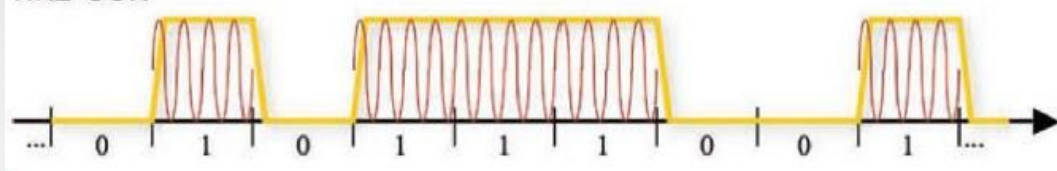
**Схема 8-канальной
CWDM – системы**

*TX1–TX8 – передатчики
CWDM 8 – Mux/Demux
RX1–RX8 – приемники*

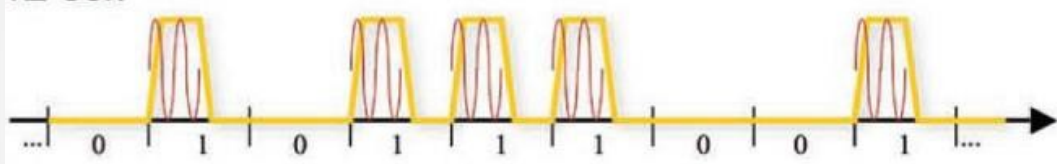


Амплитудные форматы (NRZ OOK и RZ OOK) и коэффициент ошибок BER

NRZ-OOK



RZ-OOK

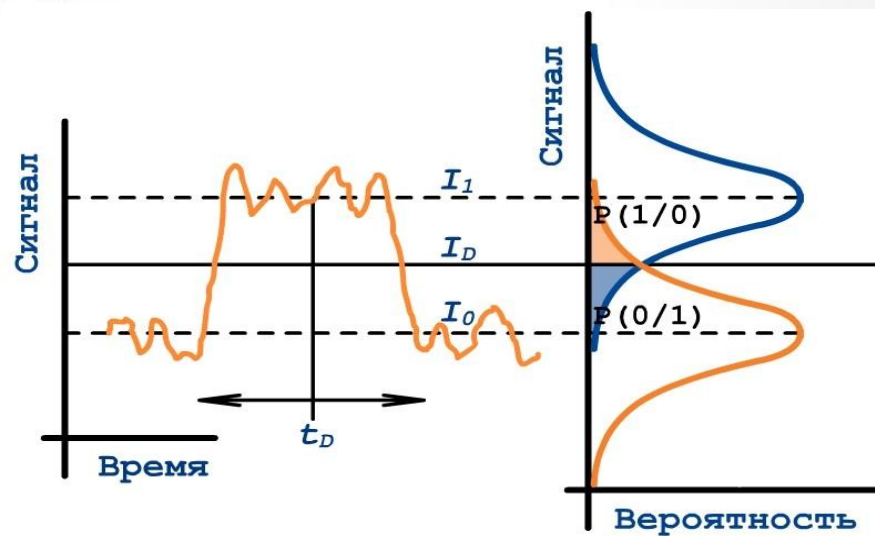


Модуляция амплитуды
Светового сигнала в
формате NRZ OOK и RZ OOK
(слева)

Коэффициент ошибок BER

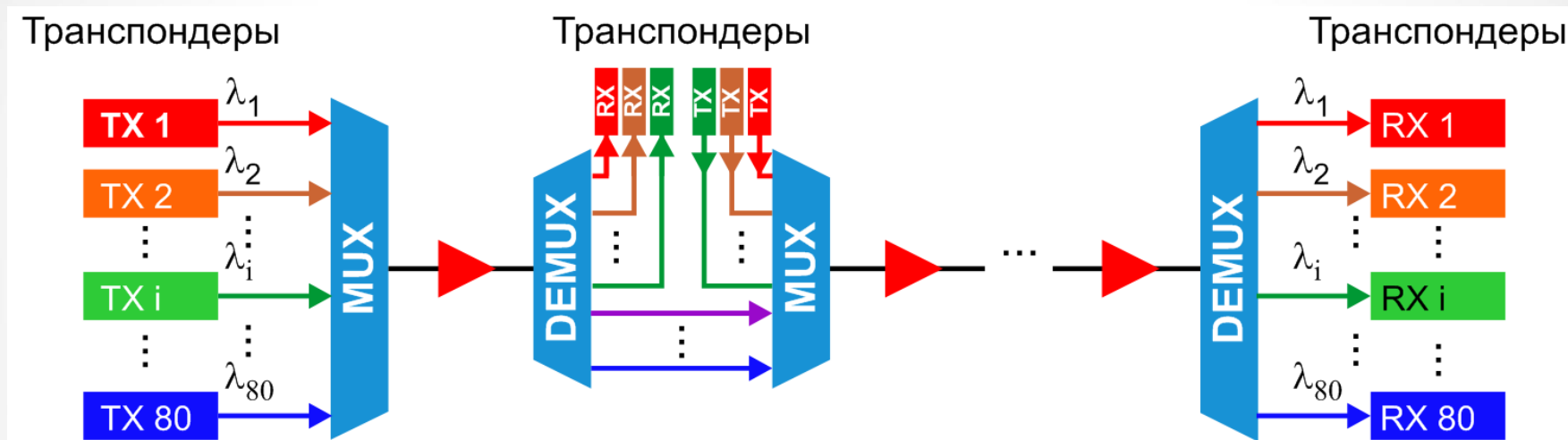
Ошибки возникают из-за ошибочной интерпретации значения символов

В линиях связи без усилителей
источник шумов – приемник
**BER увеличивается с уменьшением
мощности сигнала!**





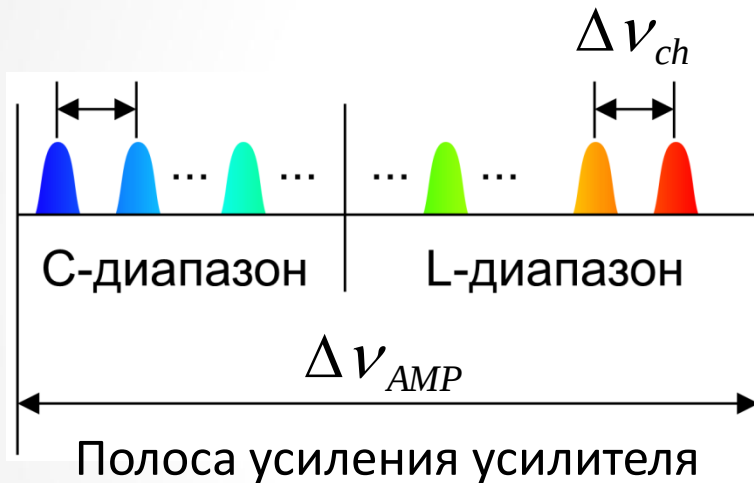
Введение в технологию DWDM



- Прозрачная передача протоколов: OTN OTU1/2/3/4, SDH STM-1/4/16/64/256, Ethernet FE/GE/10GE/100GE и др.
- Одновременное усиление всех спектральных каналов
- Высокая емкость сети при одновременной передаче множества каналов
- Быстрый апгрейд за счет ввода новых каналов. Мультисервисность

Емкость системы передачи

Расстояние между каналами



$\Delta \nu$	$\Delta \lambda$
50 ГГц	0,4 нм
100 ГГц	0,8 нм

При $\Delta \nu_{ch} = 50$ ГГц и $B_{ch} = 100$ Гбит/с :

Число каналов:

$$N_{ch} = \frac{\Delta \nu_{AMP}}{\Delta \nu_{ch}}$$

Скорость передачи:

$$B_{\Sigma} = B_{ch} \cdot N_{ch}$$

Спектральная эффективность:

$$SE = B_{\Sigma} / \Delta \nu_{AMP}$$

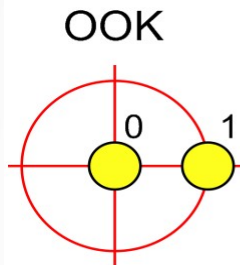
$$SE = B_{ch} / \Delta \nu_{ch}$$

$$SE = 2 \text{ (бит/с)/Гц}$$

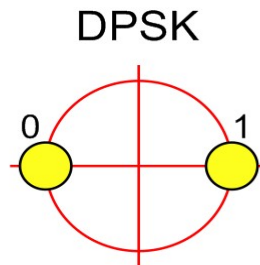
Форматы модуляции

Форматы модуляции

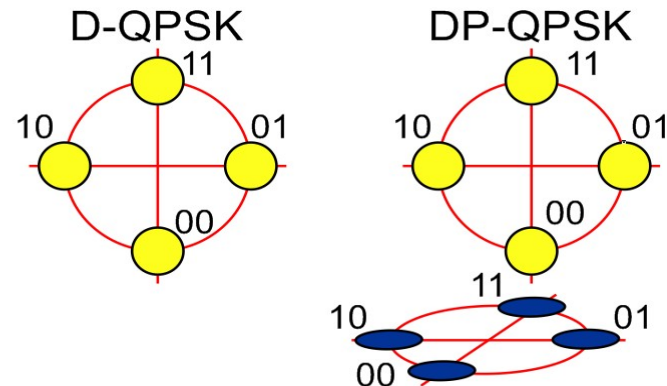
Прямое детектирование



Дифференциальное детектирование



Когерентное детектирование



- OOK (Так же используется обозначение NRZ ASK) – при этой модуляции единицам “1” соответствует наличие оптического излучения, нулям “0” отсутствие излучения
- DPSK – нулю и единице соответствуют сигналы, несущие которых смещены друг относительно друга на π , амплитуда излучения постоянна
- D-QPSK – в одном символе содержится информация сразу о двух переданных битах, четырем значениям символа соответствуют четыре фазы: 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$
- DP-QPSK – передаются два независимых потока QPSK в двух поляризациях



APPLIED
RESEARCH
CENTER FOR
COMPUTER
NETWORKS

OTN/OTH ITU G.709 назначение

“...to cater for the transmission needs of today’s wide range of digital services, and to assist network evolution to higher bandwidths and improved network performance.”

ITU-T G.709 Application Note: 1379



Базовые механизмы OTN

- Усиленный механизм обнаружения ошибок
- Многоуровневый сквозной мониторинг соединений
- Прозрачная передача данных пользователя
- Многоуровневая коммутация

Однако требует нового оборудования и смену системы управления



Forward Error Correction (FEC)

**Снижает пороговое значение для соотношения
 S/N , что позволяет увеличить**

- длину линии без промежуточного усиления
- число каналов в DWDM системе
- снизить мощность сигналов



Forward Error Correction (FEC)

ITU G.709 recommendation - Reed-Solomon Code RS (255,239)

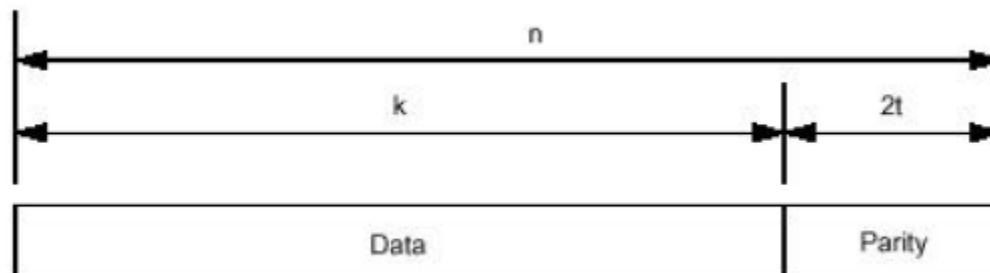
t = длина символа = 8 бит

n = число символов в кодослове = 255 байт

k = количество информационных символов = 239 байт

$$2t = n - k = 255 - 239 = 16$$

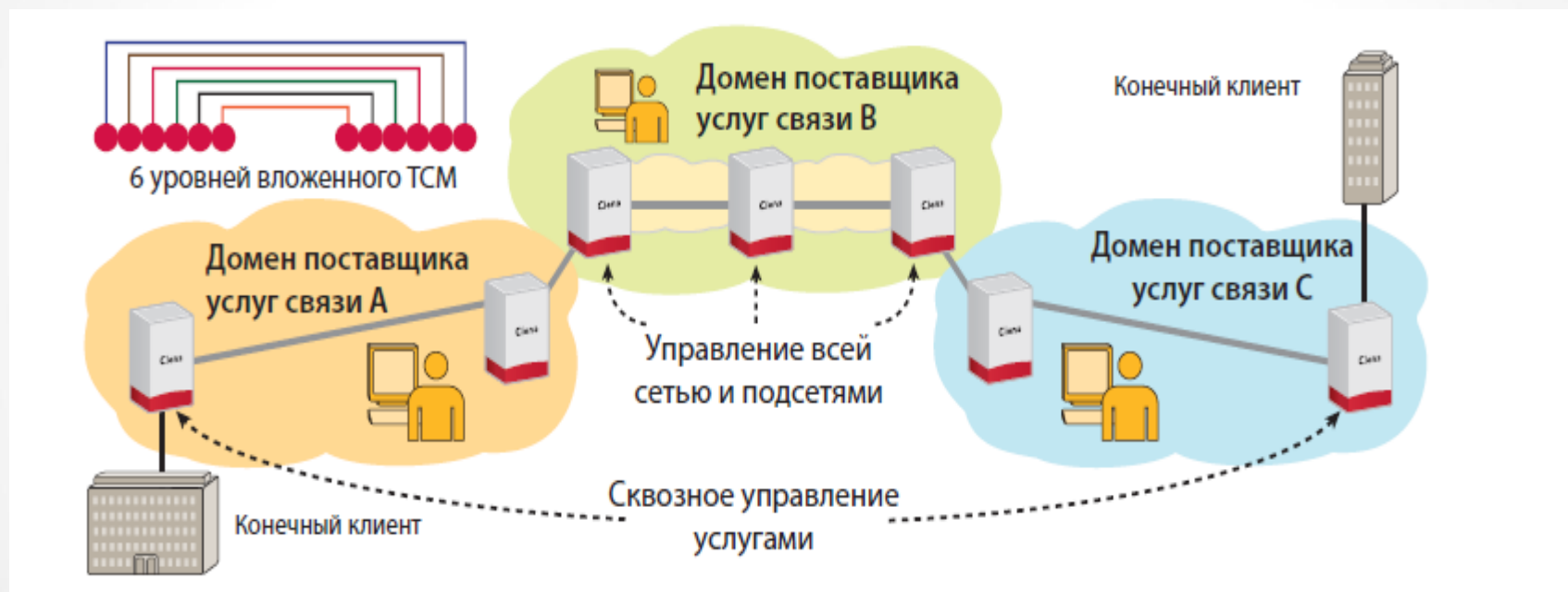
$$t = 8$$



$$\text{RS}(255,239) \text{ max length } n = 2^8 - 1 = 255$$

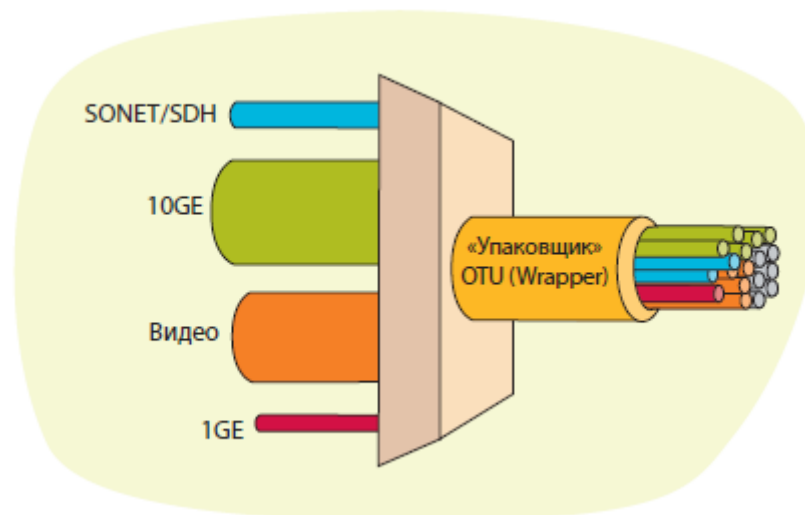


Сквозной мониторинг на всех уровнях (ТСМ)



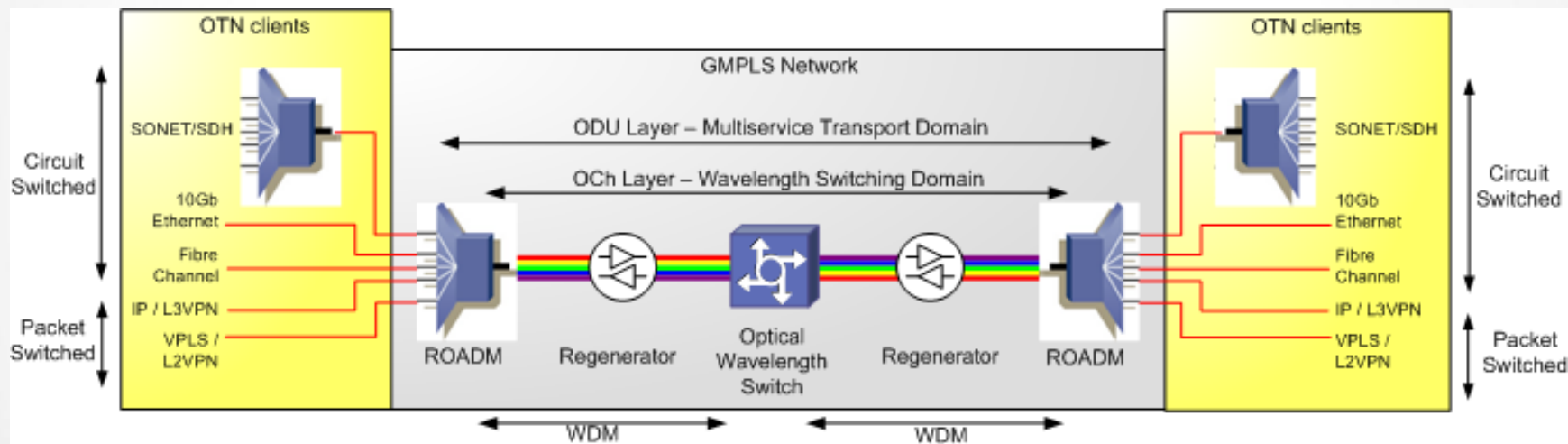


Прозрачный транспорт данных клиентов через OTN





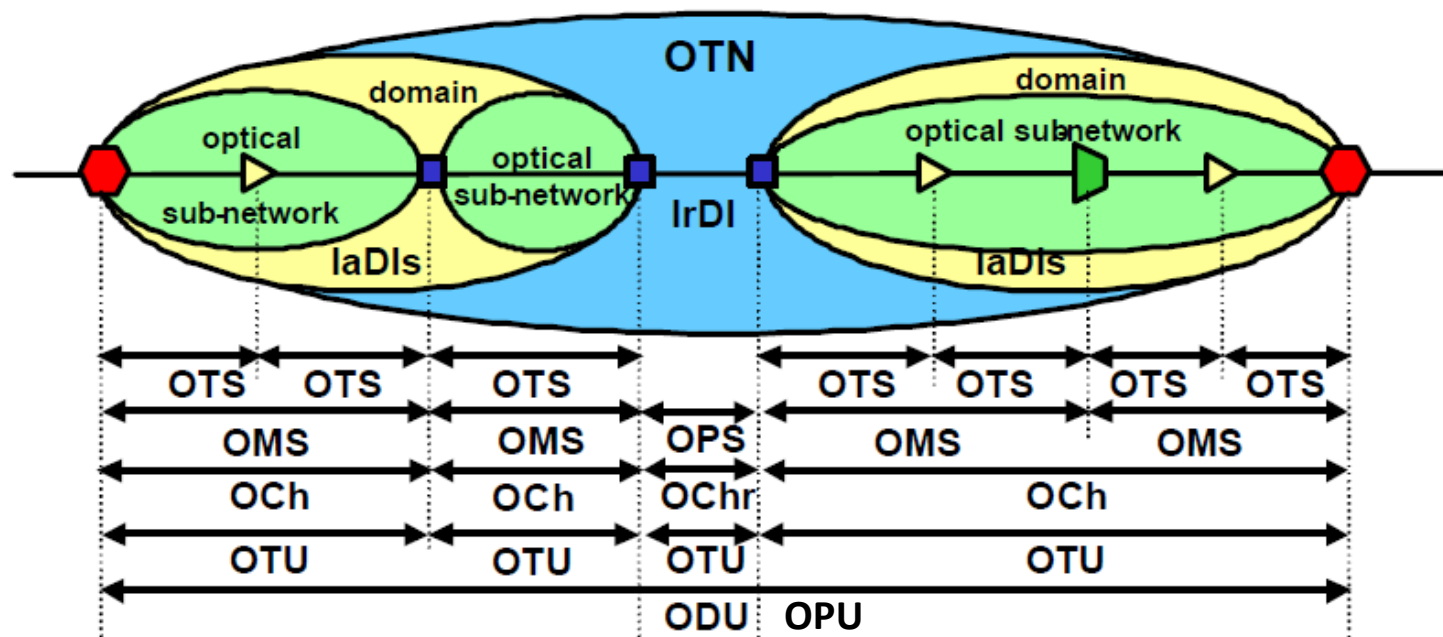
Масштабируемая упаковка





APPLIED
RESEARCH
CENTER FOR
COMPUTER
NETWORKS

Иерархия интерфейсов OTN



Optical line amplifier (OTS termination)



Optical cross connect/addrop/terminal mux (OMS termination)



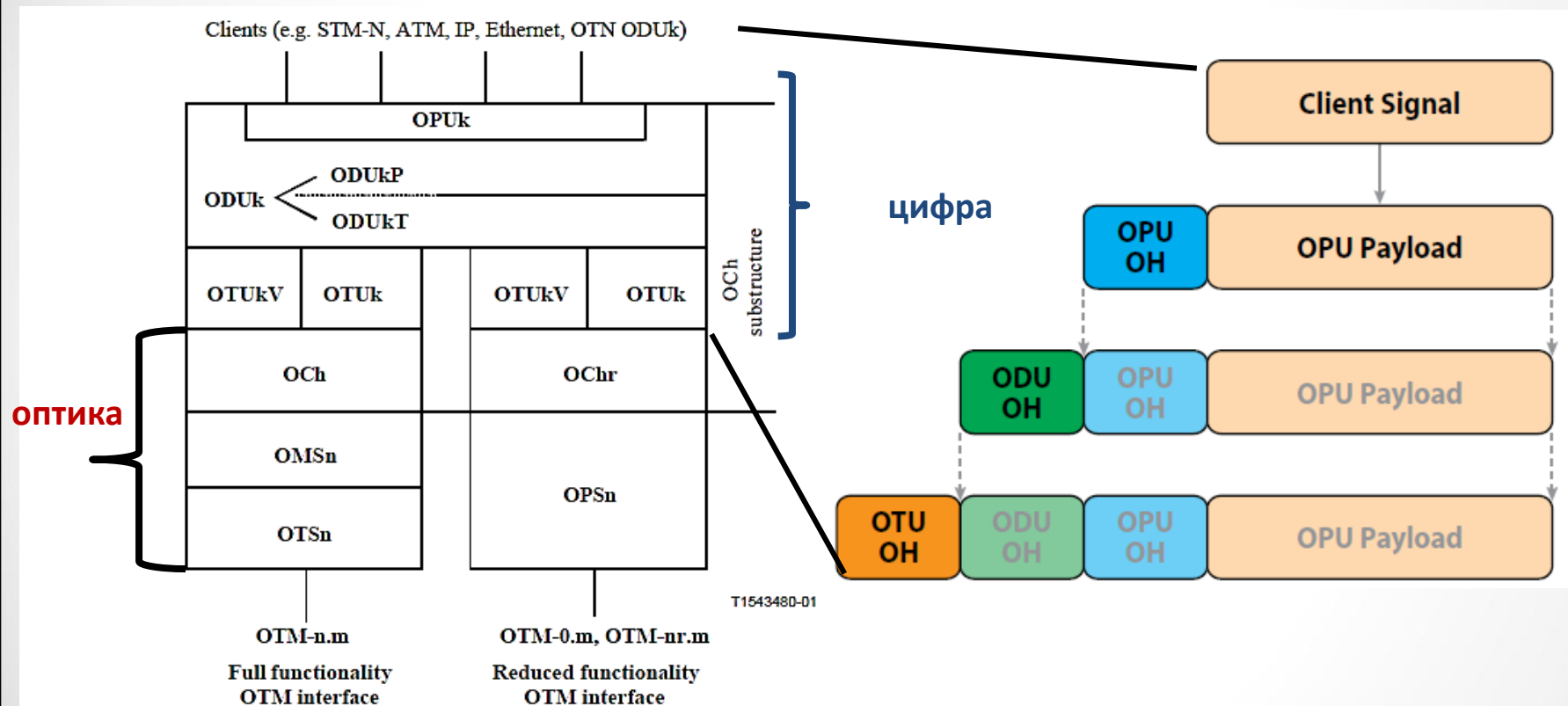
3-R regeneration (OCh, OTU termination)



Client access (ODU termination)



ОТН – Иерархия РДУ





Типы ODU

и их скоростные характеристики

ODU Clients	ODU Server
1.25 Gbit/s bit rate area	ODU0
—	
2.5 Gbit/s bit rate area	ODU1
ODU0	
10 Gbit/s bit rate area	ODU2
ODU0, ODU1, ODUflex	
10.3125 Gbit/s bit rate area	ODU2e
—	
40 Gbit/s bit rate area	ODU3
ODU0, ODU1, ODU2, ODU2e, ODUflex	
100 Gbit/s bit rate area	ODU4
ODU0, ODU1, ODU2, ODU2e, ODU3, ODUflex,	

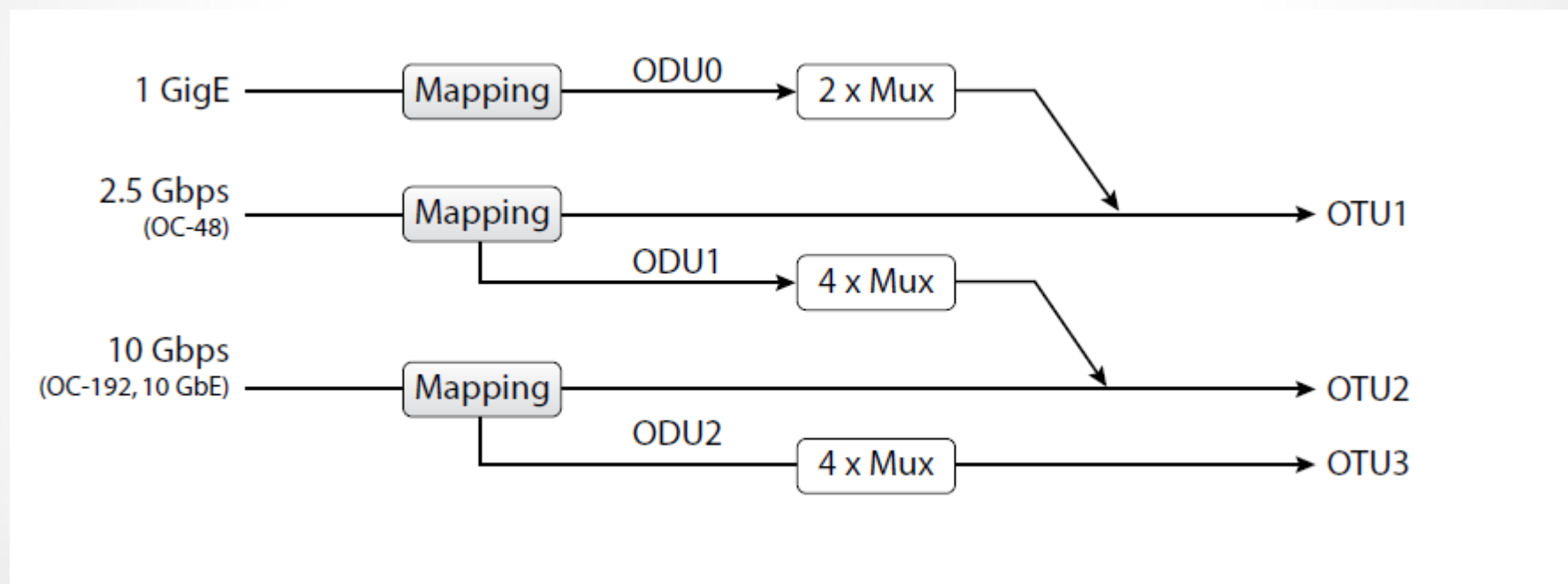


OTU скорости и интерфейсы

G.709 Interface	Line Rate	Corresponding SONET/SDH Rate	Line Rate
OTU1	2.666 Gbit/s	OC-48/STM-16	2.488 Gbit/s
OTU2	10.709 Gbit/s	OC-192/STM-64	9.953 Gbit/s
OTU3	43.018 Gbit/s	OC-768/STM-256	39.813 Gbit/s

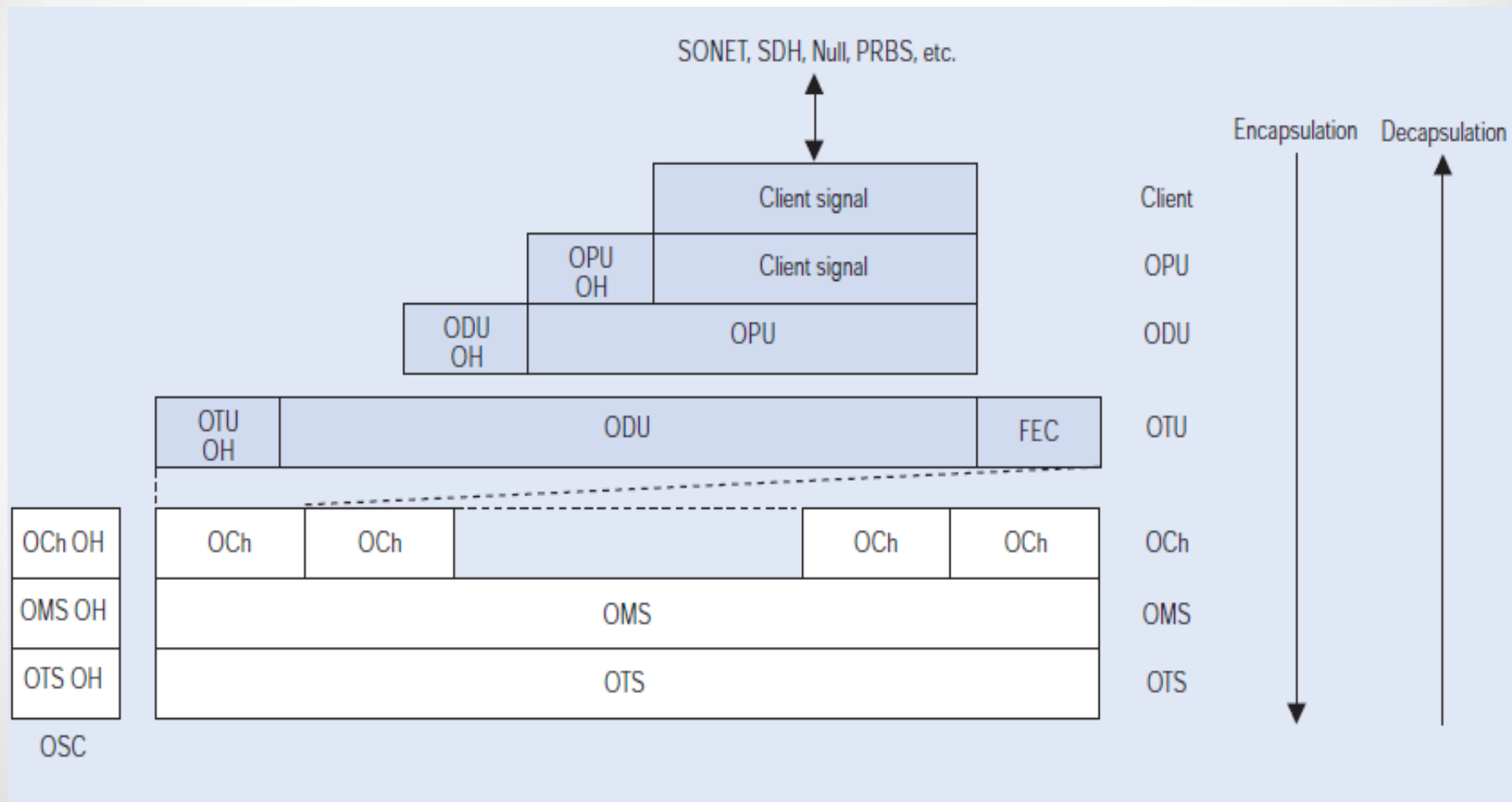


Соответствие между ODU и OTU



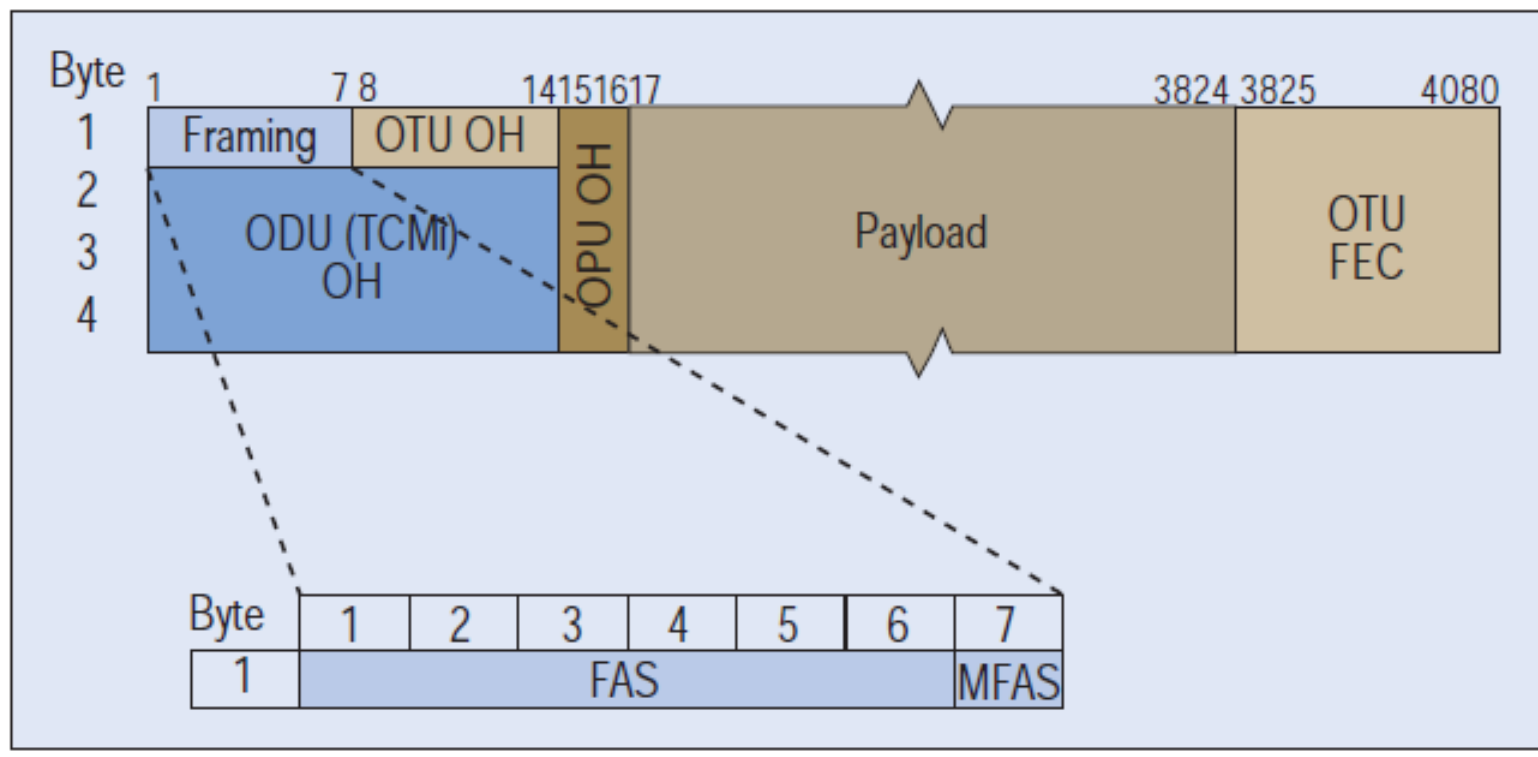


Базовые информационные структуры



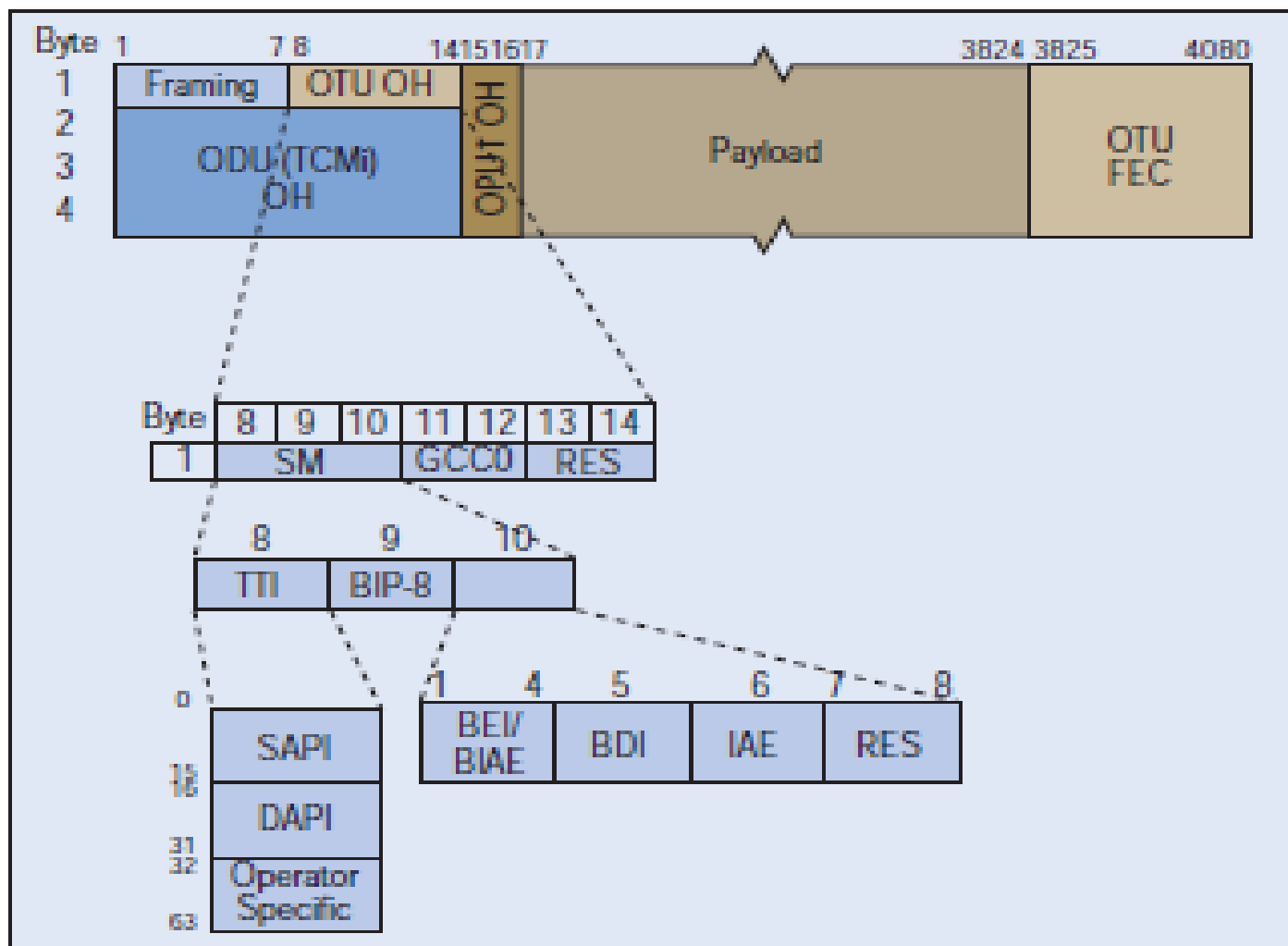


Структура OTU кадра



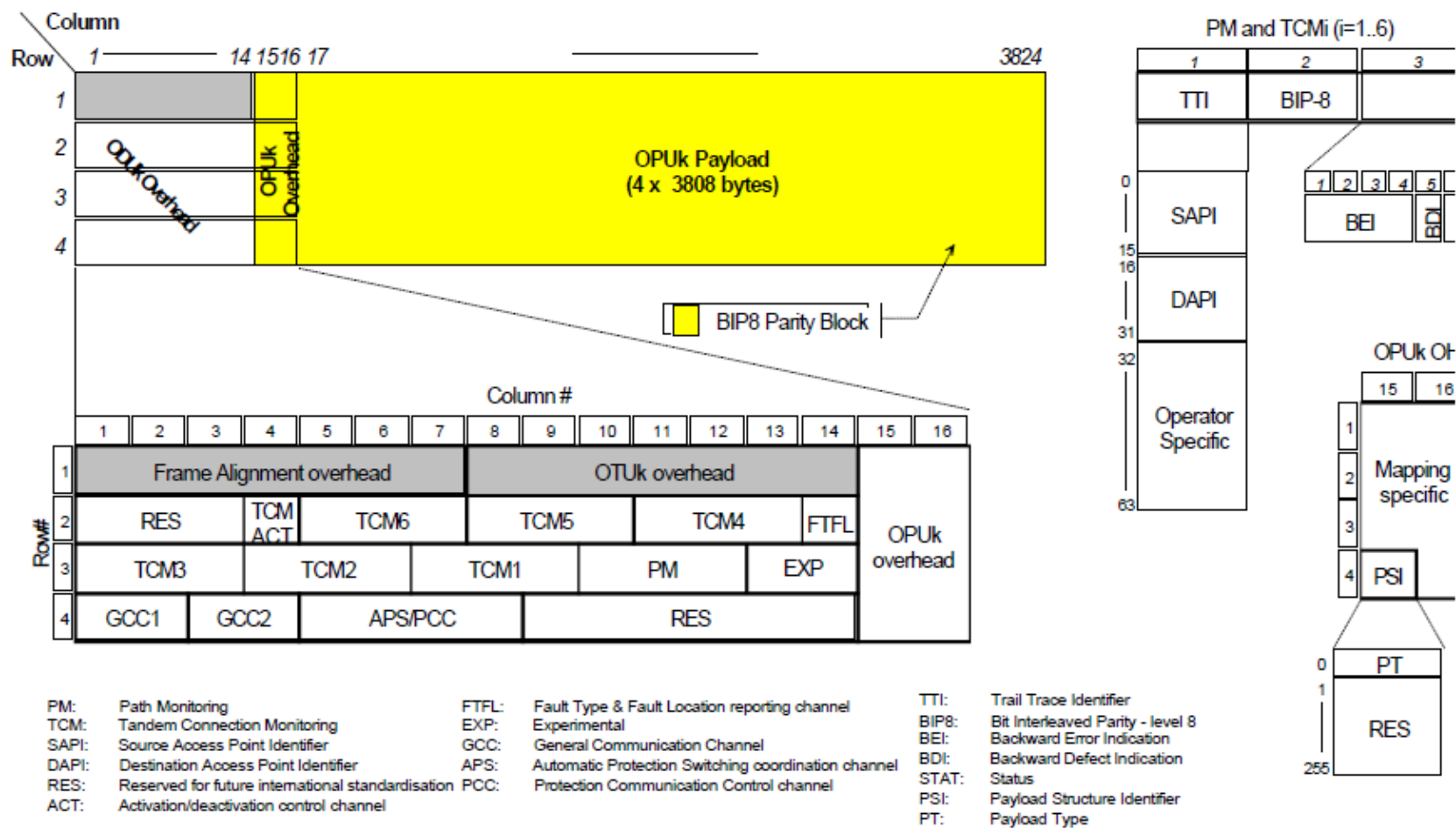


OTU заголовок



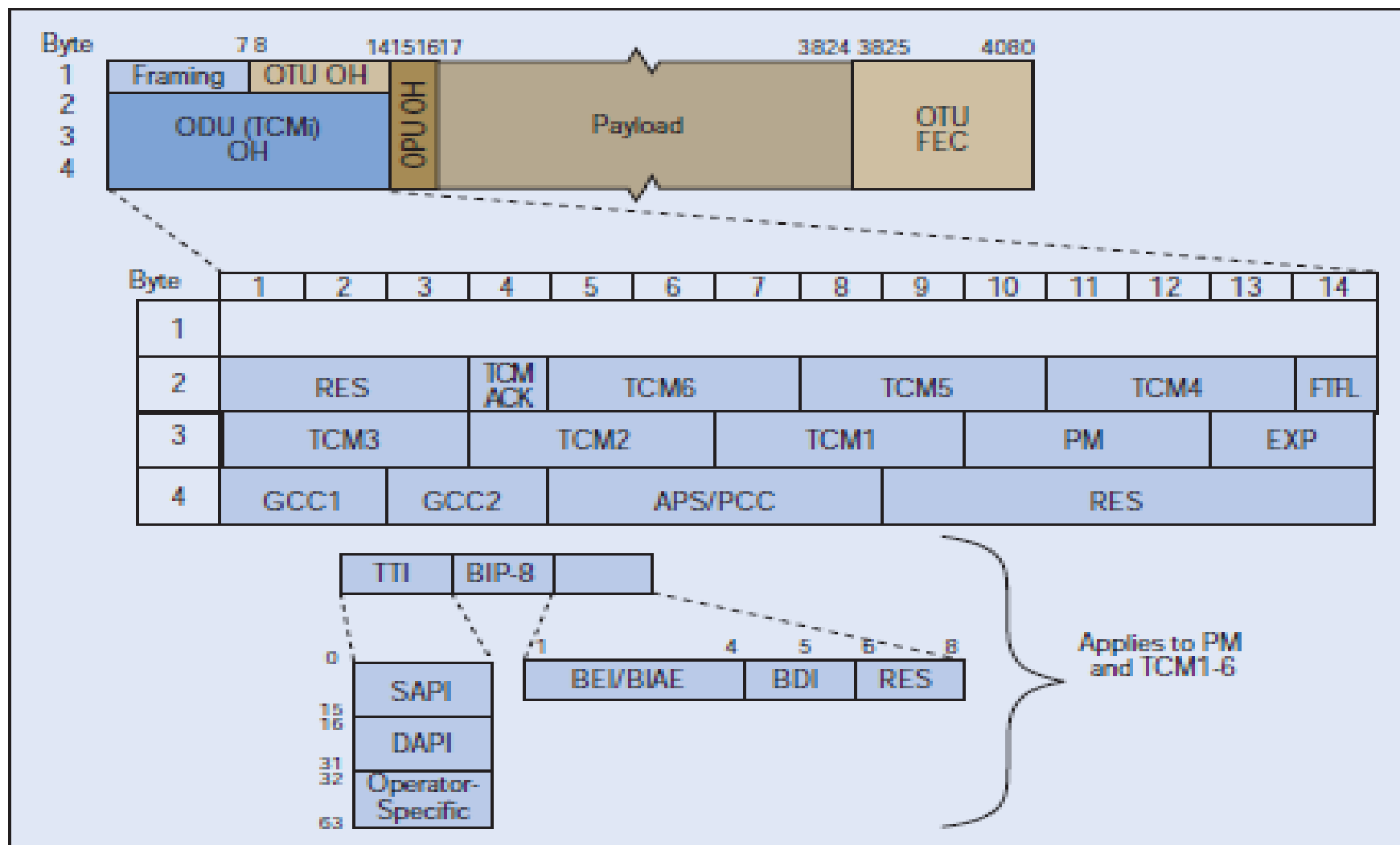


Структура ODU кадра



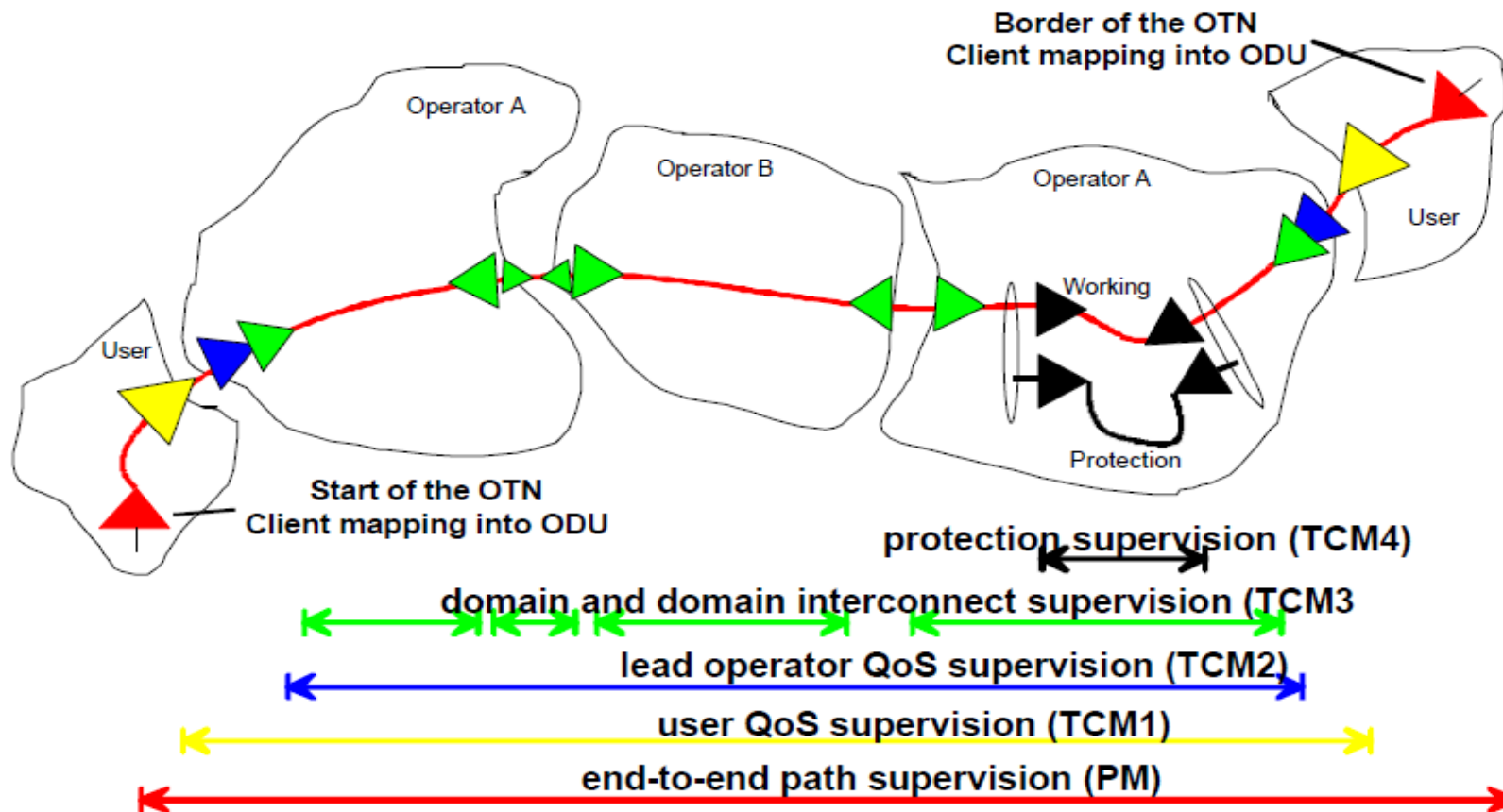


ODU заголовок



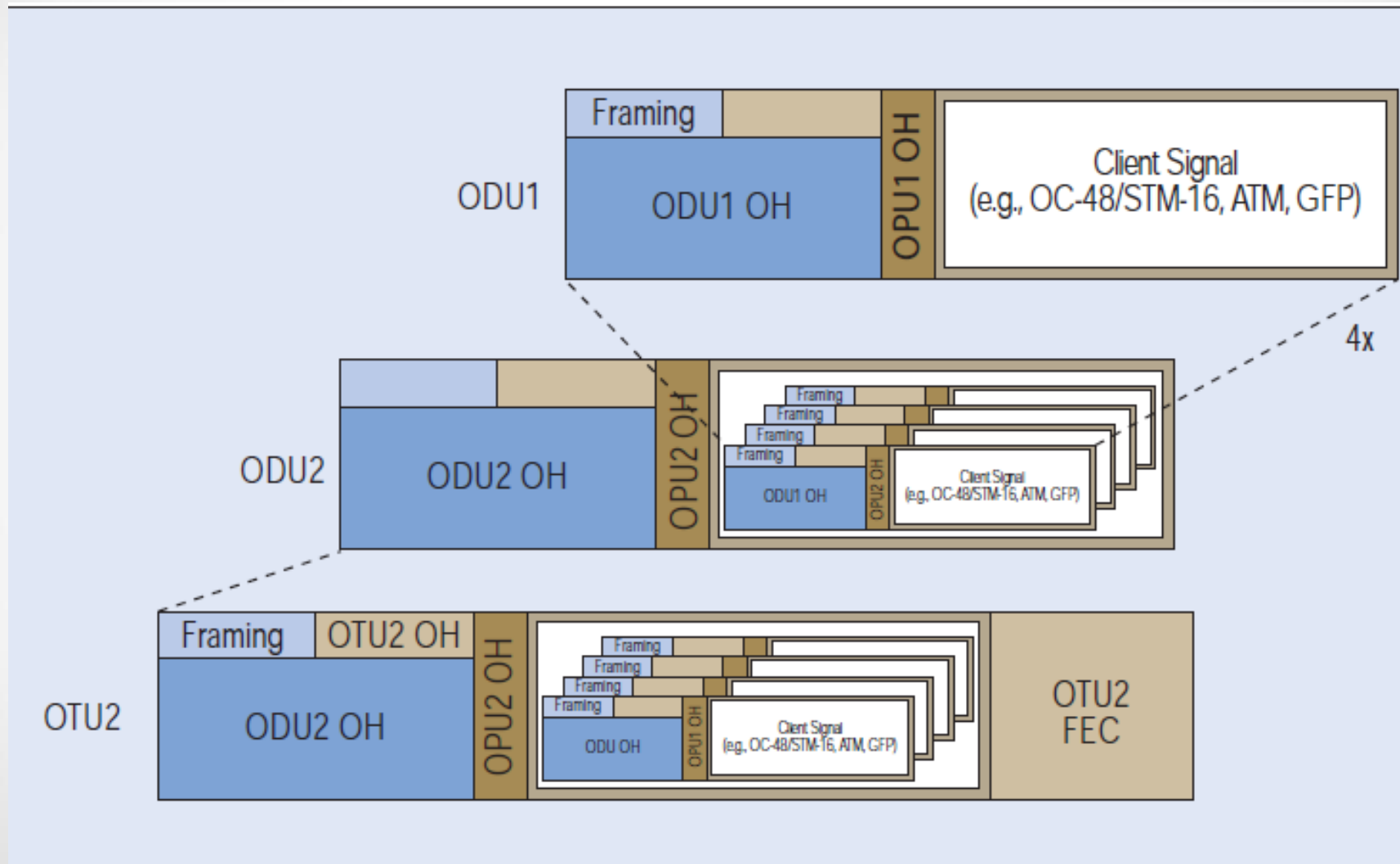


Мониторинг в OTN



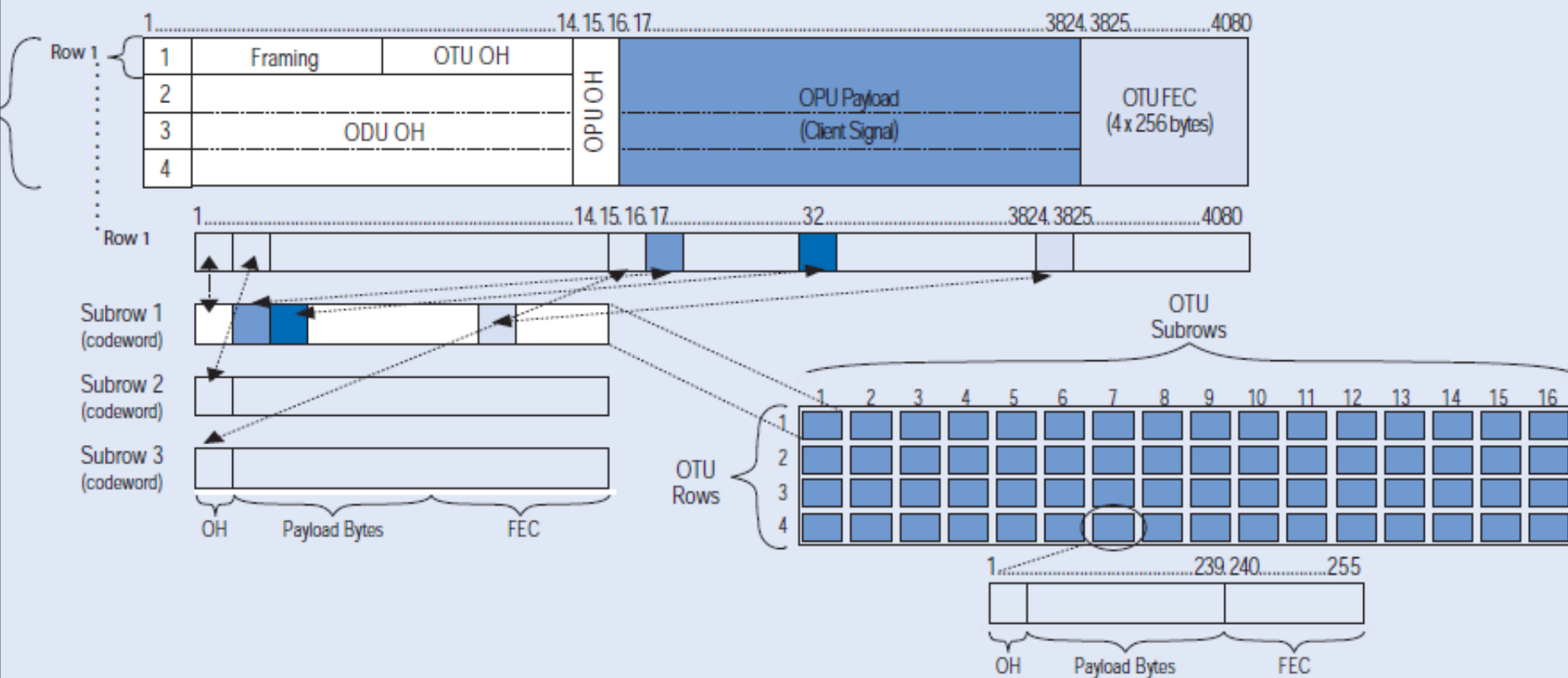


ODU мультиплексирование



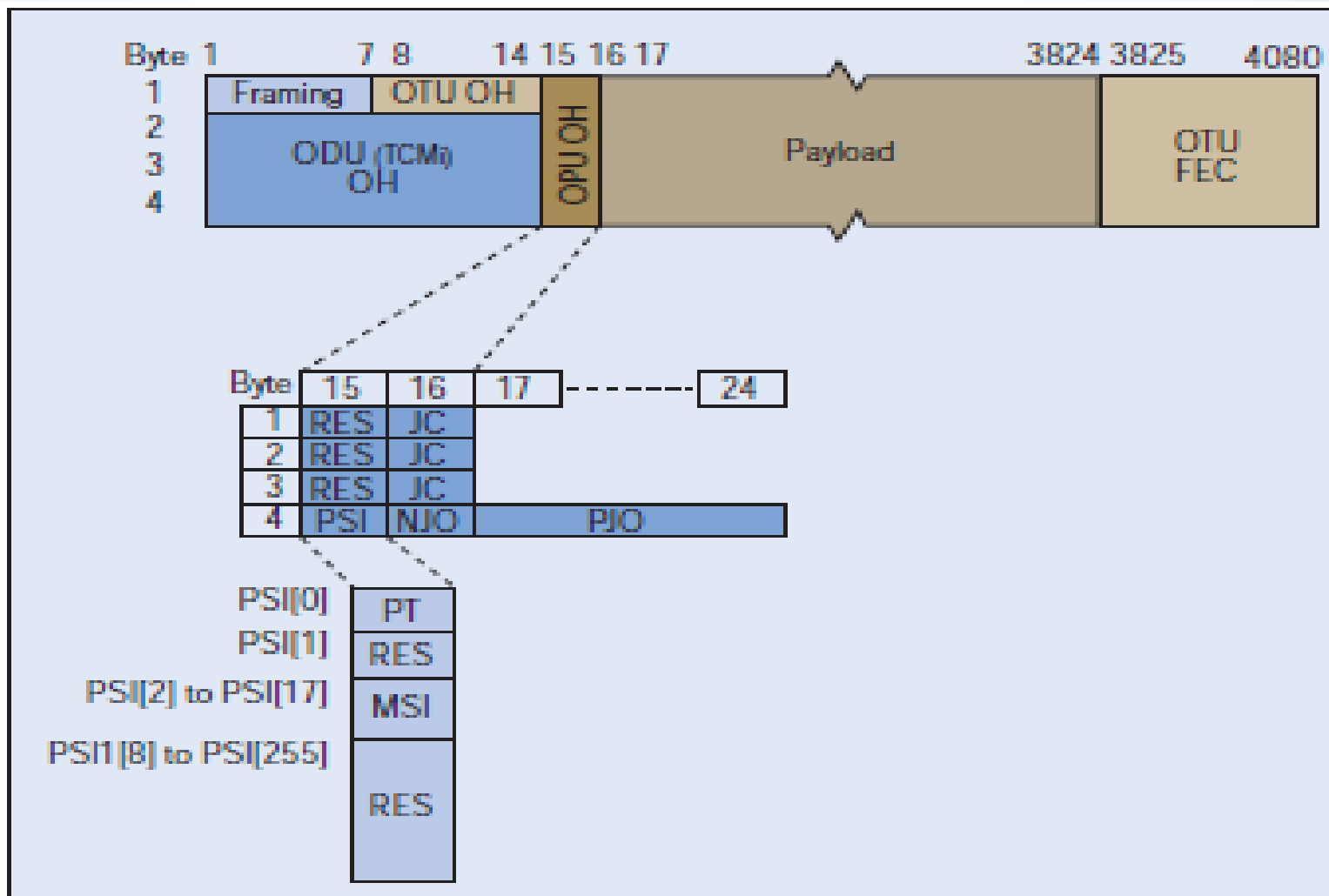


FEC механизм





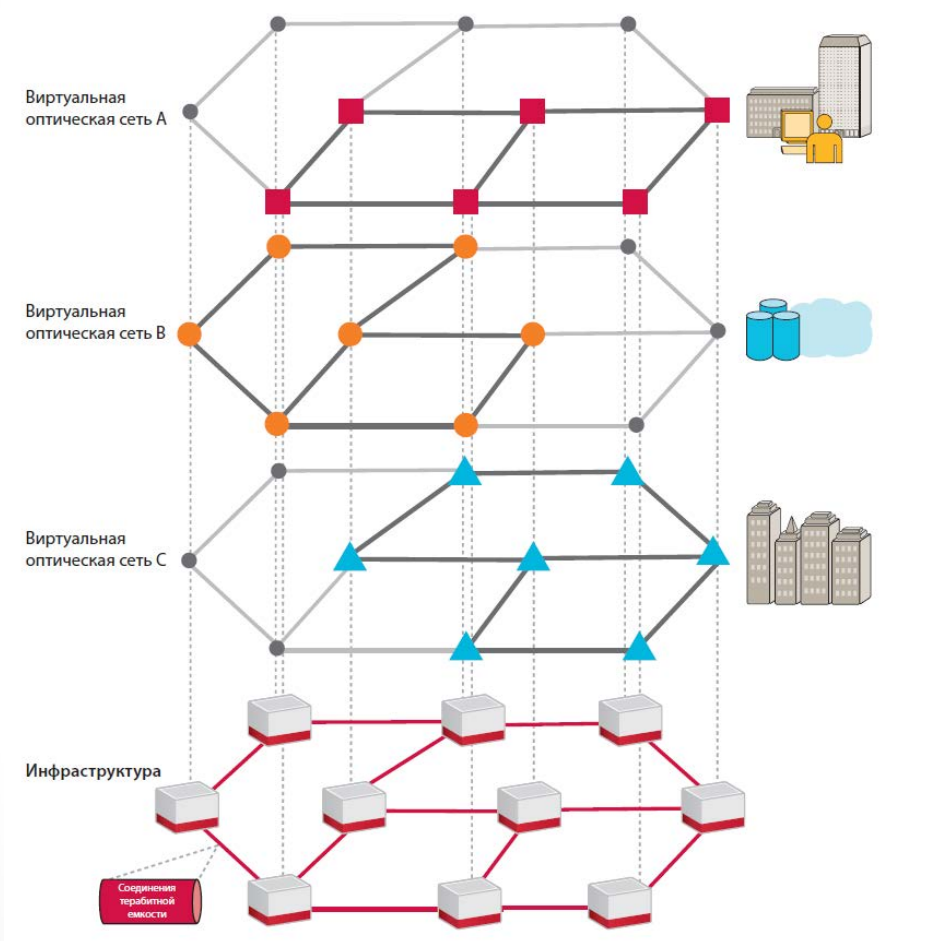
Структура OPU кадра



Примеры применения

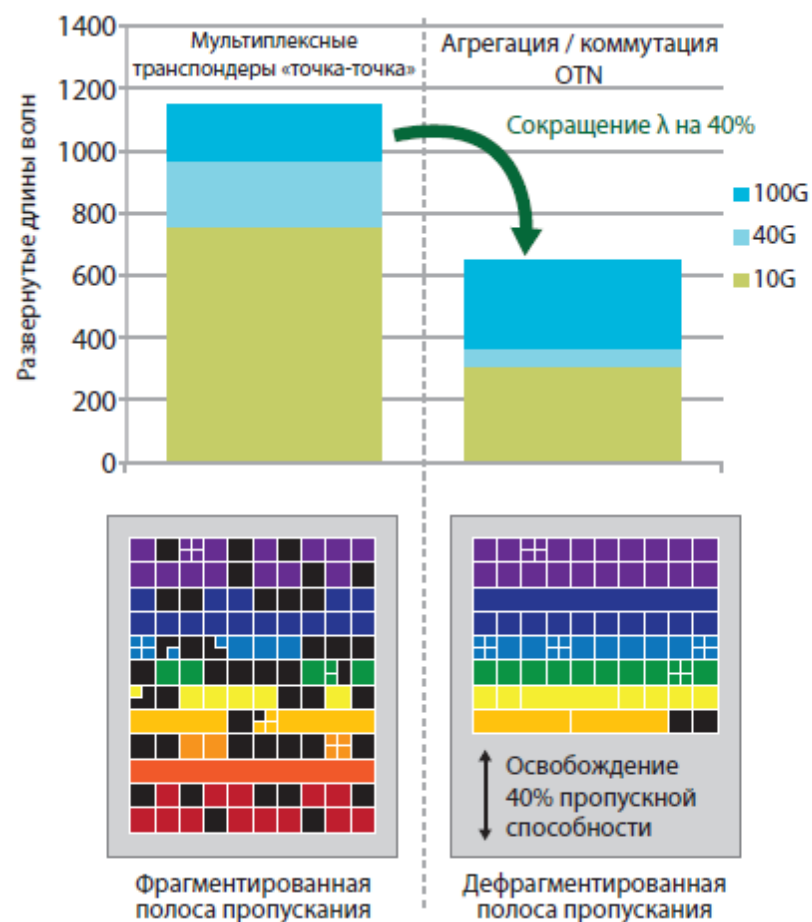


Виртуальные сети на база OTN





Дефрагментирование загрузки линий





OTN и динамическое управление в супер облаке



OTN – достоинства

1. OTN обеспечивает предсказуемое и простое предоставление услуг.
2. Эффективная интеграция коммутации OTN с существующей транспортной сетью OTN.
3. Упрощение операций.
4. Измерение задержки в режиме реального времени.
5. Виртуализация сети.
6. Базовая сеть без потерь.
7. Несколько классов обслуживания.
8. Усовершенствованные возможности сквозного мониторинга услуг.
9. Четкий путь развития до 100G и далее.
10. Динамическая инфраструктура.

Заключение

- Услуги для клиентов имеют множество различий: от скорости передачи данных до требований по качеству и уровню надежности.
- Сети с коммутацией пакетов не всегда могут удовлетворить строгие требования высокопроизводительных услуг, такие как минимальный уровень задержки, отсутствие потерь, высокая скорость передачи данных и предсказуемое время восстановления (не более 50 мс).
- OTN обеспечивает предсказуемую и простую модель предоставления услуг, дополняющую сети с коммутацией пакетов, благодаря уникальным возможностям и функциям, таким как прозрачность услуг, сквозной мониторинг, усиленную коррекцию ошибок, встроенные средства измерения задержки, которые необходимы для соответствия строгим требованиям услуг с высоким качеством канала и специальных сервисов.