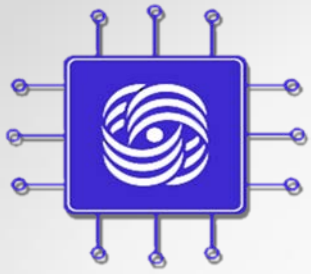


Оптические сети передачи данных

Доп. главы Компьютерных сетей и
телекоммуникации
чл-корр. РАН Смелянский Р.Л.



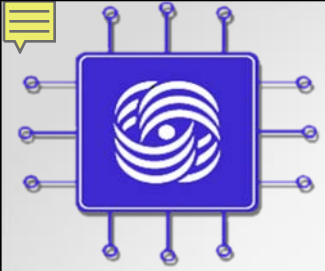
Рынок оптических сетей

1. 76% респондентов планируют развертывание коммутации OTN;
2. OTN играет центральную роль в 90+% дальней связи и 96% узлов городских сетей;
3. 94% респондентов признают коммутацию OTN ключевым средством повышения коэффициента использования длин волны 40G и 100G;
4. 69% респондентов считают, что коммутация OTN позволит автоматизировать конфигурацию сети для реализации новых услуг.

Рис. 1. Динамика общей протяженности магистральных ВОЛС крупных операторов и ключевые факторы роста в 1995 – 2020 гг., в тыс. км



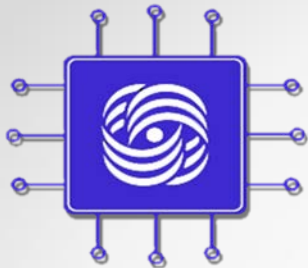
Источник: J'son & Partners Consulting



AT&T wraps single-wavelength 400 Gigabit Ethernet testing, aligns with upcoming IEEE standard

Sep 11, 2017 11:52am



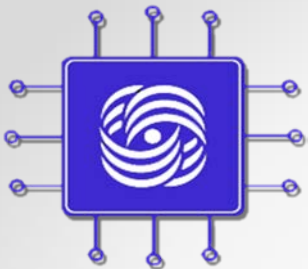


Физические свойства носителей

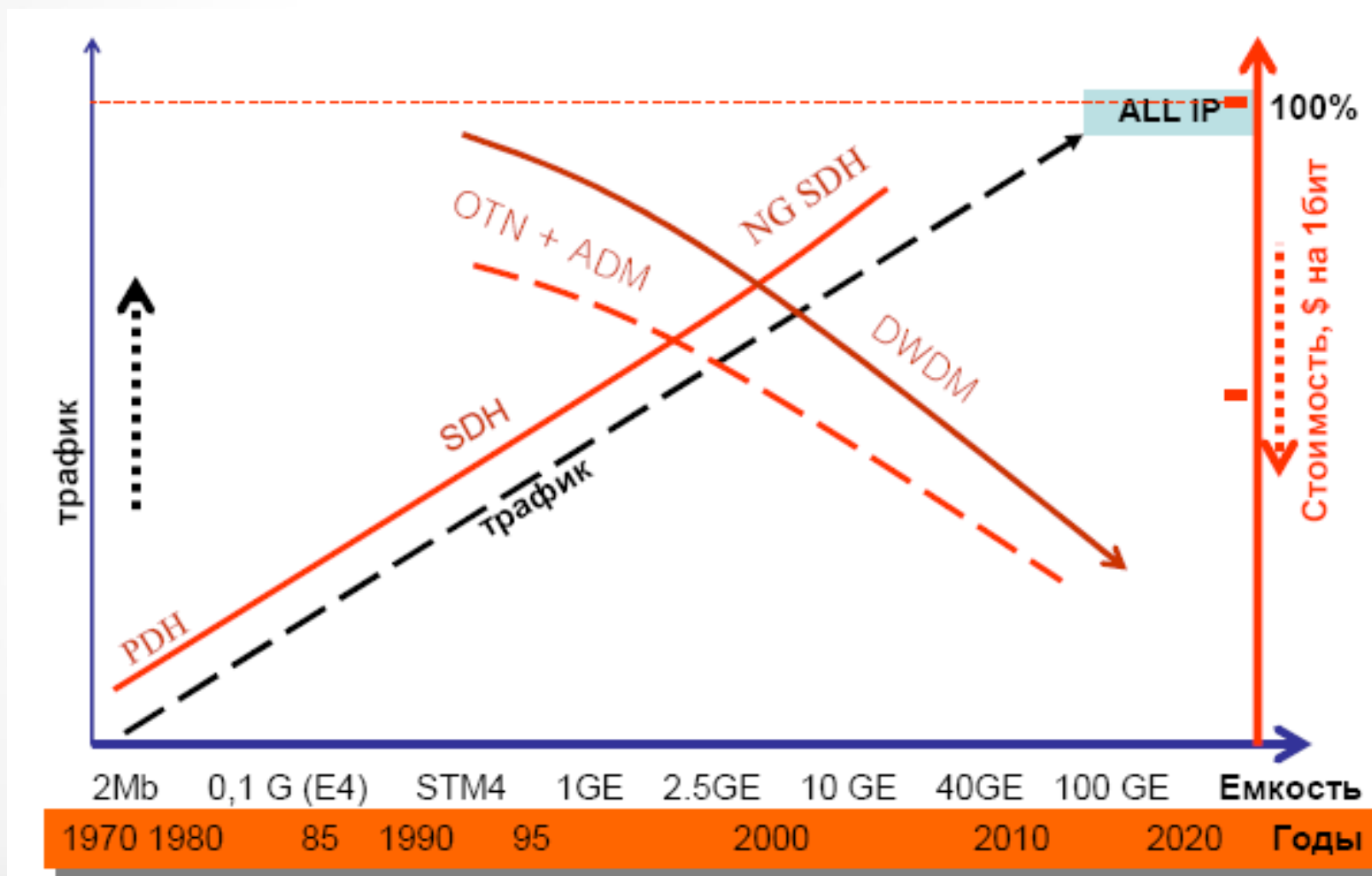
Table 4.1 Point-to-Point Transmission Characteristics of Guided Media [GLOV98]

	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

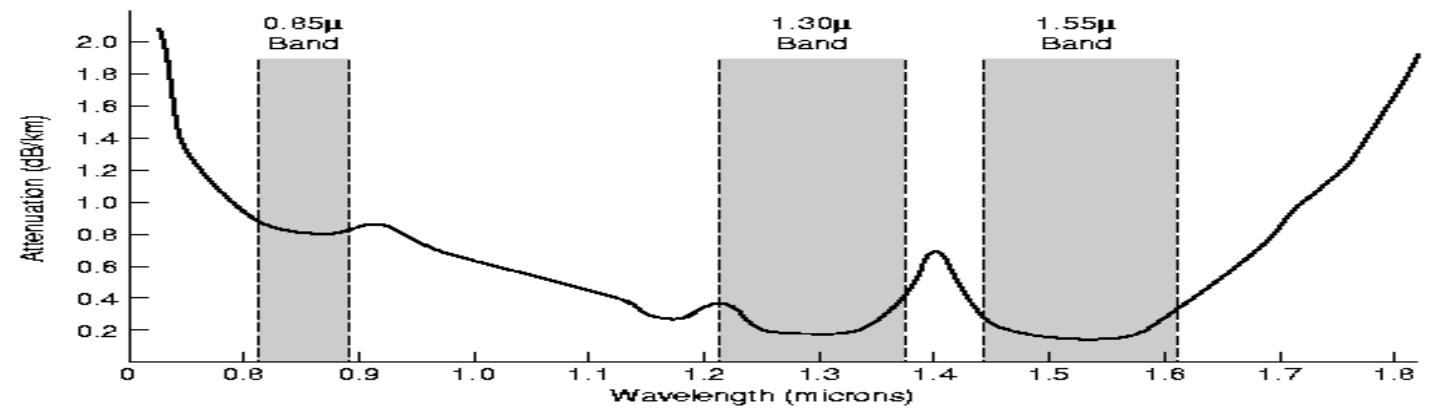
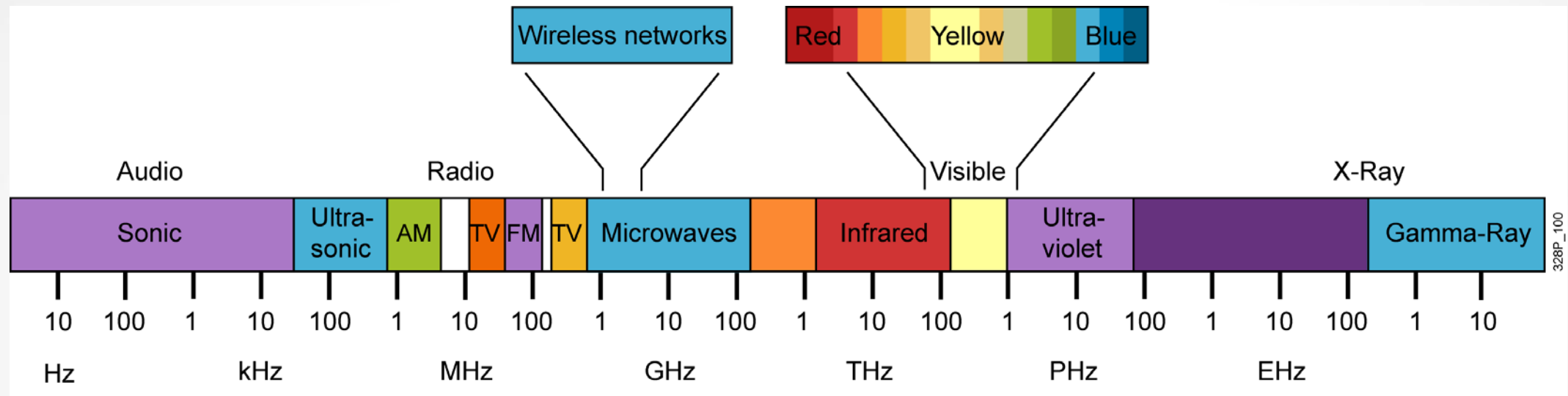
THz = TeraHerz = 10^{12} Hz.

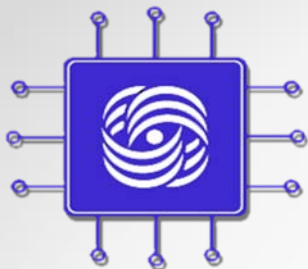


Снижение стоимости с ростом скорости

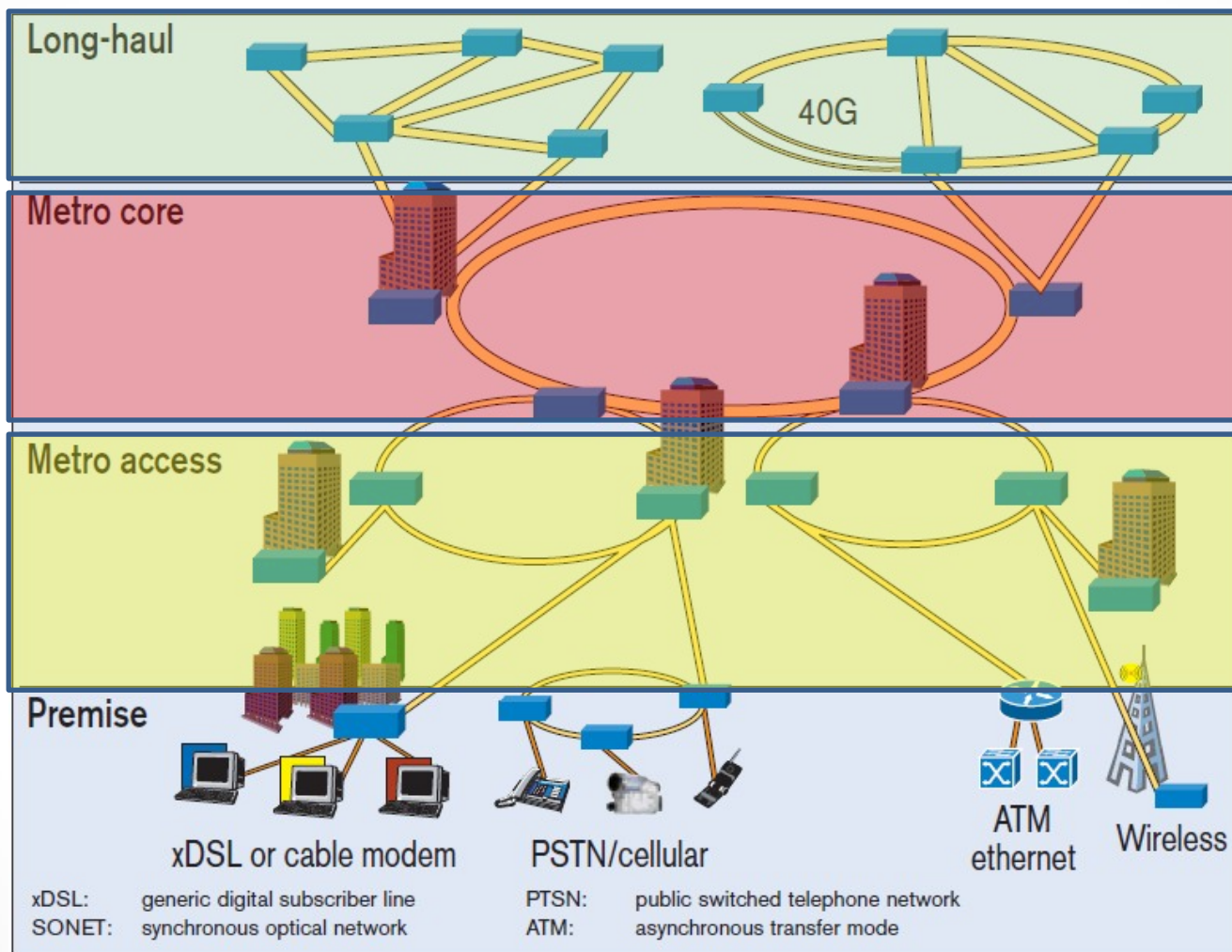


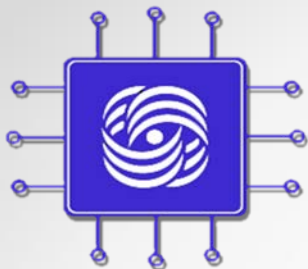
Затухание света в инфракрасном диапазоне в оптоволокне





Структура современной сети





Трансокеанские оптические линии

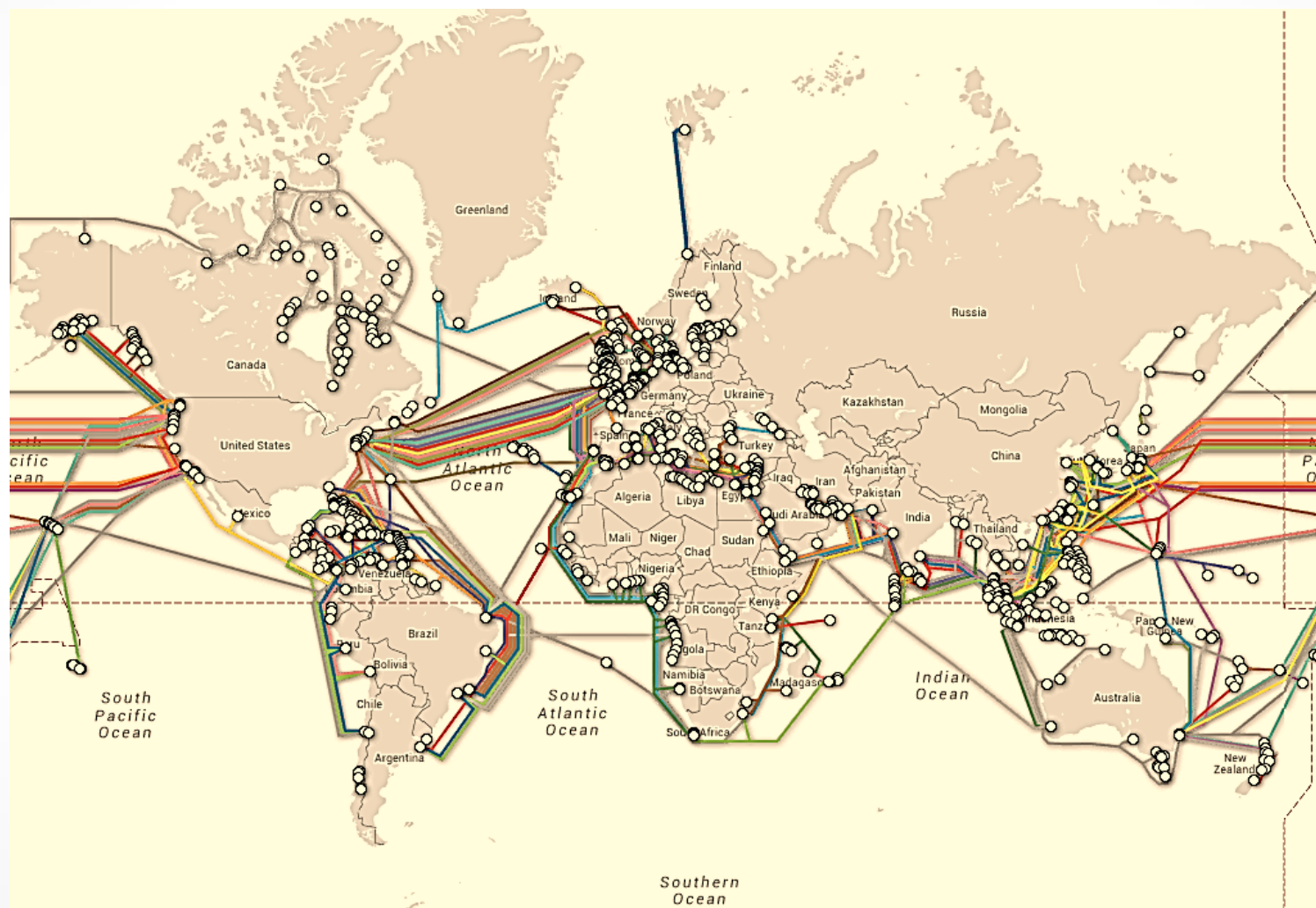
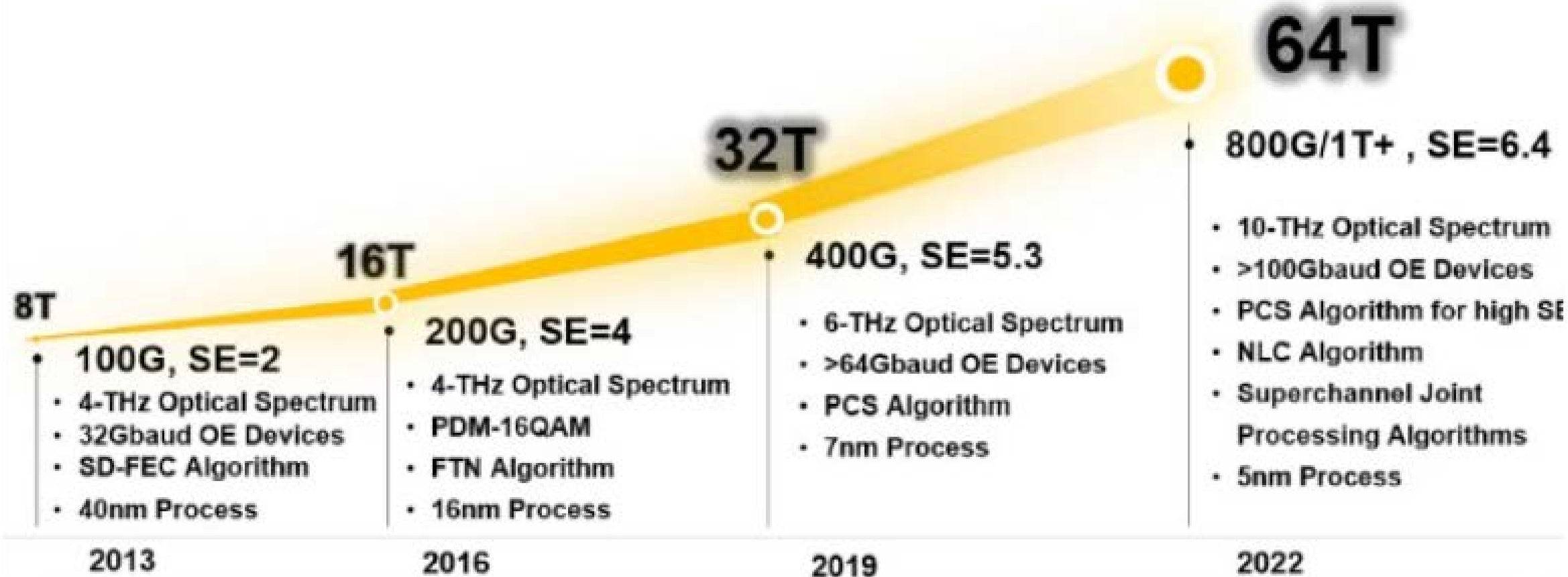
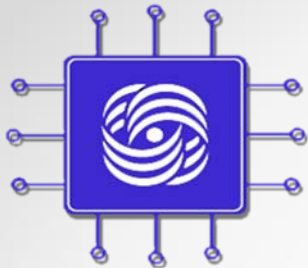


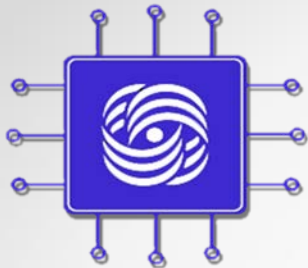
Рис. 2. Технологические достижения и переход на мощные системы передачи в волоконно-оптических сетях



Источник: *iScience (Huawei)*

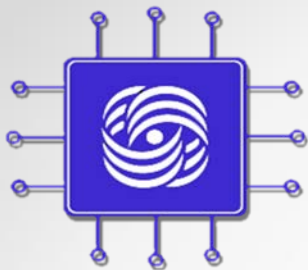


CWDM и DWDM системы

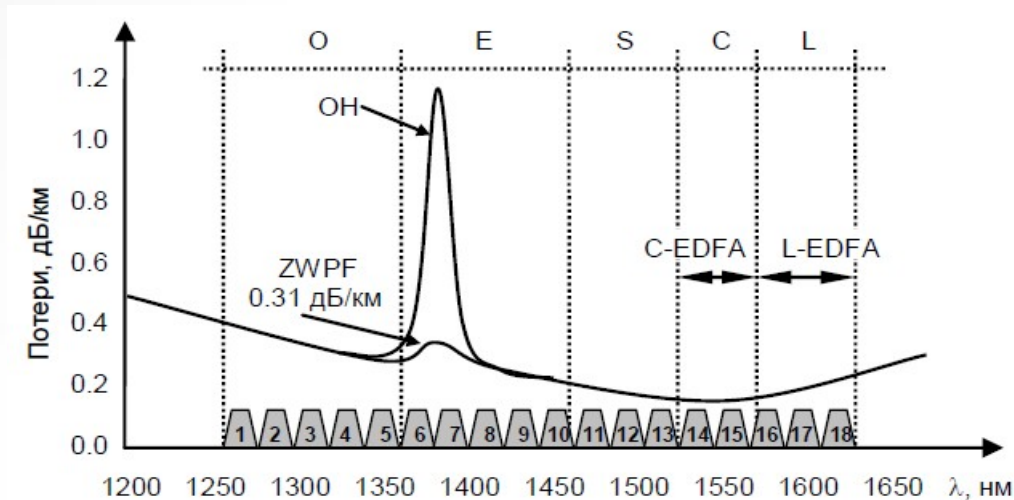


Методы увеличения скорости передачи

- TDM 1980-2000
Скорость электронных компонентов
Максиальная скорость ~ 10 Гбит\с
- WDM: CWDM и DWDM
CWDM – увеличение в 18 (макс) обычно в 8 раз
(плотность расположения каналов: 20 нм)
DWDM - увеличение скорости в 100 раз *(плотность расположения каналов: 100 ГГц или 50 ГГц (0,8 или 0,4 нм))*
- Когерентные системы связи + плездохронные форматы



Принцип работы систем связи CWDM (Coarse Wave Division Multiplexing)



Стандартом определены 18 спектральных каналов CWDM, обычно используются 8.

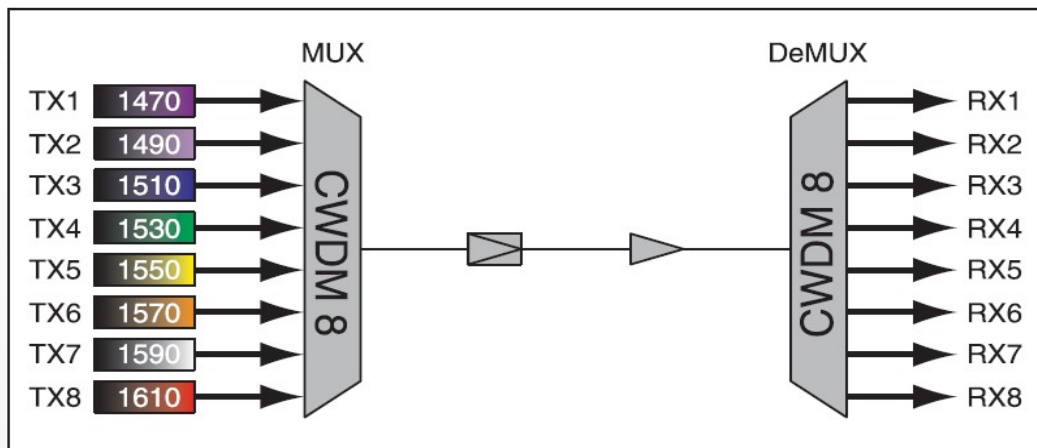
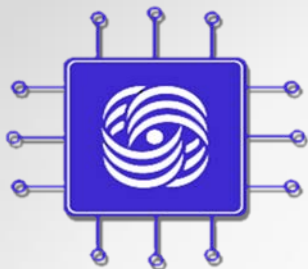
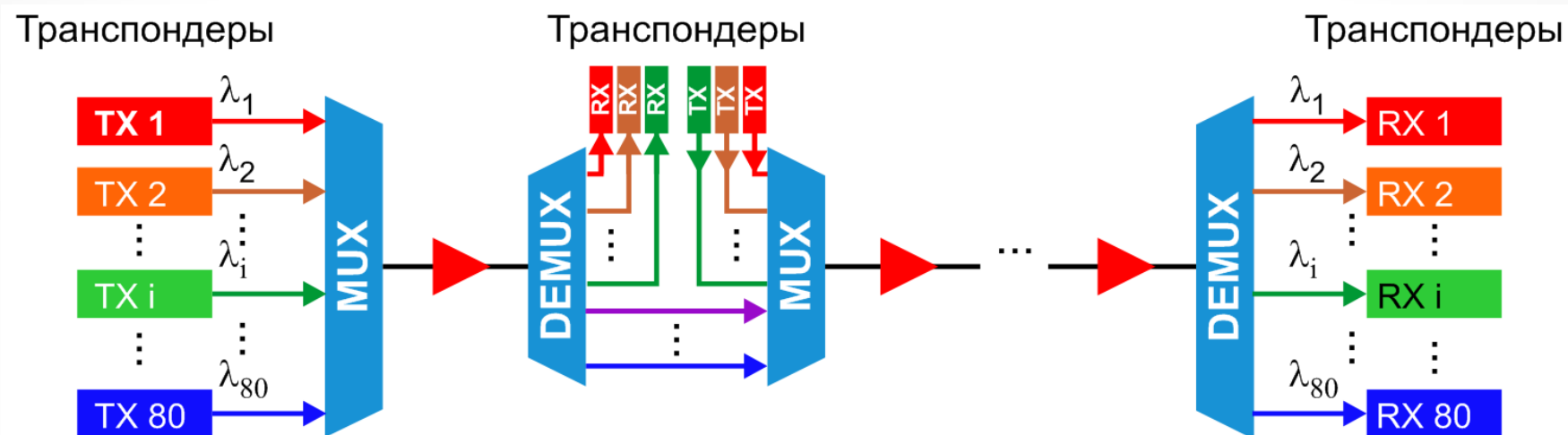


Схема 8-канальной CWDM – системы

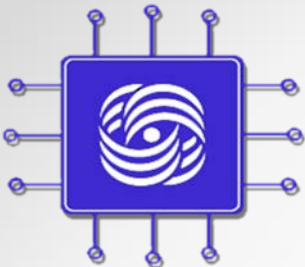
*TX1–TX8 – передатчики
CWDM 8 – Мух/Детих
RX1–RX8 – приемники*



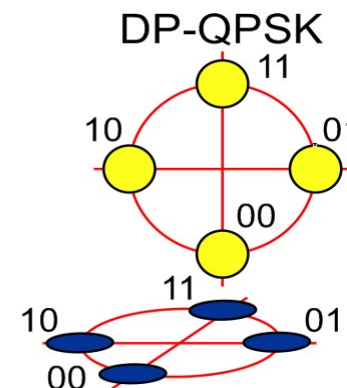
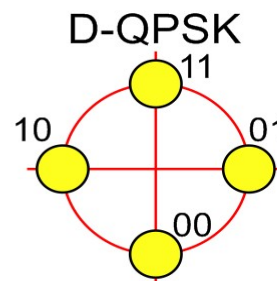
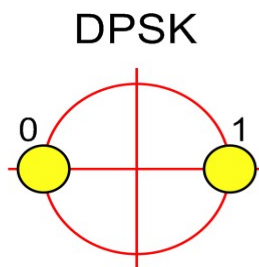
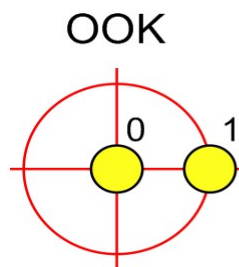
Технология DWDM



- 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



Формы модуляции



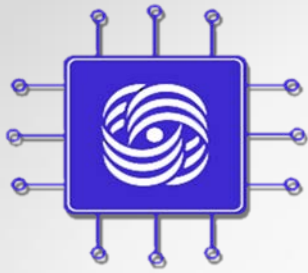
Детектирование

Прямое

Дифференциальное

Когерентное

- 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 180, 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



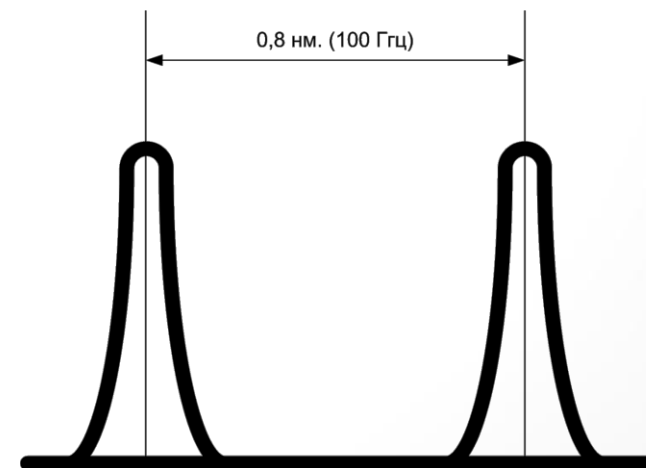
Преимущества DWDM

DWDM Dense Wave Division Multiplexing -

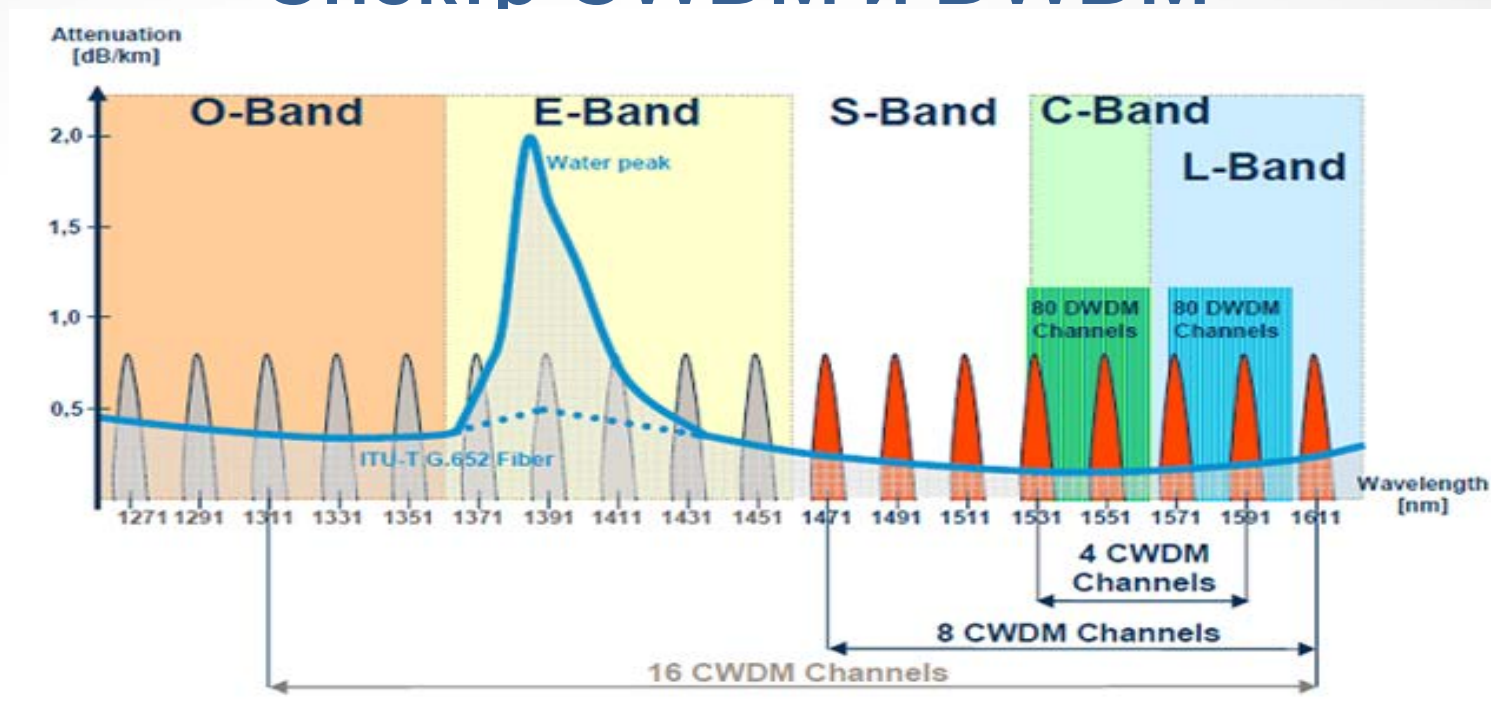
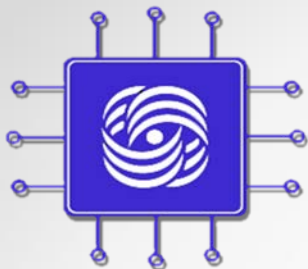
метод спектрального уплотнения, обеспечивает передачу по волокну оптических сигналов на разных длинах волн.

Преимущества :

- Передача различных протоколов: STM- 1..64, Ethernet, ATM, FDDI ...
- Высокая скорость, до 160 каналов по 40 Гб/с
- Длина регенерационного участка до 5000км
- Экономическая эффективность, одновременное усиление всех каналов одним оптическим усилителем
- Быстрый апгрейд, ввод новых каналов без остановки старых
- Объединение сетей различных производителей
- Не требует единой синхронизации

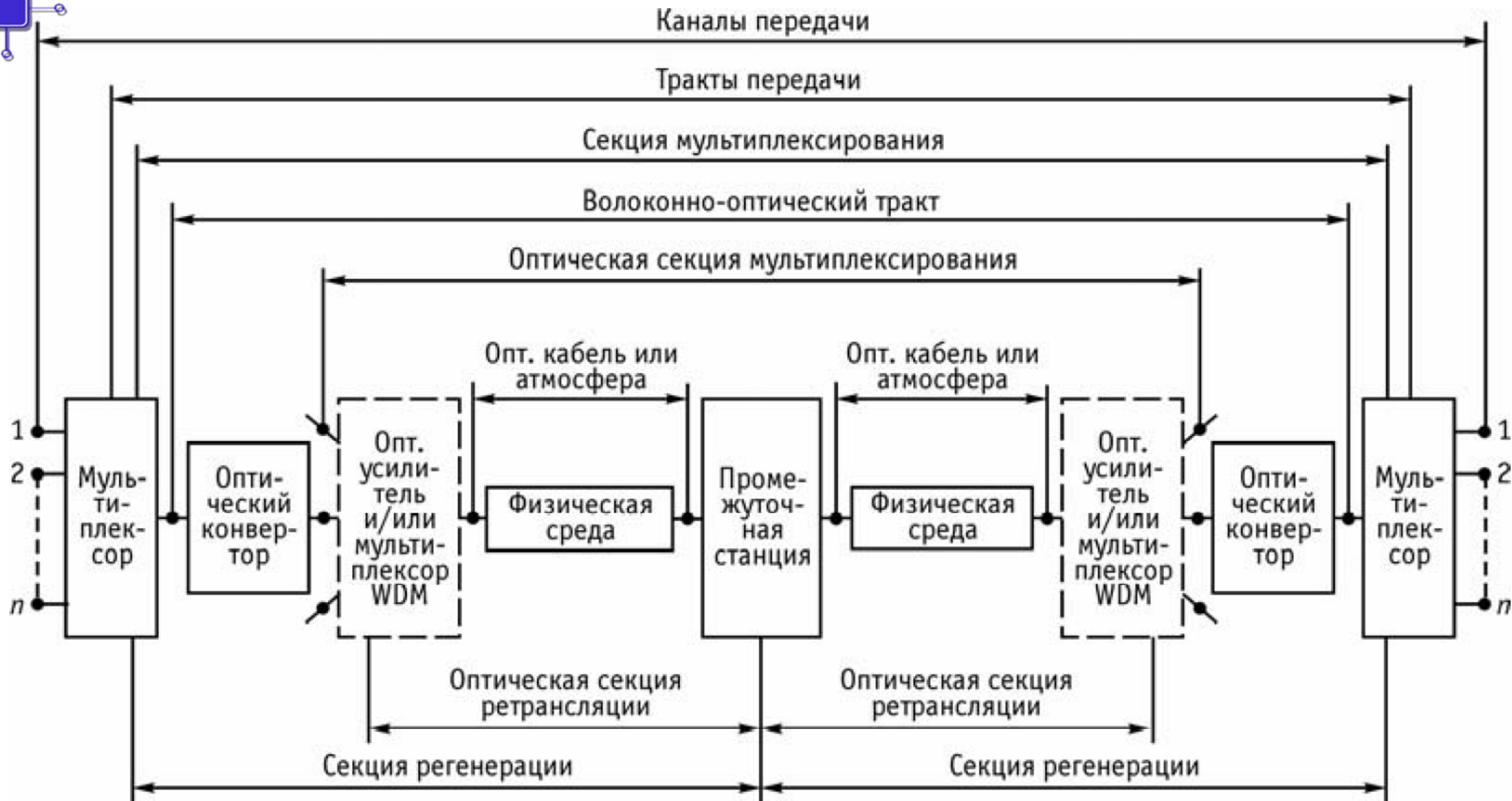
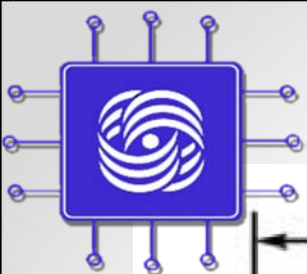


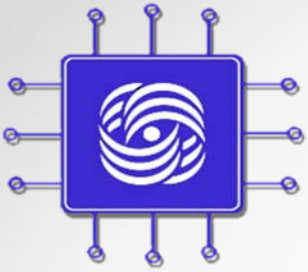
Спектр CWDM и DWDM



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	2020

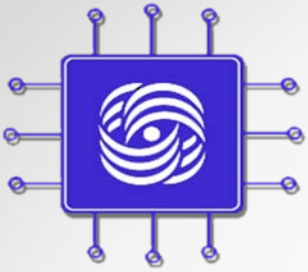
Общая схема оптической СПД





Стандарт SONET/SDH

Synchronize Optical NETwork



SONET – Synchronous Optical NETwork

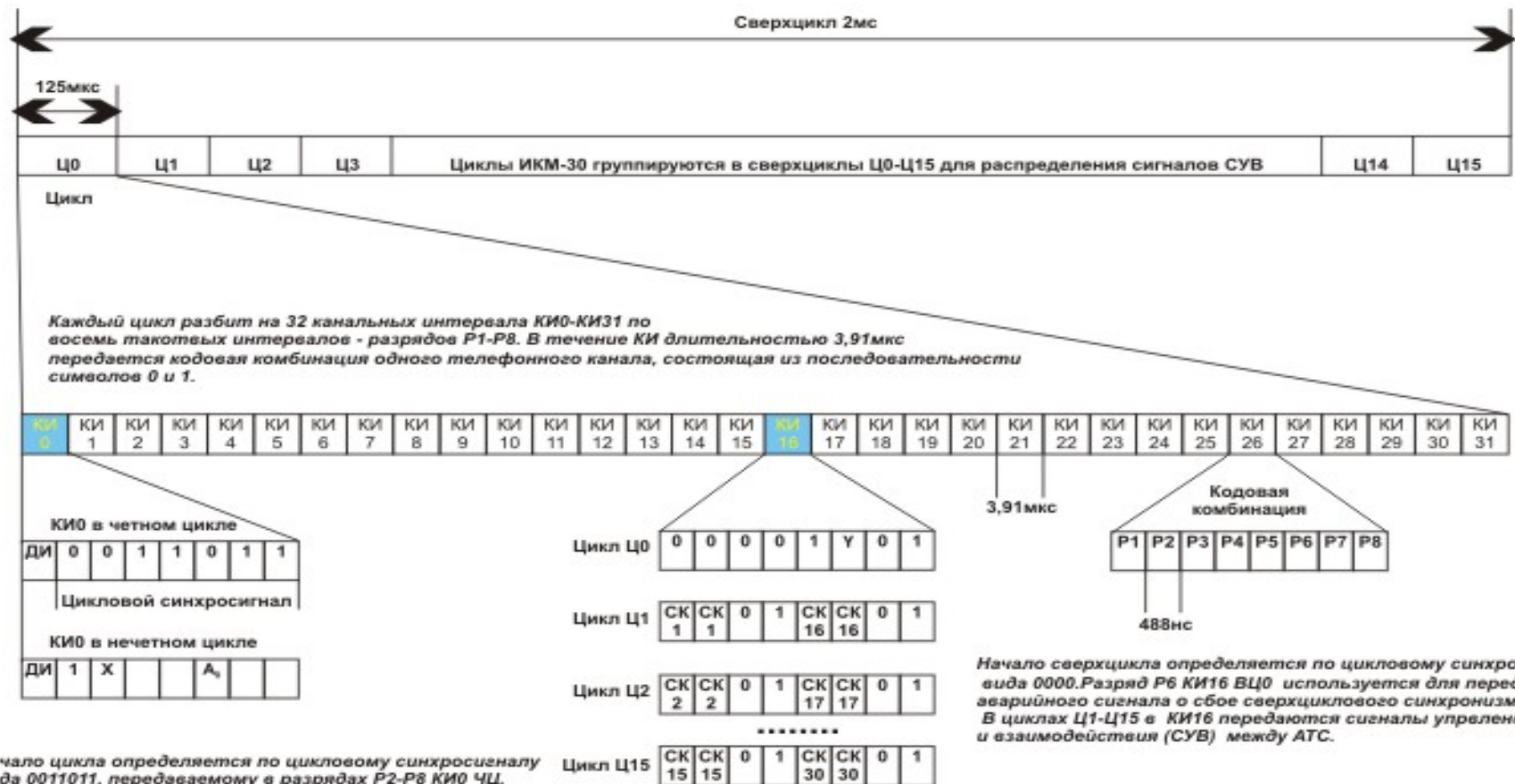
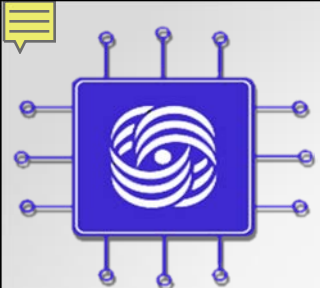
Стандарт должен был обеспечить:

- Возможность 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 T1 – T4 (E1 – E4).
- унифицировать Американские, Европейские и Японские цифровые системы.
- определить правила функционирования, администрирования и поддержки.

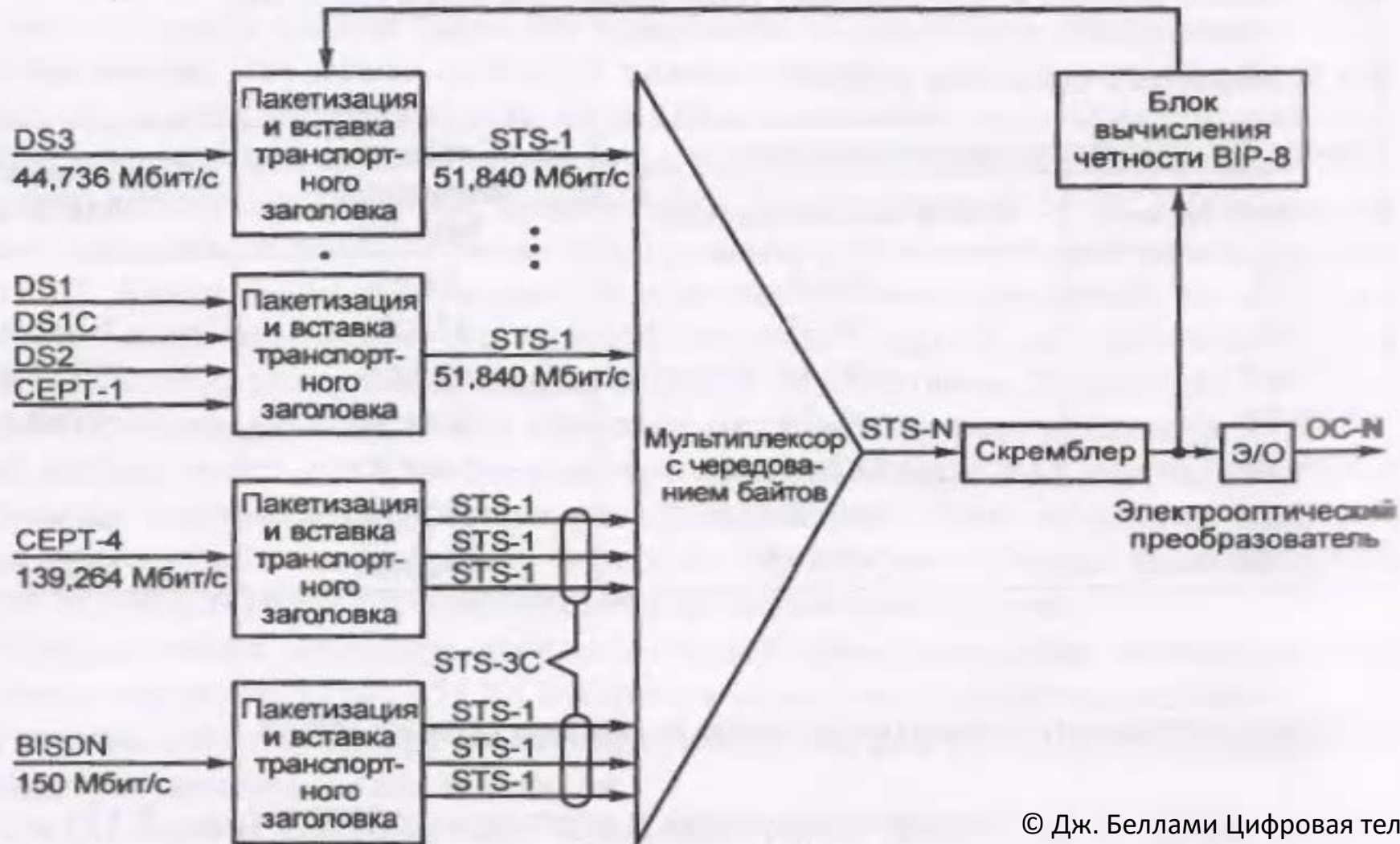
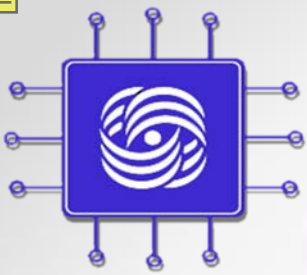


Плезиохронное мультиплексирование

Америка				ITU-T (Европа)		
Обозначение скорости	Количество голосовых каналов	Количество каналов предыдущего уровня	Скорость Мбит/с	Количество голосовых каналов	Количество каналов предыдущего уровня	Скорость Мбит/с
DS-0	1	1	64 Кбит/с	1	1	64 Кбит/с
DS-1	24	24	1,544	30	30	2,048
DS-2	96	4	1,544	120	4	2,048
DS-3	672	7	1,544	480	4	2,048
DS-4	4032	6	1,544	1920	4	2,048

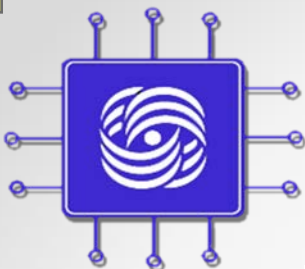


Функциональная схема мультиплексирования в SONET



© Дж. Беллами Цифровая телефония

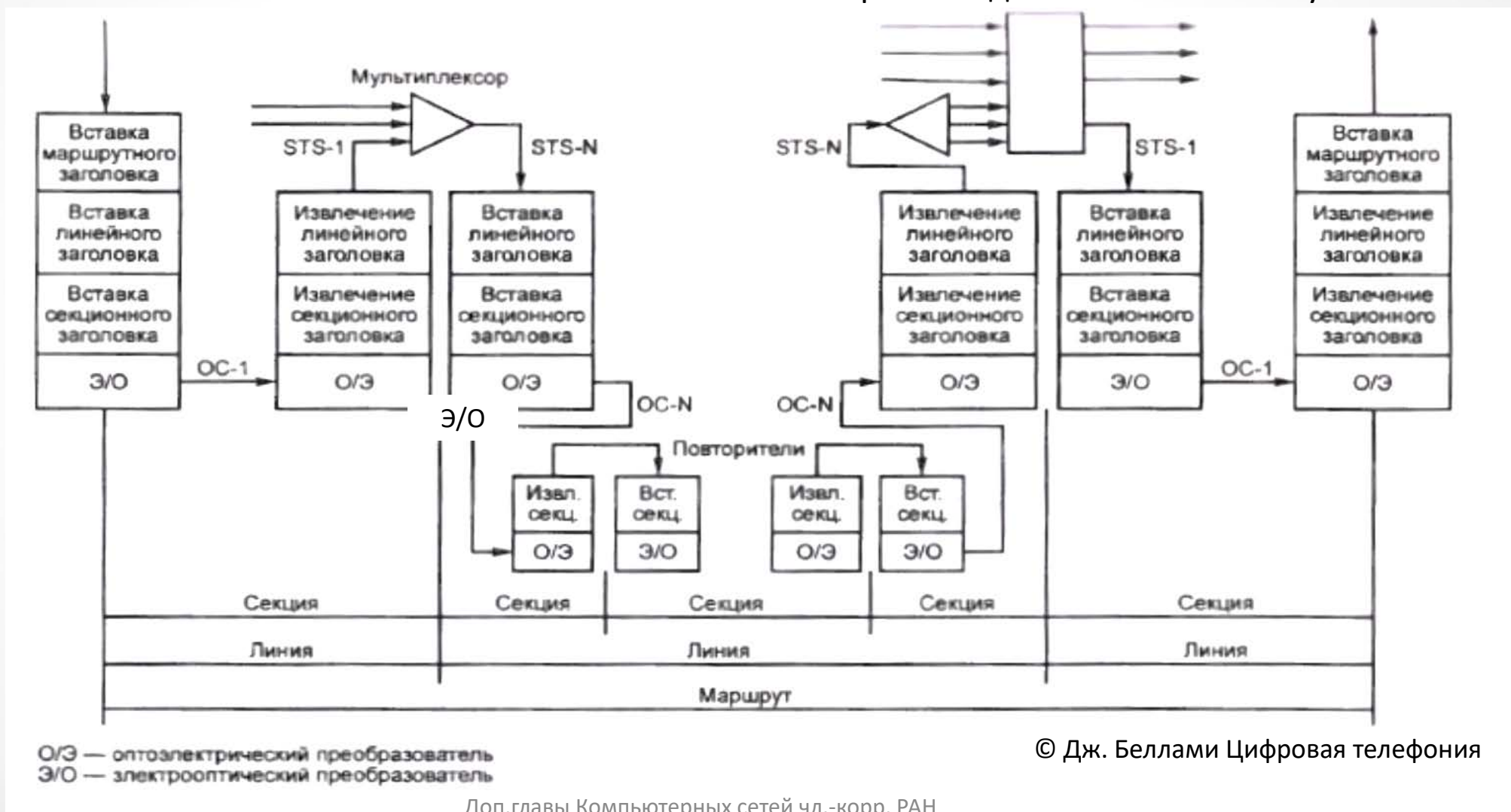
Архитектура цифрового тракта в SONET



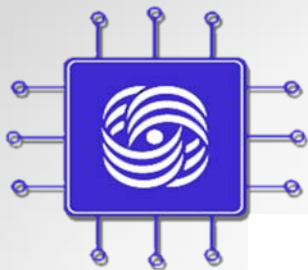
Источник

Кросс соединение

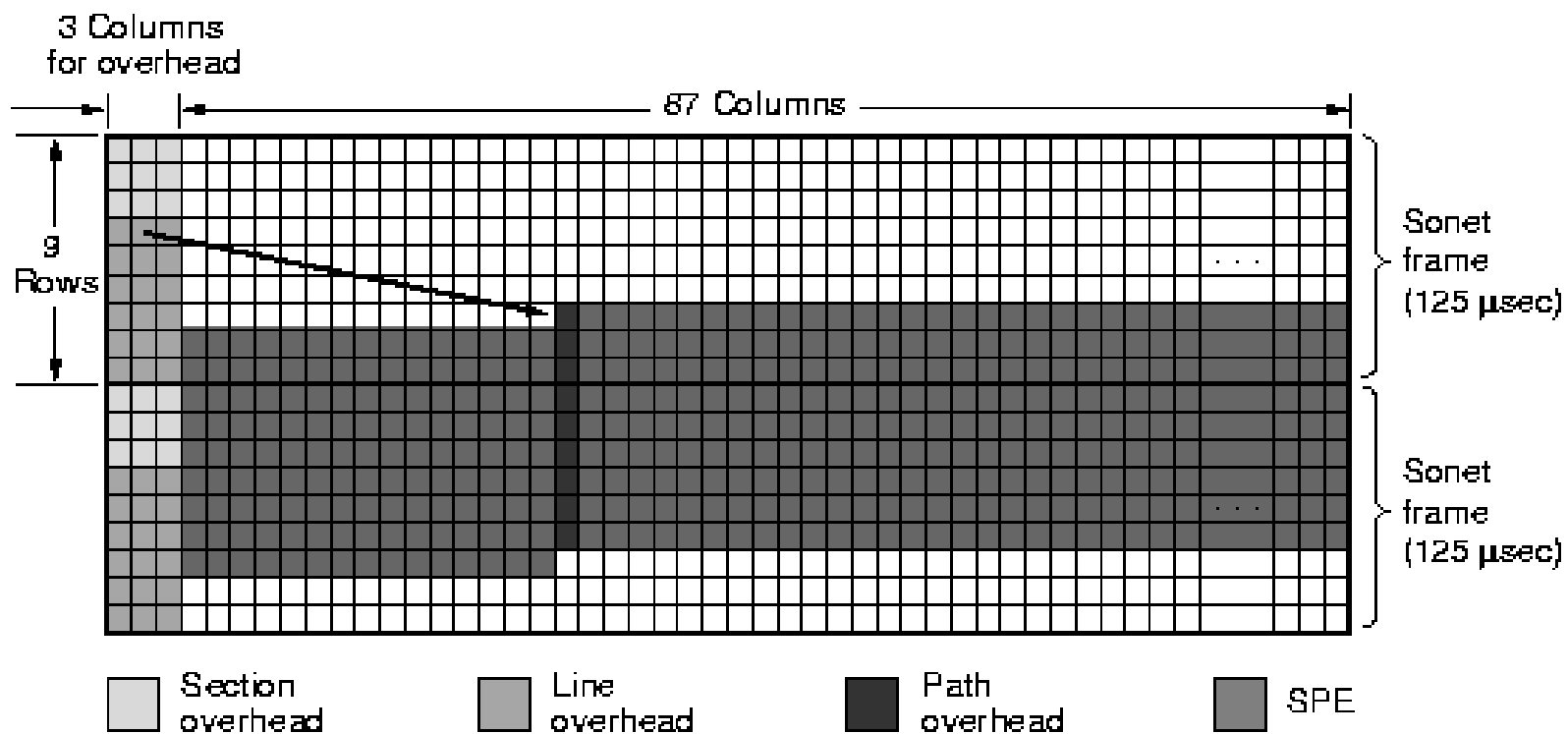
К месту назначения



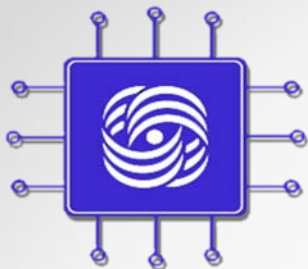
© Дж. Беллами Цифровая телефония



Два смежных SONET кадра



© A. Tenenbaum Computer Networks 1996

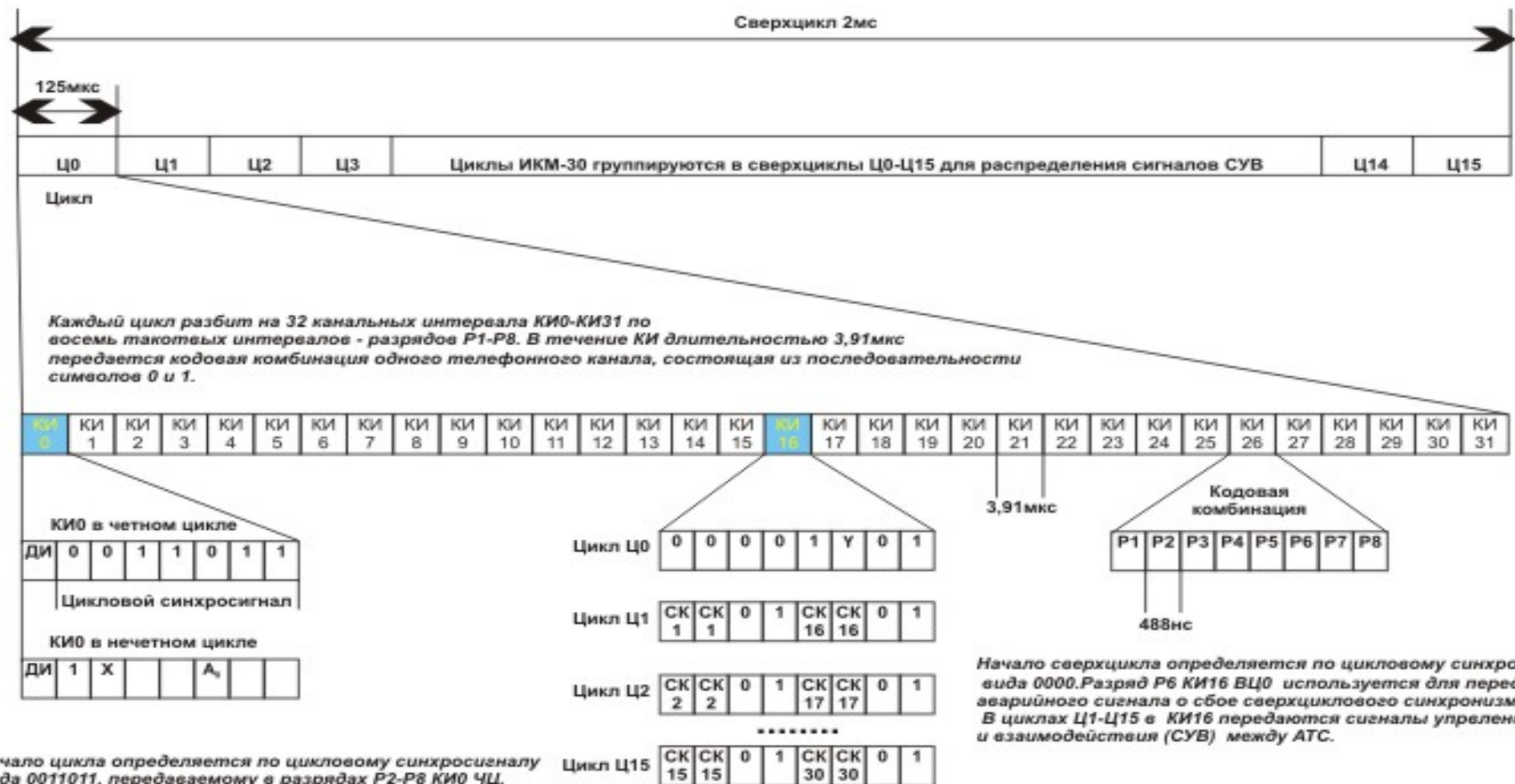
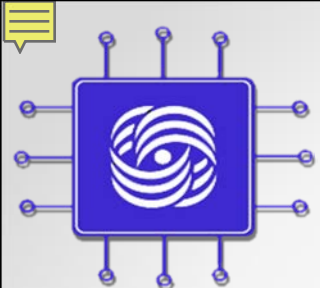


Заголовок STS-1 кадра

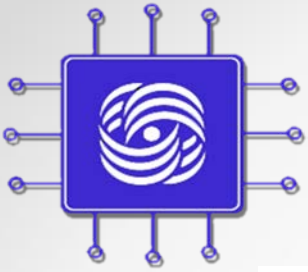
		Транспортный заголовок			Информационная полезная нагрузка STS-1	
Секционный заголовок		A1	A2	C1	J1	Маршрутный заголовок 9 строк
		B1	E1	F1	B3	
		D1	D2	D3	C2	
Линейный заголовок		H1	H2	H3	G1	
		B2	K1	K2	F2	
		D4	D5	D6	H4	
		D7	D8	D9	Z3	
		D10	D11	D12	Z4	
		Z1	Z2	E2	Z5	

3 столбца

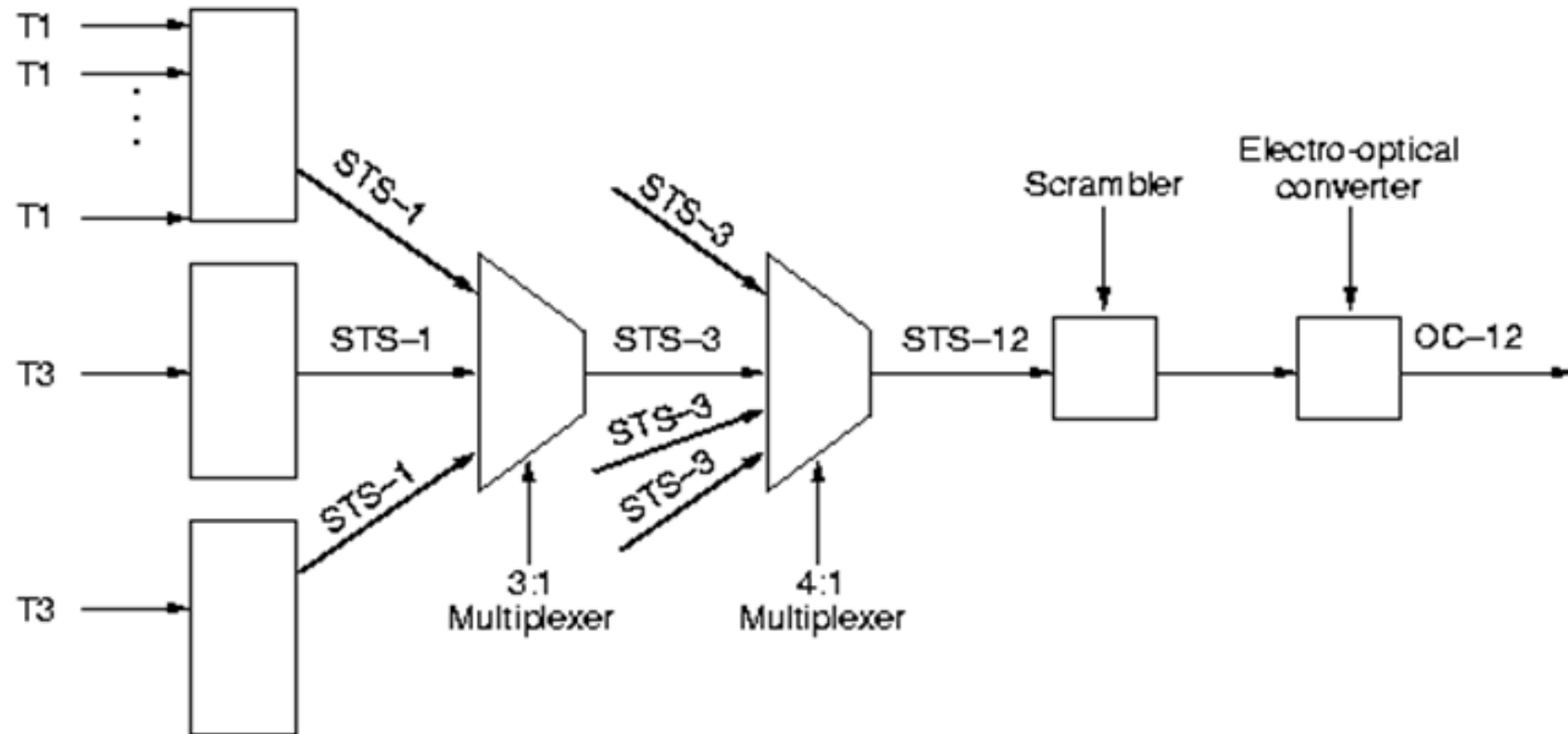
87 столбцов



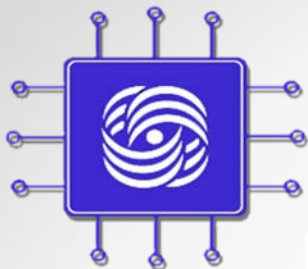
Начало сверхцикла определяется по цикловому синхросигналу вида 0011011, передаваемому в разрядах Р2-Р8 КИ0 ЦЦ. Первый разряд КИ0 отводится для передачи дискретной информации, разряд КИ3 НЦ - для передачи сигналов аварии о потере цикловой синхронизации "X". Прием значения 0 соответствует нормальному состоянию, а 1 - аварийному. В тактовом интервале Р2 постоянно передается 1 (в отличие от Р2 в цикловом синхросигнале), что необходимо для проверки в процессе поиска ЦСС. Остальные разряды могут быть использованы для служебной информации. Так, в первых модификациях АЦО шестой разряд используется для передачи сигнала контроля остаточного затухания А_c.



Мультиплексирование SONET кадров



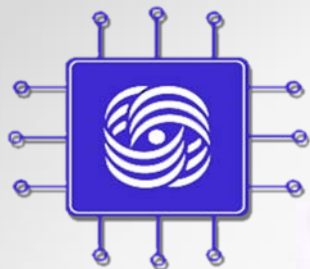
© A.Tenenbaum Computer Networks 1996



Соотношение скоростей при мультиплексировании в SONET и SDH

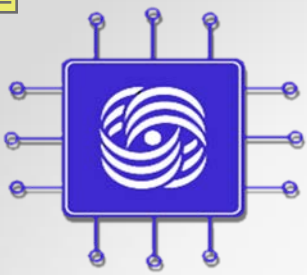
SONET		SDH	Data rate (Mbps)		
Electrical	Optical	Optical	Gross	SPE	User
STS-1	OC-1		51.84	50.112	49.536
STS-3	OC-3	STM-1	155.52	150.336	148.608
STS-9	OC-9	STM-3	466.56	451.008	445.824
STS-12	OC-12	STM-4	622.08	601.344	594.432
STS-18	OC-18	STM-6	933.12	902.016	891.648
STS-24	OC-24	STM-8	1244.16	1202.688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

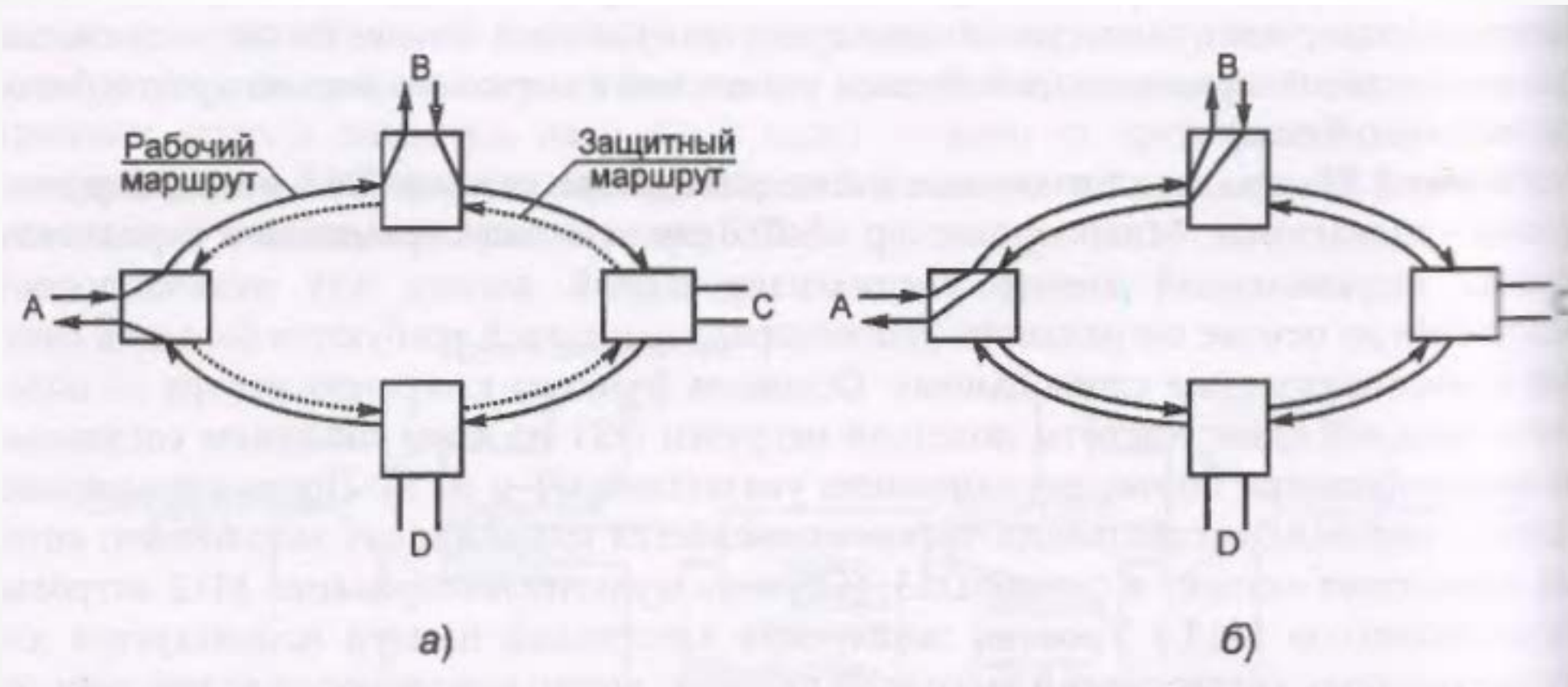


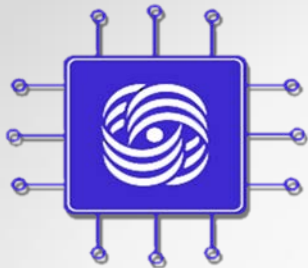
Формат кадра STS-3

Транспортный заголовок									Информационная полезная нагрузка STS-3						
A1	A1	A1	A2	A2	A2	C1	C1	C1	J1			J1			
B1	•	•	E1	•	•	F1	•	•	B3			B3			
D1	•	•	D2	•	•	D3	•	•	C2			C2			
H1	H1	H1	H2	H2	H2	H3	H3	H3	G1			G1			
B2	B2	B2	K1	•	•	K2	•	•	F2			F2			
D4	•	•	D5	•	•	D6	•	•	H4			H4			
D7	•	•	D8	•	•	D9	•	•	Z3			Z3			
D10	•	•	D11	•	•	D12	•	•	Z4			Z4			
Z1	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	E2	•	•	Z5			Z5			
(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	...	(1)	...	(2)
9 столбцов									261 столбцов						



Кольцо SONET

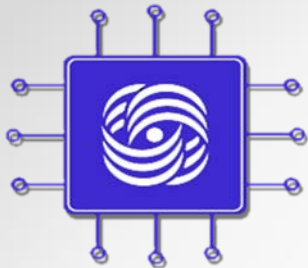




OTN ITU G.709 назначение

“...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

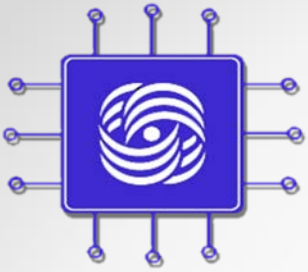


OTN – достоинства

Спецификация G.709 (2003).

1. OTN определяет OPU фрейм (упаковку, wrapper) для инкапсуляции кадров пакетизированных данных, не зависимо от конкретного протокола, породившего кадр.
2. OPU позволяет размещать в нем несколько кадров от разных протоколов и предназначен для 2.5, 10, 40 and 100Gbps Ethernet, SDH/SONET фреймов.
3. Спецификация G.709 включает соглашения о цифровом контейнере (ODU), мониторинг производительности, коррекцию ошибок, механизм мультиплексирования, механизмы восстановления функционирования сети.
4. Механизм коррекции ошибок (FEC – Forward Error Correction) основан на коде Рида-Соломона.
5. Для передачи ODU фрейма спецификация определяет оптический контейнер OTU – optical transport unit.
6. Определяет механизм сквозного мониторинга услуг сети.

Базовые механизмы OTN



- Усиленный механизм обнаружения ошибок
- Многоуровневый сквозной мониторинг соединений
- Прозрачная передача сигналов пользователя
- Масштабируемая коммутация

Однако требует нового оборудования и смену системы управления

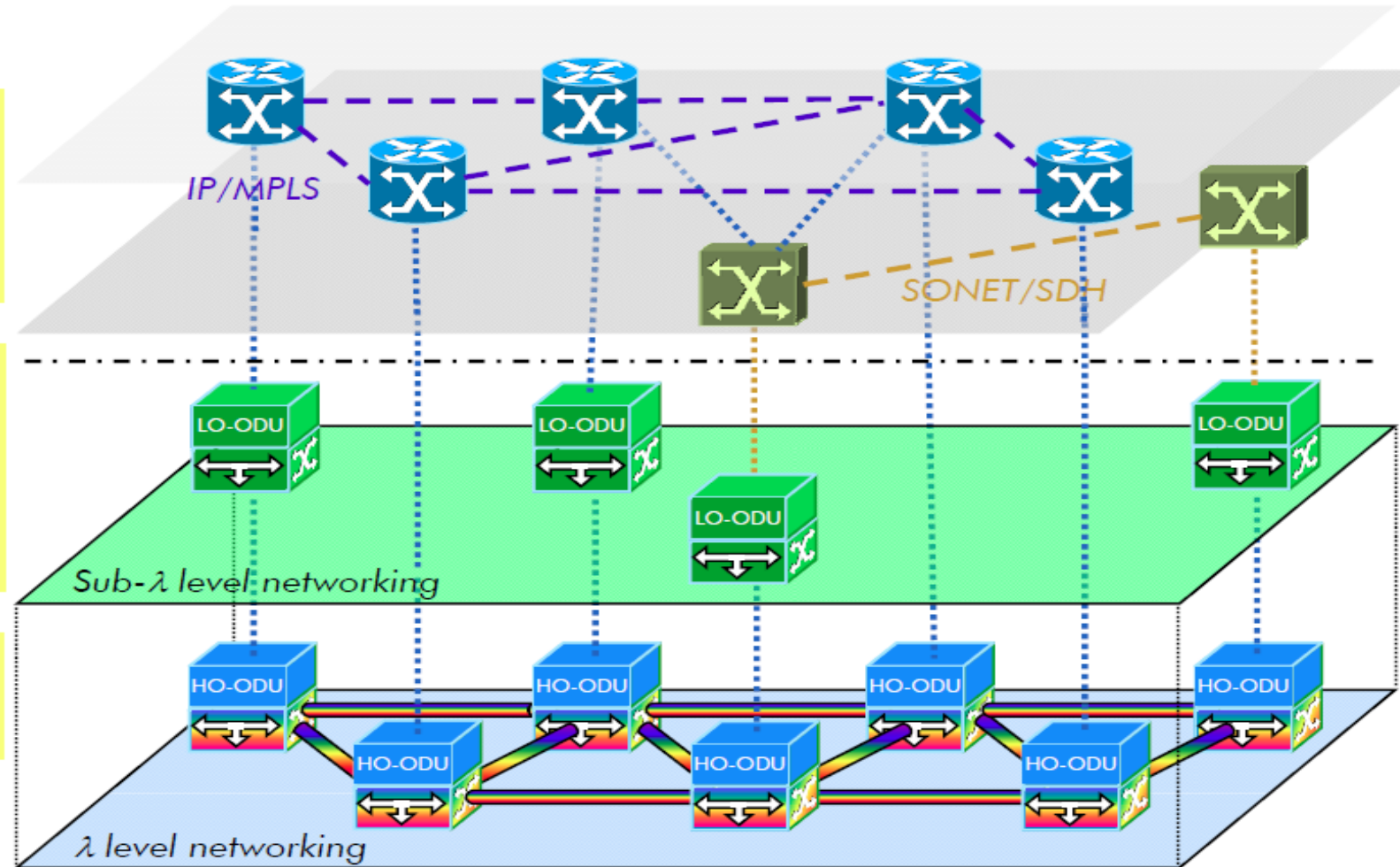
OTN Network Vision

OTN can be implemented as an overlay to an existing network or as a replacement

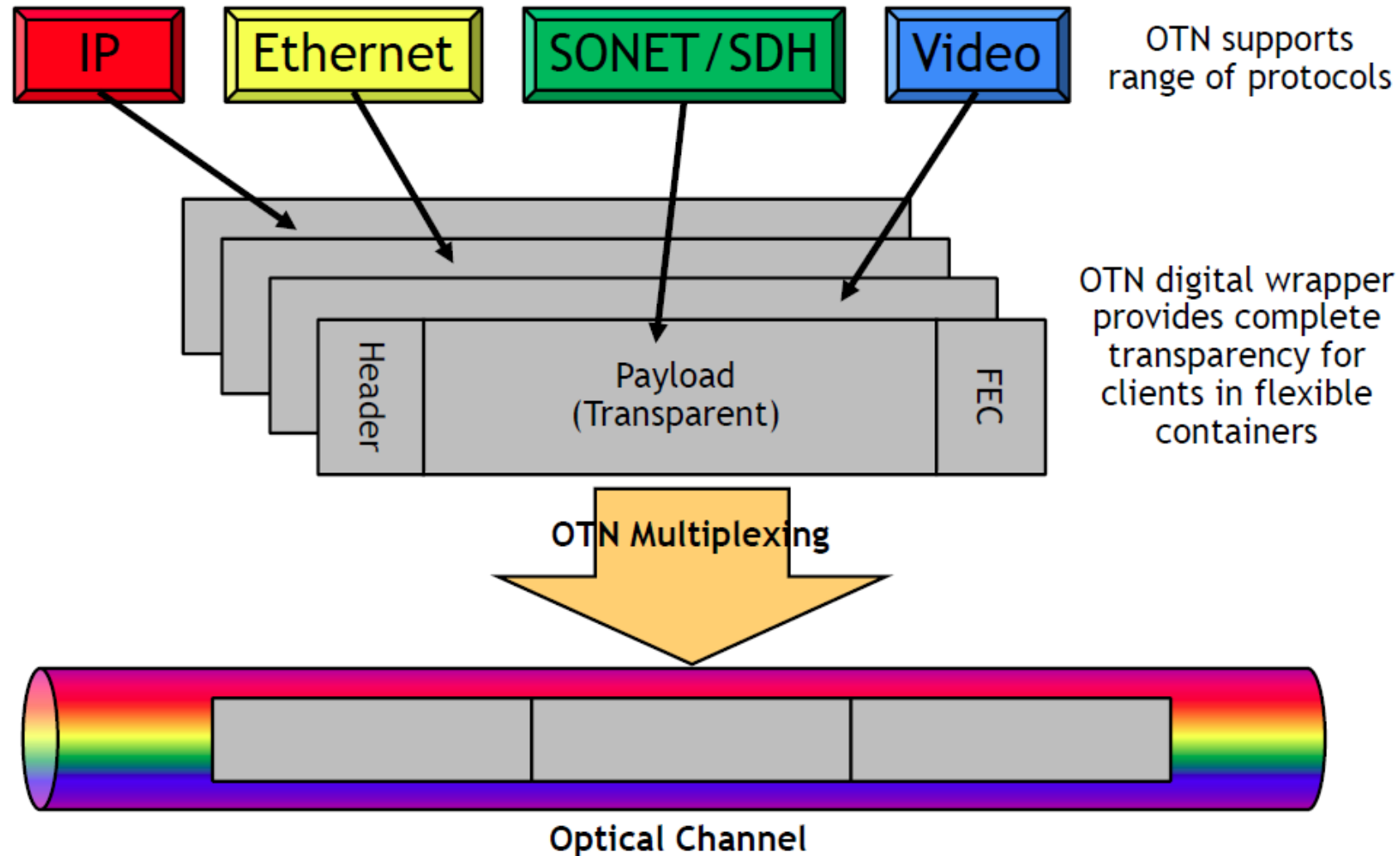
- **HO-ODU** networking is used when the client throughput does not need further aggregation within a lambda
- **LO-ODU** networking is used when sub- λ multiplexing is needed (no stranded sub- λ)

- **ODU Termination** (G.709 OAM) guarantees a clear boundary between client and server organizations
- **Intermediate Monitoring** can be either optical (proprietary WaveTracker) or electronic (standard G709 TC)

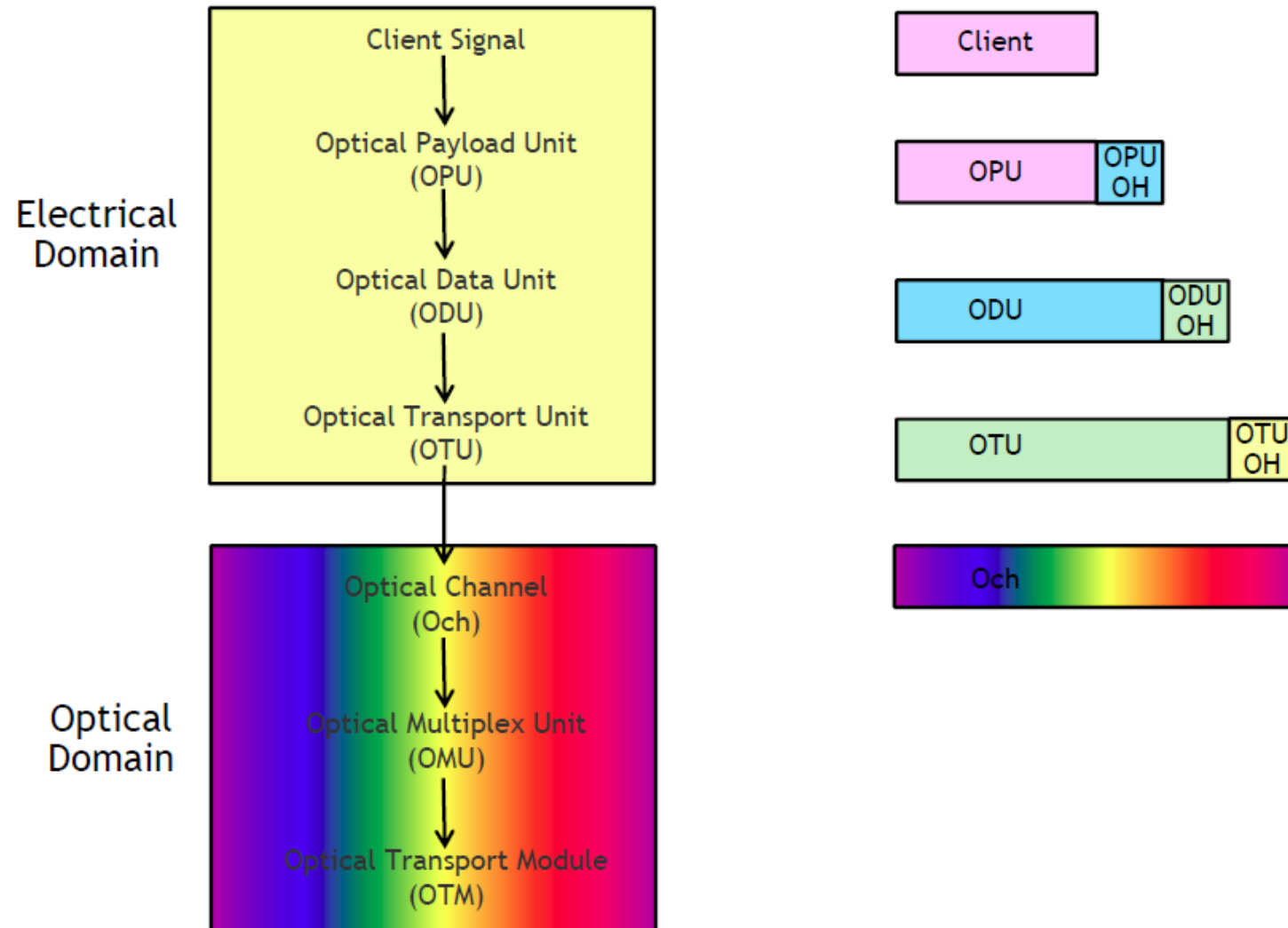
- **Switching** can be accomplished by means of fast electronic technology and/or slower photonic technology

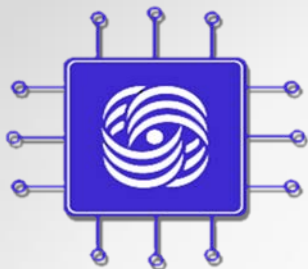


OTN Supports Variety of Protocols

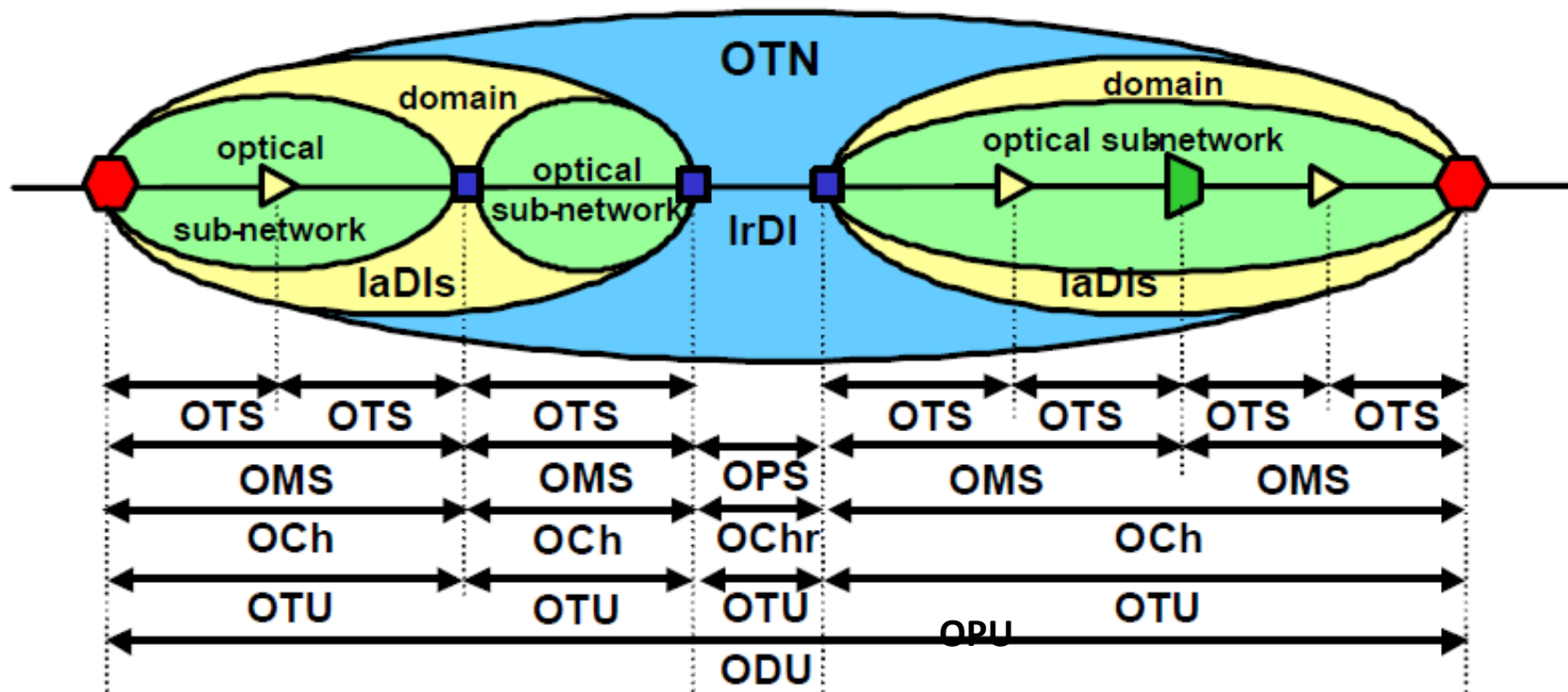


Building an OTN Container



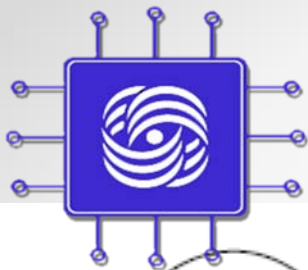


Иерархия интерфейсов OTN

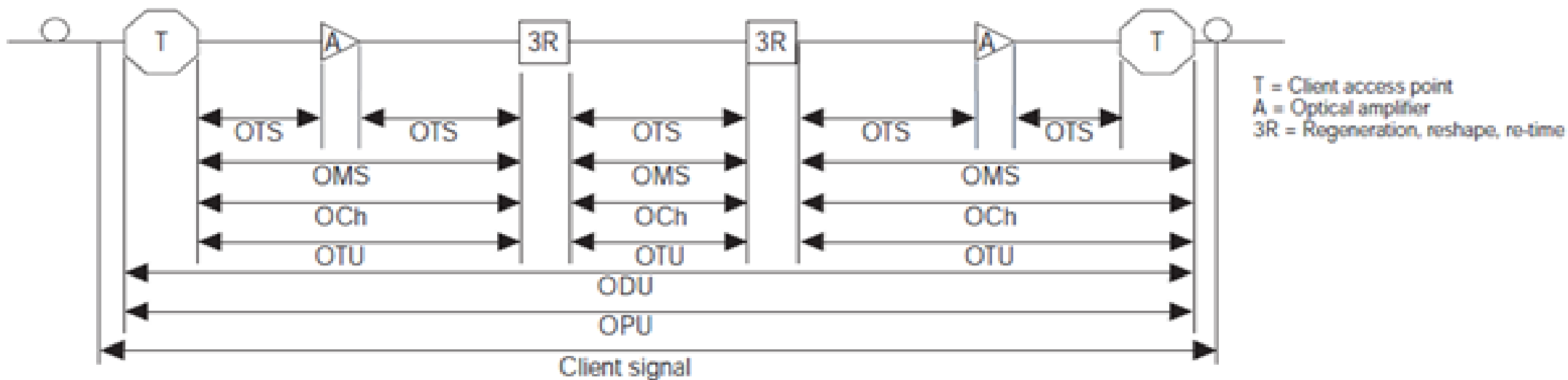
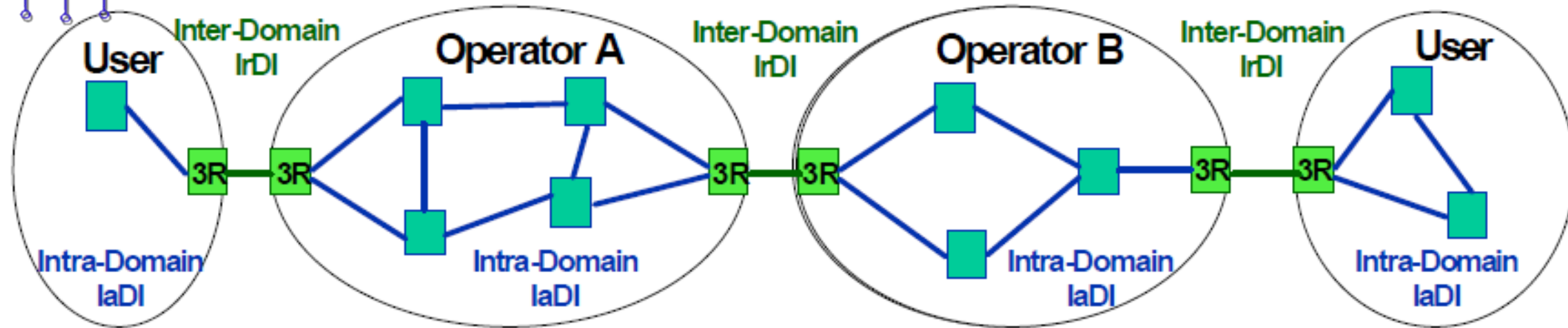


- ▶ Optical line amplifier (OTS termination)
- ▶ Optical cross connect/addrop/terminal mux (OMS termination)

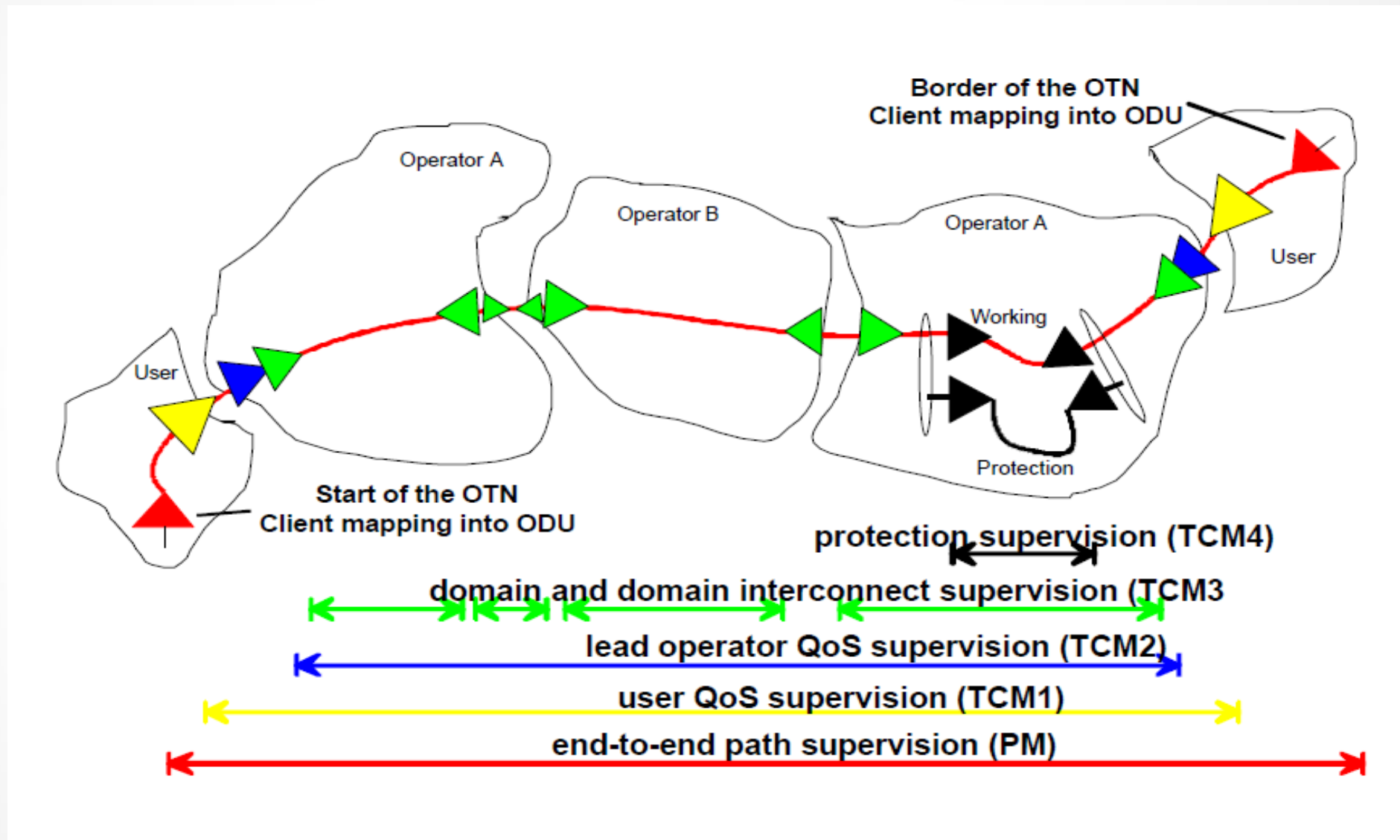
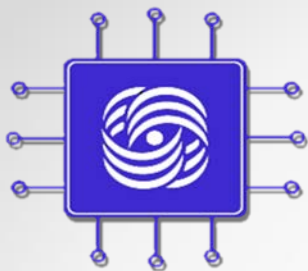
- 3-R regeneration (OCh, OTU termination)
- ◆ Client access (ODU termination)

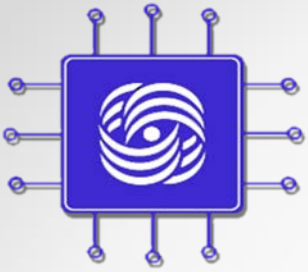


Иерархия интерфейсов OTN сети



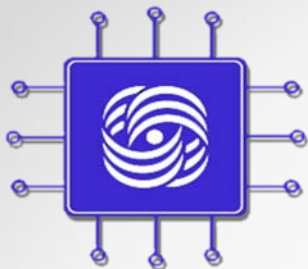
Мониторинг в OTN





Forward Error Correction (FEC)

- Позволяет увеличить длину линии или число линий для передачи без усилений
- Снижает пороговое значение для соотношения S/N, что увеличивает число каналов в DWDM системе



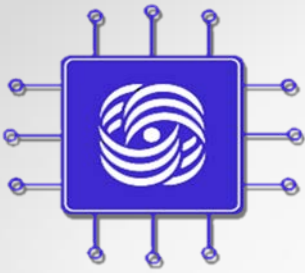
Коды Рида-Соломона

(частный случай Код Боуза — Чоудхури — Хоквингема)

- Поля Галуа (GF(N)): «+», «х»,
 - $a+b = b+a$ и $a*b = b*a$.
 - существуют элементы e и u из GF(N), что для всех a из GF(N) верно $a = a+e$, и $a = a*u$.
 - Определим «+» как XOR, «*» – умножение в столбик
- Рассмотрим GF(2^4) «+» = XOR, «*» – с остатком по модулю 10011
- $13 * 15 = 2^{13} * 2^{12} = 2^{(12+13)} = 2^{(25 \bmod 15)} = 2^{10} = 7$
- Операция умножения обратима - $a^{13} * a^{12} = a^{10}$, то $a^{10} / a^{12} = a^{-2+15} = a^{13}$
- **Построенное поле Галуа задаёт правила арифметики для чисел от 0 до 15 (т.е. для двоичных 4-разрядных чисел) !**
- Аналогично можно построить арифметику для 256-битовых чисел (100011101)
- Код Рида-Соломона задаётся парой чисел N, K, где N – общее количество символов, а K – «полезное» количество символов, N-K символов - избыточный код для обнаружения и исправления с «расстоянием Хэмминга» $D = N - K + 1$

Степень	Результат	
0	1	0001
1	2	0010
2	4	0100
3	8	1000
4	3	0011
5	6	0110
6	12	1100
7	11	1011
8	5	0101
9	10	1010
10	7	0111
11	14	1110
12	15	1111
13	13	1101
14	9	1001
15	1	0001

Forward Error Correction (FEC)



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

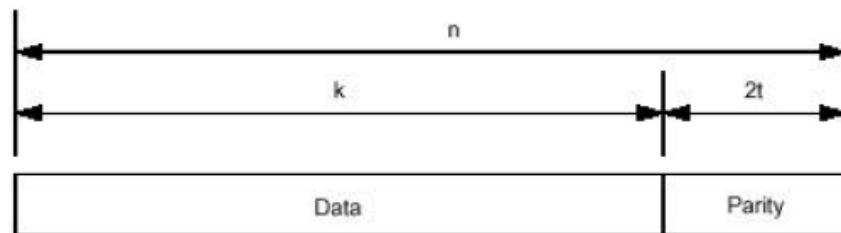
$s =$ Size of the symbol = 8 bits

$n =$ Symbols per codeword = 255 bytes

$k =$ Information symbols per codeword = 239 bytes

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

$t = 8$



RS(255,239) max length $n = 2^s - 1 = 255$

$+$ = XOR

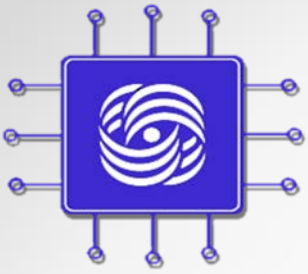
$$g(x) = \prod_{(i=1..D-1)} (x+a_i) = (x+a_1)(x+a_2)...(x+a_{D-1})$$

сообщение «сдвигается» на $N-K$ символов

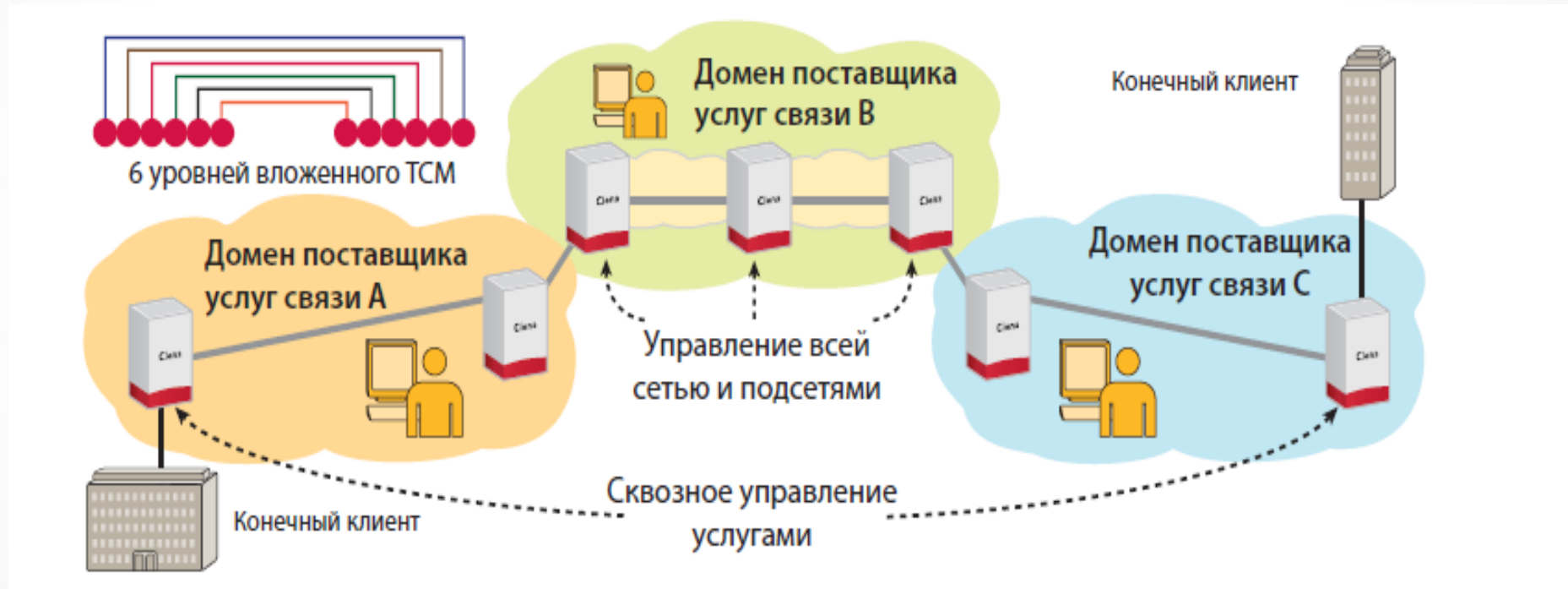
$$C(x) = p'(x) + p'(x) \bmod g(x) \quad \text{порождающий многочлен}$$

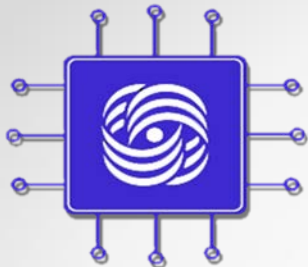
$$C'(x) = C(x) + E(x), \text{ тогда}$$

$$C'(x) \bmod g(x) = E(x) \bmod g(x) = e(x) \neq 0.$$

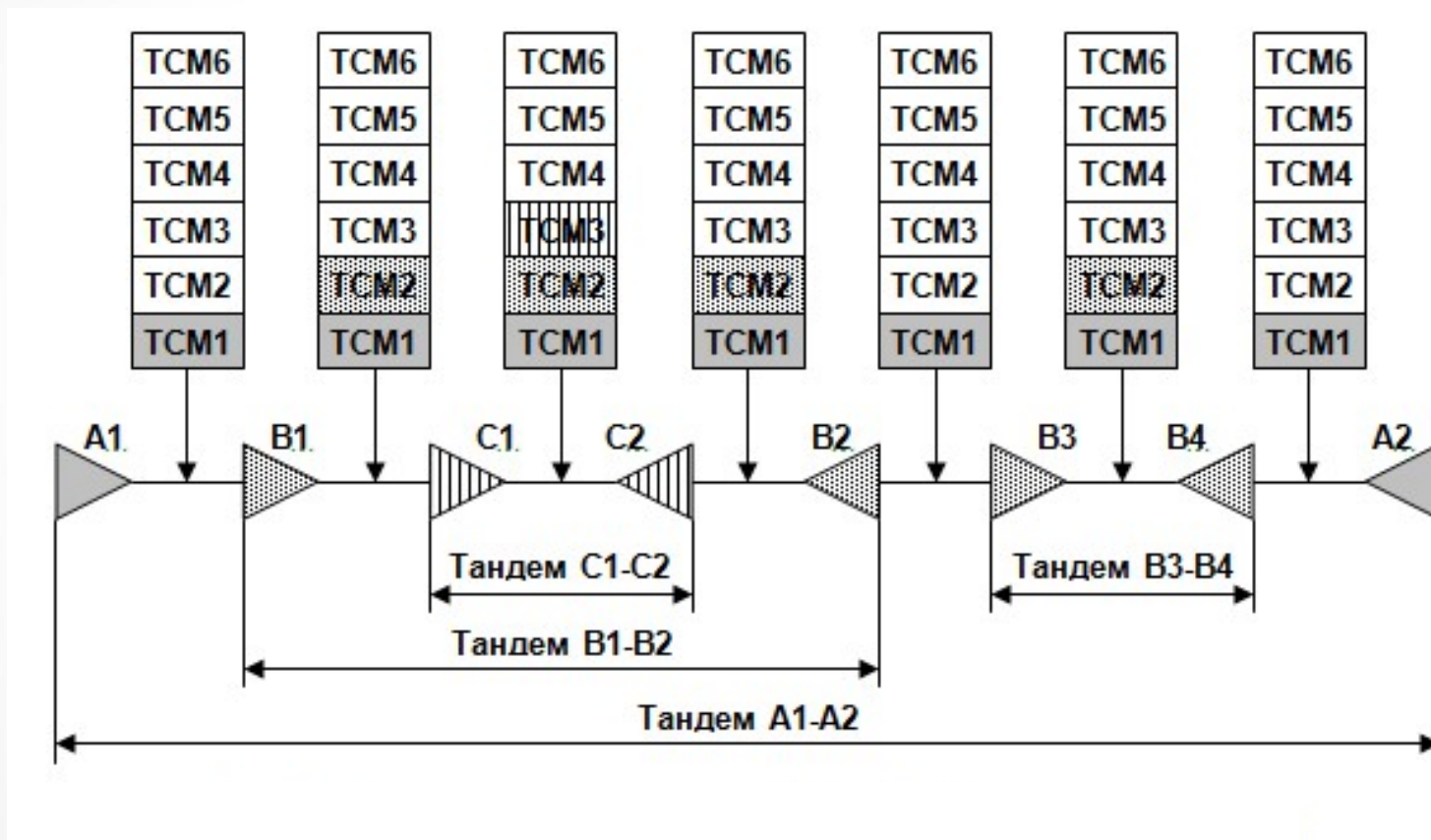


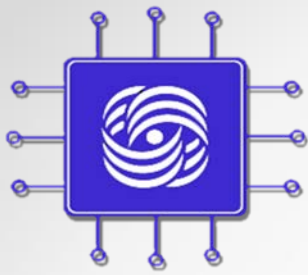
Сквозной мониторинг на всех уровнях (ТСМ)



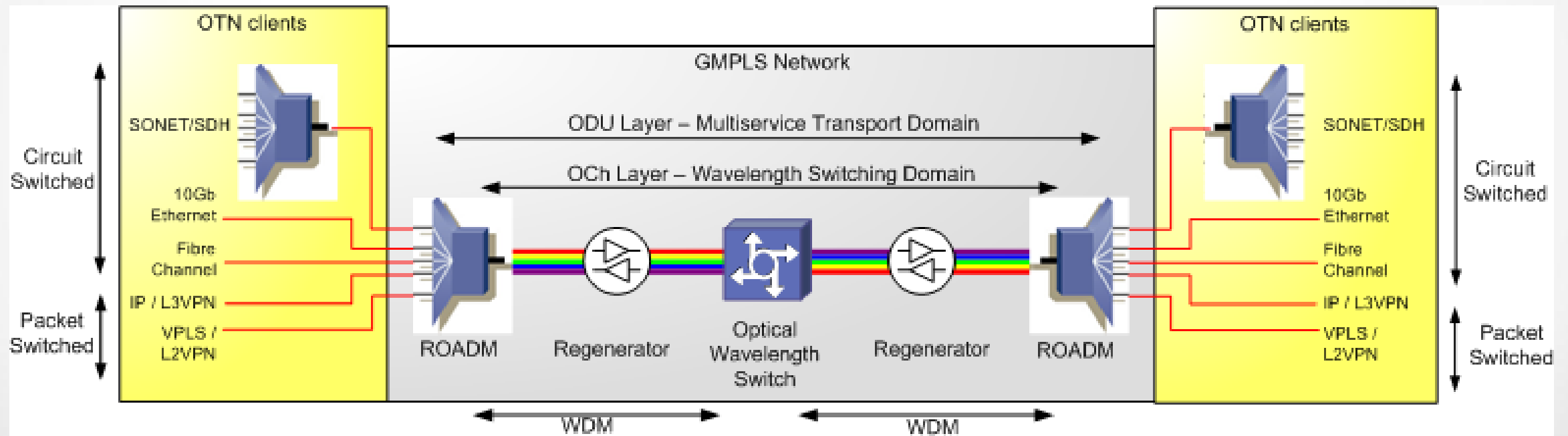


Распределение уровней TCM

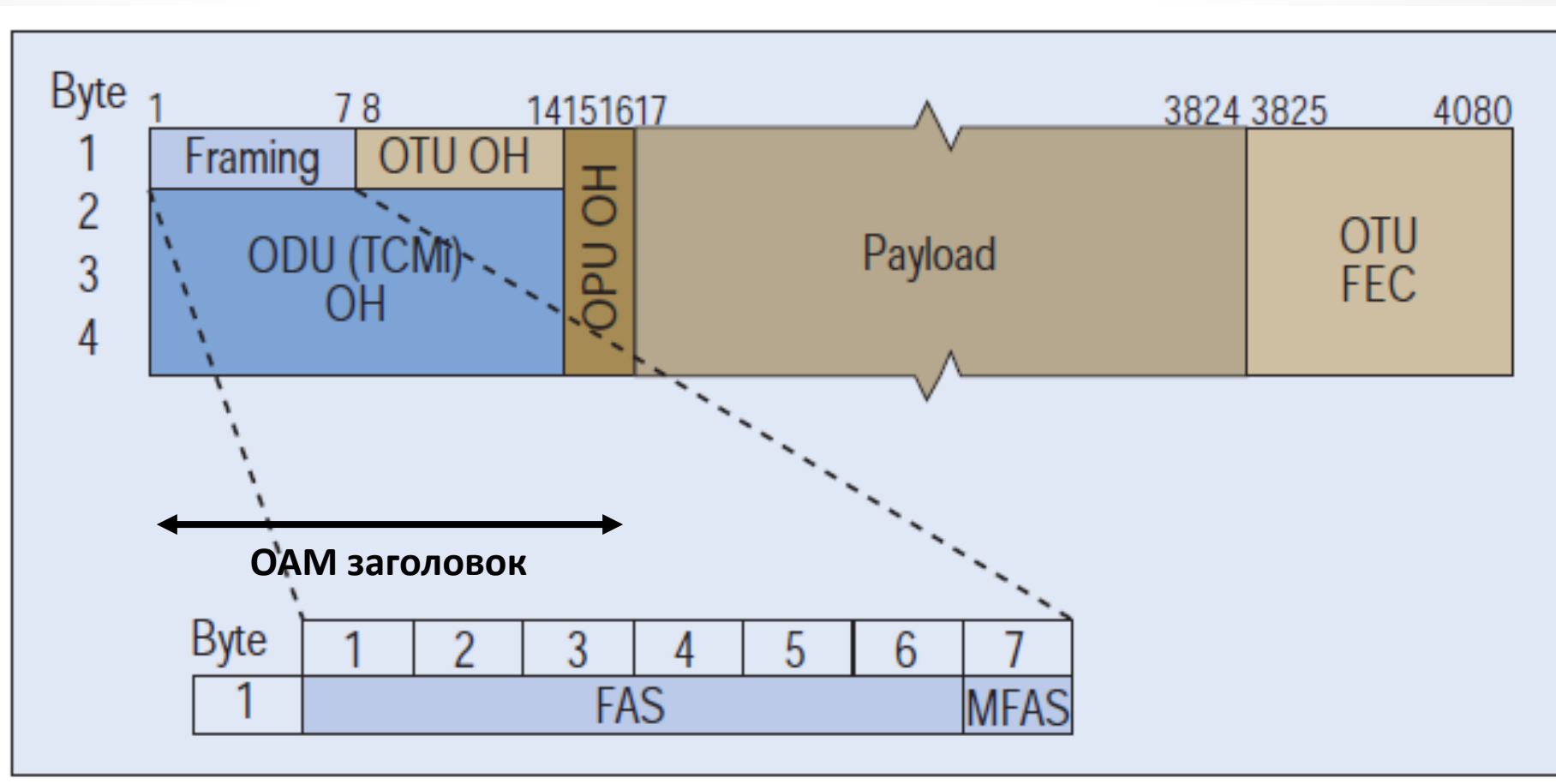
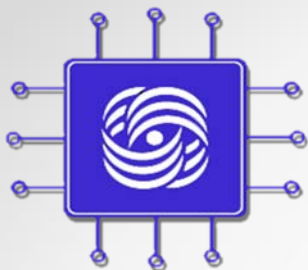




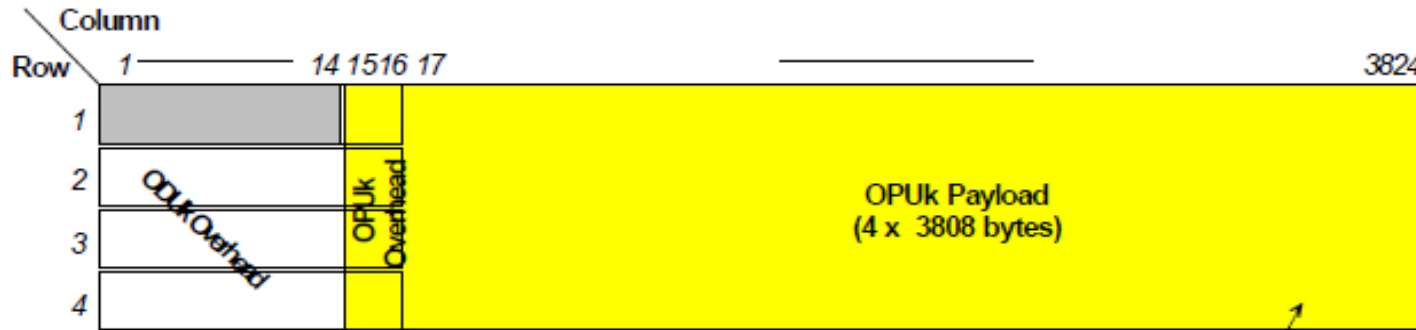
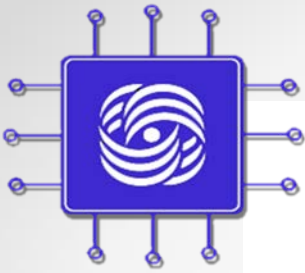
Масштабируемая коммутация



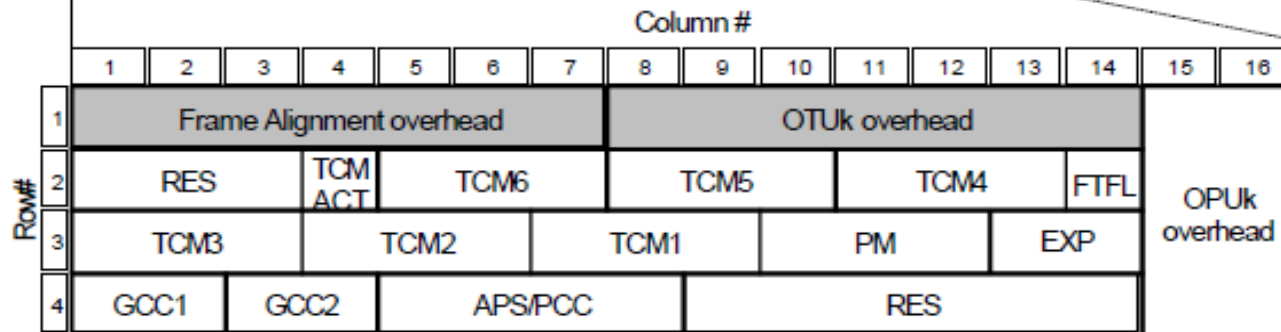
Структура OTU кадра



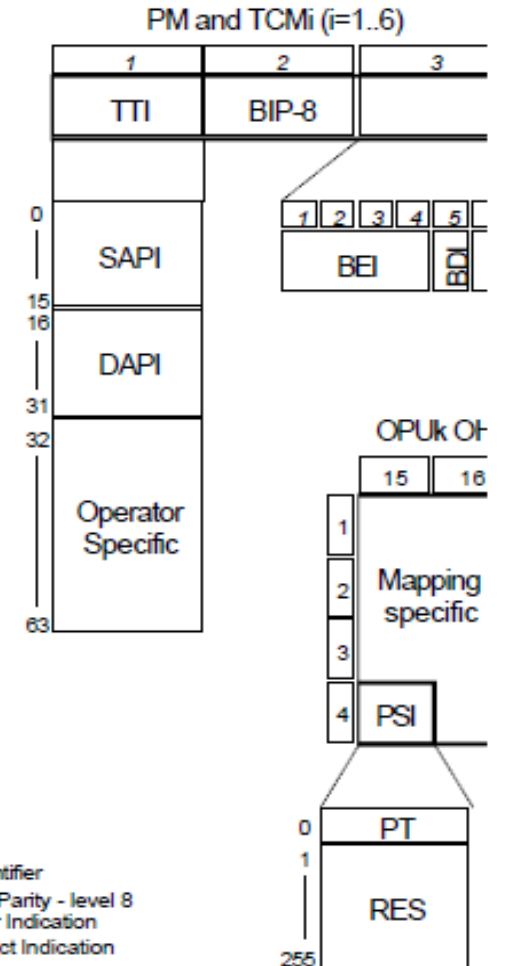
Структура ODU кадра



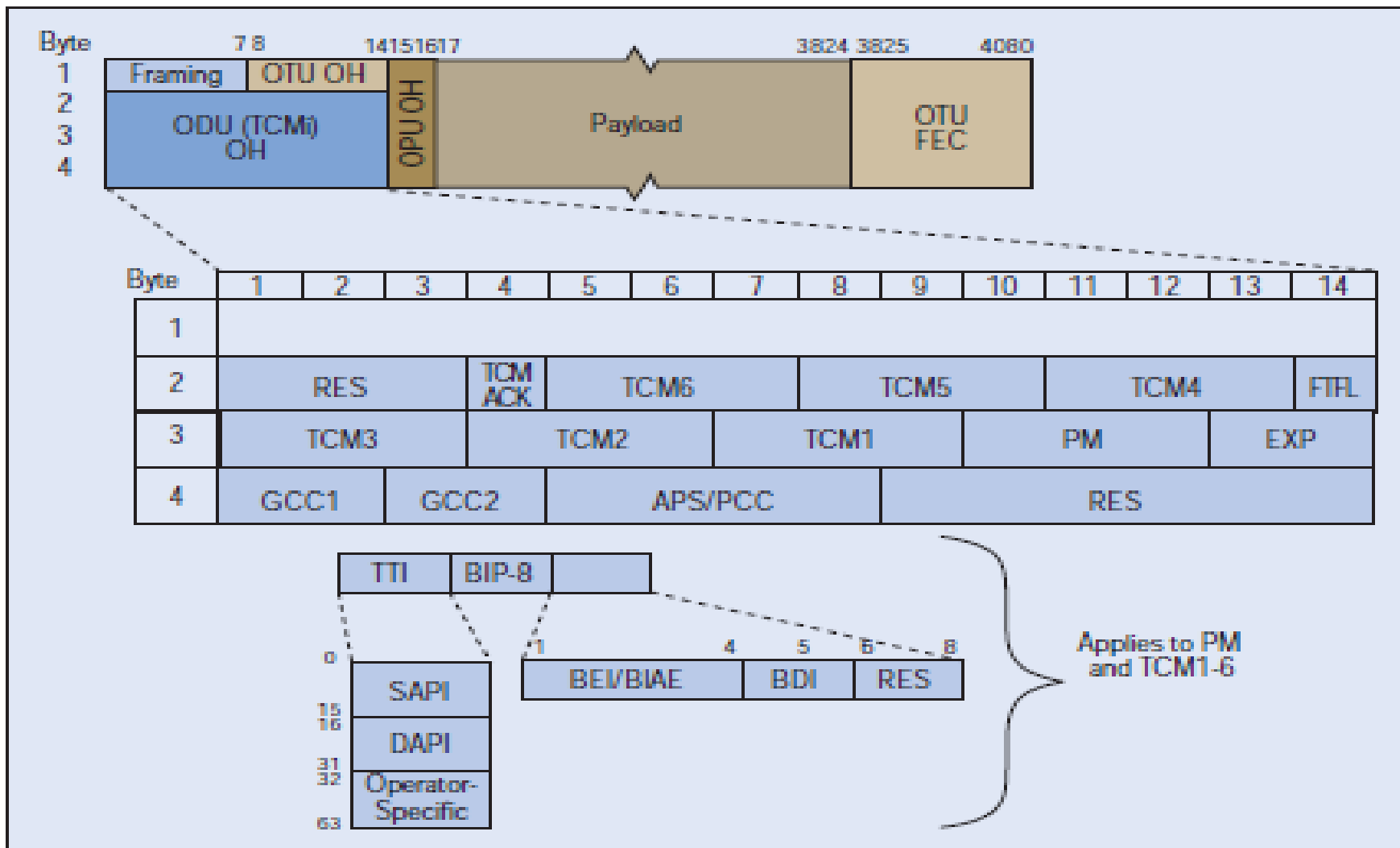
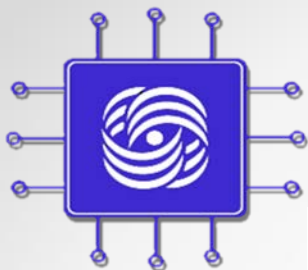
BIP8 Parity Block



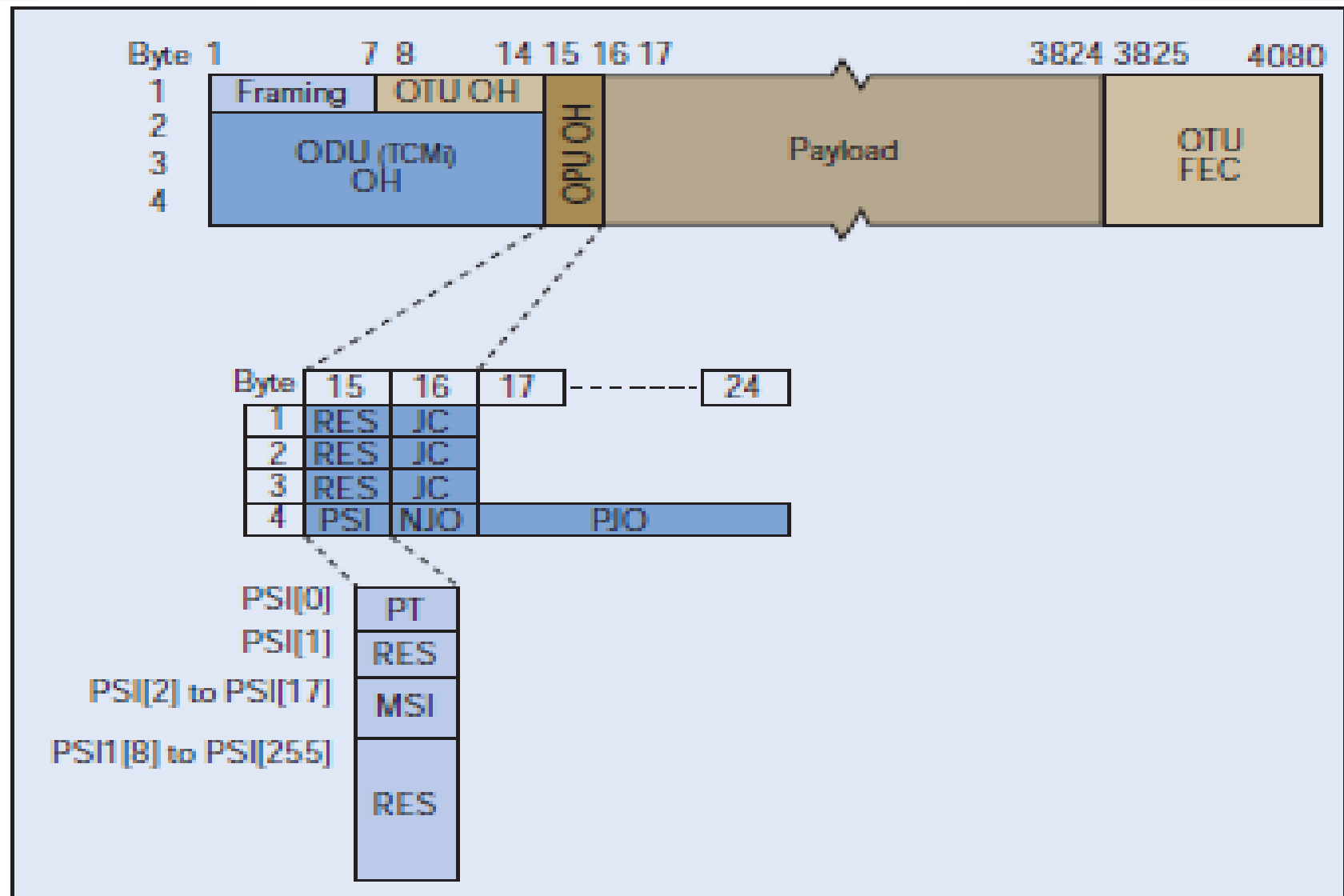
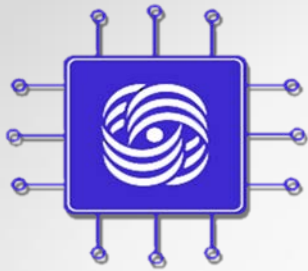
- | | | | | | |
|-------|---|-------|---|-------|----------------------------------|
| PM: | Path Monitoring | FTFL: | Fault Type & Fault Location reporting channel | TTI: | Trail Trace Identifier |
| TCM: | Tandem Connection Monitoring | EXP: | Experimental | BIP8: | Bit Interleaved Parity - level 8 |
| SAPI: | Source Access Point Identifier | GCC: | General Communication Channel | BEI: | Backward Error Indication |
| DAPI: | Destination Access Point Identifier | APS: | Automatic Protection Switching coordination channel | BDI: | Backward Defect Indication |
| RES: | Reserved for future international standardisation | PCC: | Protection Communication Control channel | STAT: | Status |
| ACT: | Activation/deactivation control channel | | | PSI: | Payload Structure Identifier |
| | | | | PT: | Payload Type |

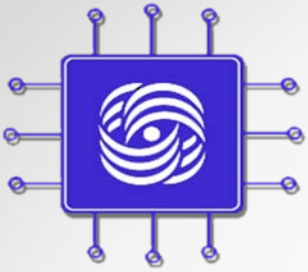


ODU заголовков

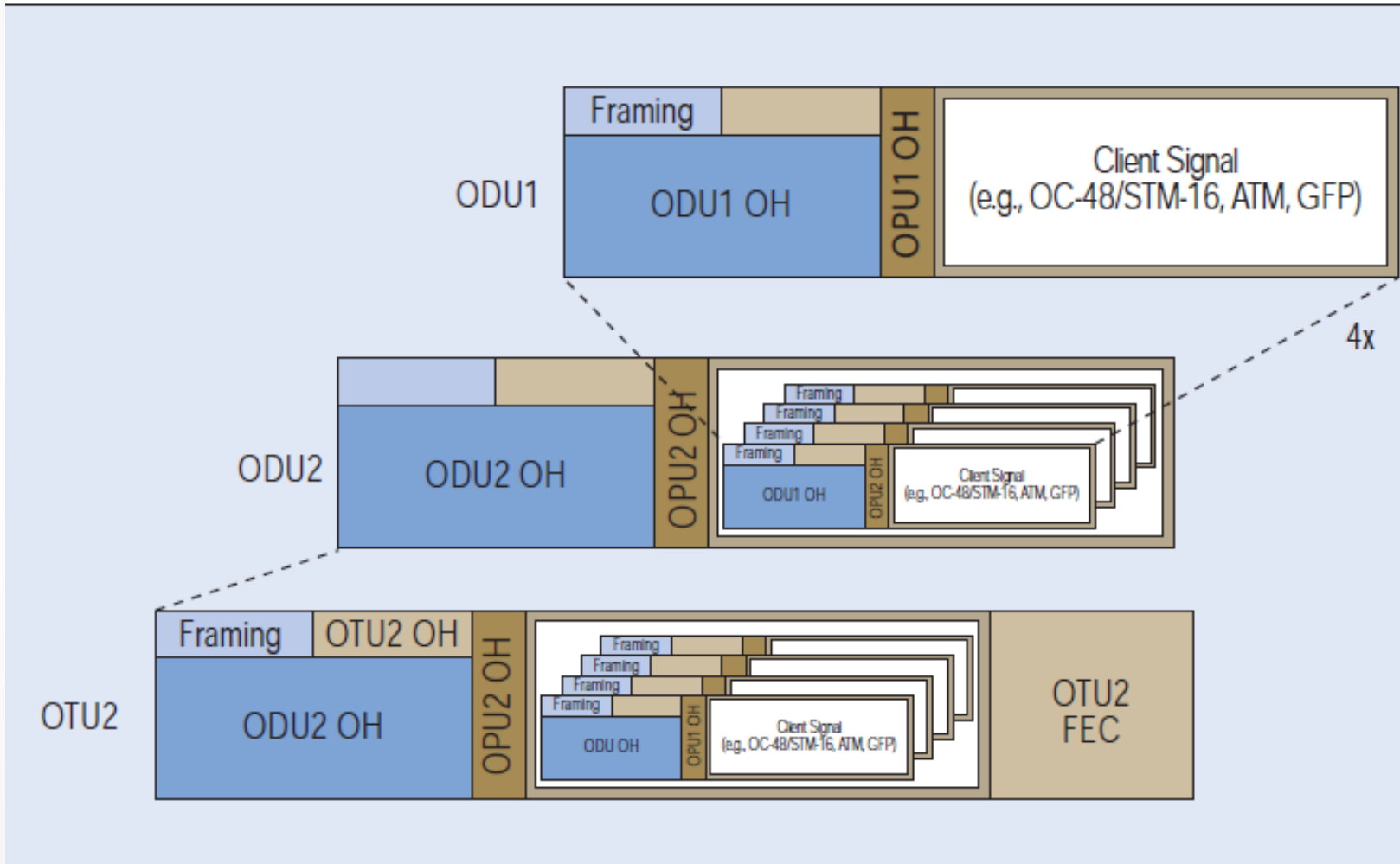


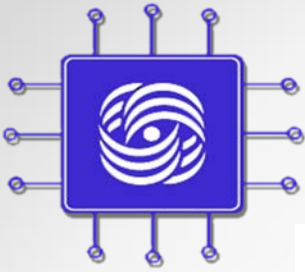
Структура OPU кадра



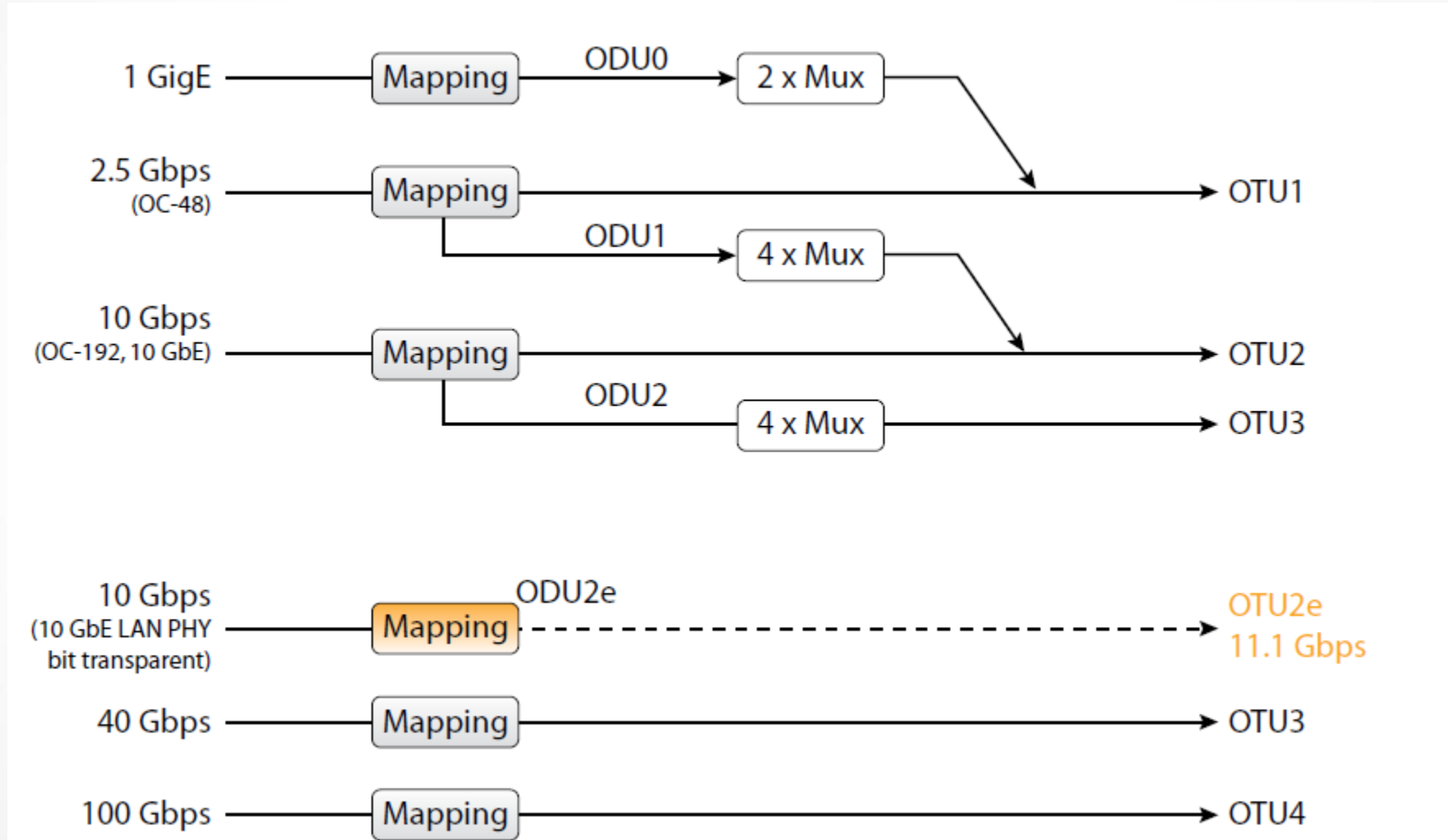


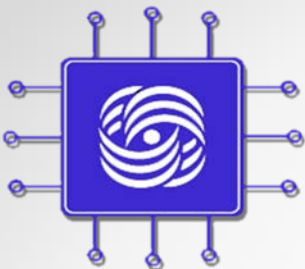
ODU мультиплексирование



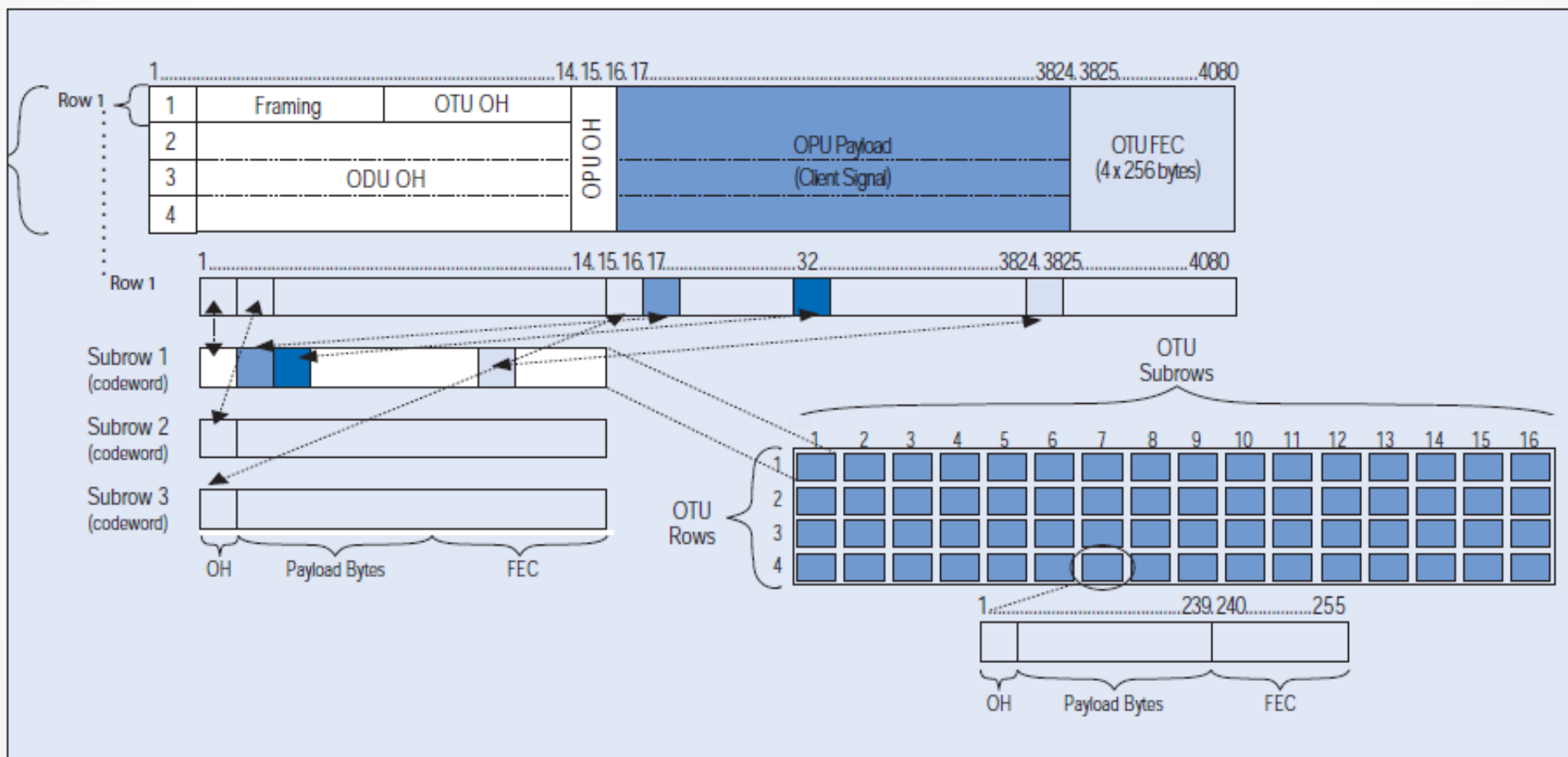


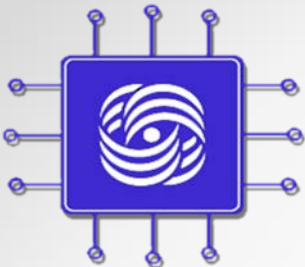
Соответствие между ODU и OTU





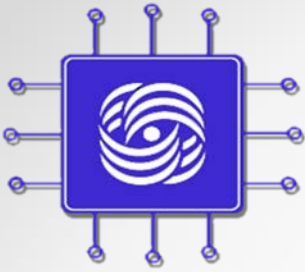
FEC механизм





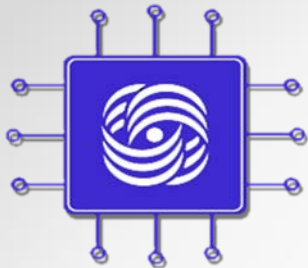
Типы ODU и их скоростные характеристики

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,	
CBR clients from greater than 2.5 Gbit/s to 100 Gbit/s, or GFP-F mapped packet clients from 1.25 Gbit/s to 100 Gbit/s.	ODUflex
–	

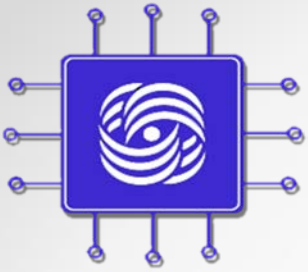


OTU скорости и интерфейсы

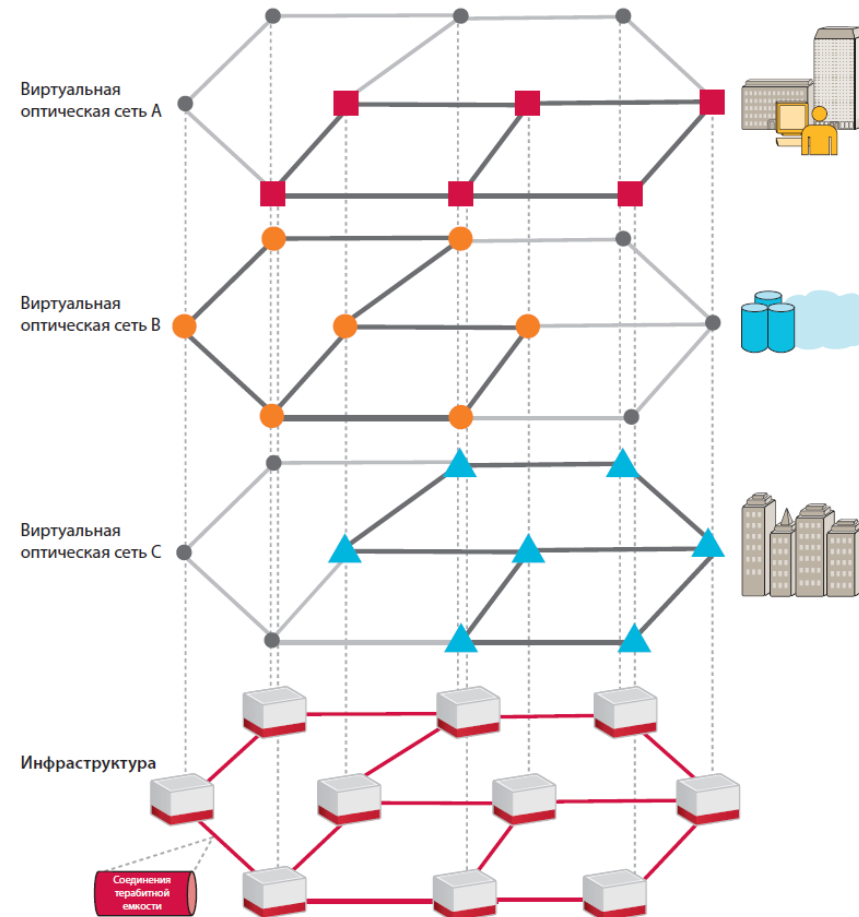
G.709 Interface	Line Rate	Corresponding SONET/SDH Rate	Line Rate
OTU1	2.666 Gbit/s	OC-48/STM-16	2.488 Gbit/s
OTU2	10.709 Gbit/s	OC-192/STM-64	9.953 Gbit/s
OTU3	43.018 Gbit/s	OC-768/STM-256	39.813 Gbit/s

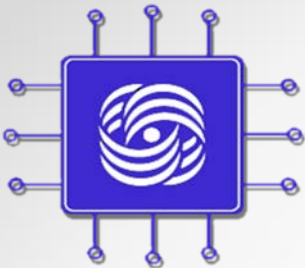


Примеры применения

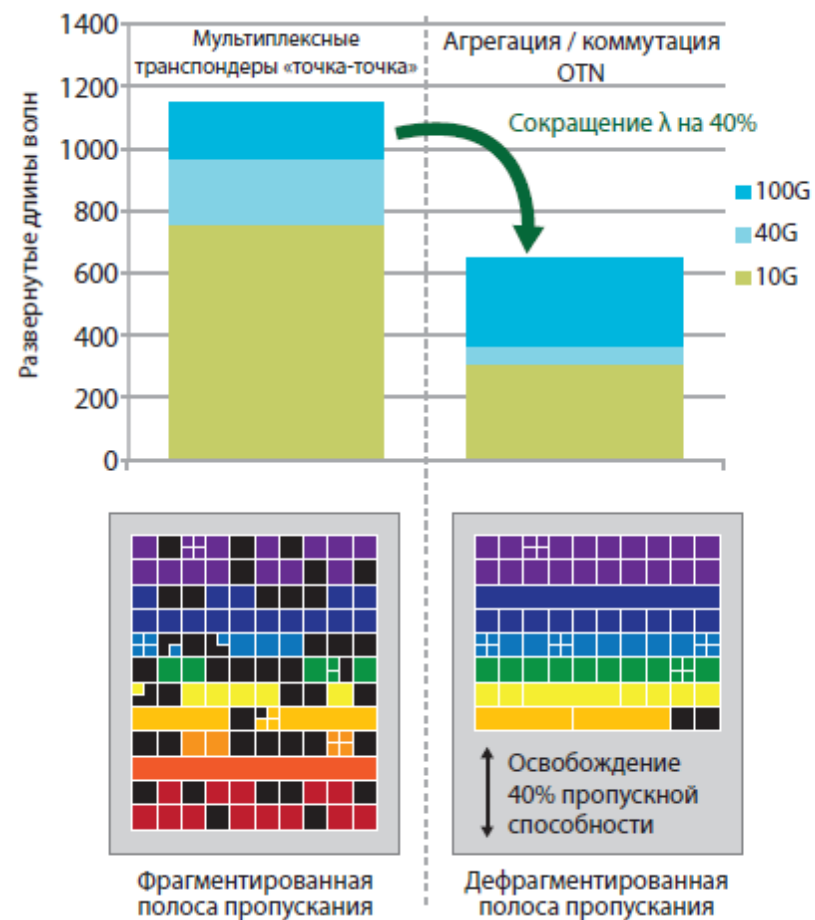


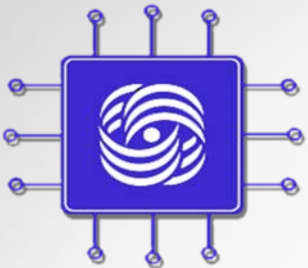
Виртуальные сети на база OTN





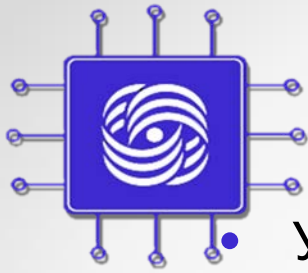
Дефрагментирование загрузки линий





OTN и динамическое управление в супер облаке





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.
- Сопряжение с MPLS-TE