

Научно-практический семинар
**Единое точное время в пакетных сетях:
требования, задачи и их решения от АО «Время-Ч»**

Обзор международных стандартов и рекомендации в области синхронизации

Михаил Вексельман,
к.т.н, АО «Время-Ч»

РТР 2.0 и РТР 2.1

Год создания	Номер версии РТР	Обратная совместимость
2002	1	Не определена
2008	2	Нет
2019	2.1	Да, с версией 2.0

Улучшения и изменения, которые появились в версии 2.1 по сравнению с 2.0:

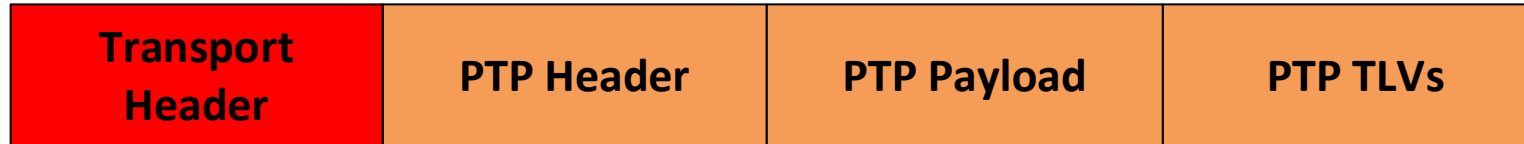
- Протокол стал более гибким и универсальным
- Протокол стал более надежным и защищенным
- В протокол были добавлены рекомендации для повышения точности

Что нового в PTP 2.1 (IEEE-1588-2019)

Улучшения и изменения, которые появились в версии 2.1 по сравнению с 2.0:

- **Sdold:** расширенная идентификация профилей, улучшает совместную работу устройств
- **Гибридный режим:** комбинированное использование multicast и unicast снижает сетевую нагрузку.
- **Безопасность:** внедрение AUTH TLV и ICV для защиты целостности и авторизации.
- **Modular Transparent Clock:** поддержка TC на уровне порта и внешних модулей (например, SFP).
- **Slave Monitoring:** сбор метрик точности и состояния Slave Clock для диагностики и контроля.
- **Inter-domain Interactions**
 - Поддержка взаимодействия между несколькими независимыми PTP-доменами
 - Поддержка множества Grandmaster и Slave Clock в разных доменах
 - Интеграция сетей с различными профилями или топологиями
- **Enhanced Accuracy Metrics TLV** в сообщении Announce

Протокол PTP. Сообщения



Type-length-value (TLV, также «type-length-value» или «tag-length-value») — широко распространённый метод записи коротких данных в компьютерных файлах и телекоммуникационных протоколах.

Что нового в PTP 2.1 (IEEE-1588-2019)

1. Sdold: расширенная идентификация профилей, улучшает совместную работу устройств

Bits								Octets	Offset
7	6	5	4	3	2	1	0		
transport Specific				messageType				1	0
reserved				versionPTP				1	1
messageLength								2	2
domainNumber								1	4
reserved								1	5
flagField								2	6
correctionField								8	8
reserved								4	16
sourcePortIdentity								10	20
sequenceId								2	30
controlField								1	32
logMessageInterval								1	33

Заголовок для PTP пакета версии 2.0

Bits								Octets	Offset
7	6	5	4	3	2	1	0		
majorSdold				messageType				1	0
minorVersionPTP				versionPTP				1	1
messageLength								2	2
domainNumber								1	4
minorSdold								1	5
flagField								2	6
correctionField								8	8
messageTypeSpecific								4	16
sourcePortIdentity								10	20
sequenceId								2	30
controlField								1	32
logMessageInterval								1	33

Заголовок для PTP пакета версии 2.1

Что нового в PTP 2.1 (IEEE-1588-2019)

2. Гибридный режим (Mixed Mode): комбинированное использование multicast и unicast снижает сетевую нагрузку.

Тип сообщения	Режим передачи
Announce	Multicast
Sync	Multicast
Follow_Up	Multicast (если two-step)
Delay_Req	Unicast
Delay_Resp	Unicast

Что нового в PTP 2.1 (IEEE-1588-2019)

3. Безопасность

Механизмы интегрированной безопасности (Integrated security mechanism)



Для безопасной обработки AUTHENTICATION TLV необходим механизм управления ключами.
Для оценки целостности пакета PTP вводится новое поле ICV- Integrity Check Value

Что нового в RTP 2.1 (IEEE-1588-2019)

4. Безопасность

Enhanced Accuracy Metrics TLV — это дополнительный блок данных, который может быть включён в сообщение Announce и содержит подробные метрики качества синхронизации, измеренные текущим Grandmaster или Boundary Clock.

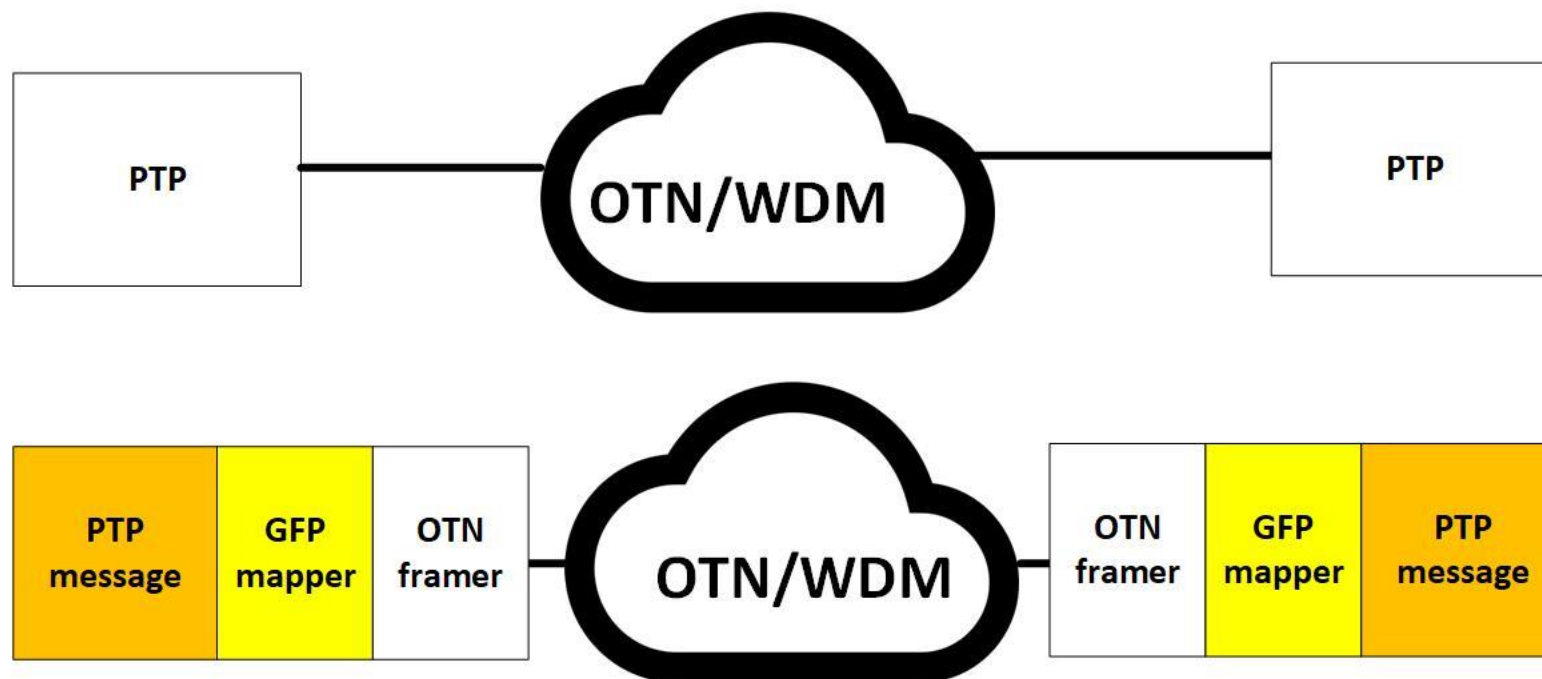
Поле	Описание
meanPathDelay	Средняя задержка от источника до текущего узла
delayVariation	Вариация задержки (PDV)
offsetFromMaster	Смещение от мастера
syncMessageCount	Кол-во полученных Sync
delayResponseCount	Кол-во Delay_Resp
discardedPacketCount	Сколько пакетов было отброшено (например, по фильтру)
uncertaintyMetrics	Неопределенные поля для оценки качества расчёта времени

Выбор по протоколу BMCA может проходить не по приоритетам или ClockClass, а по реальным метрикам

Развитие PTP 2.1 (IEEE-1588-2019)

Буква-код / год	№ поправки внутри стандарта	Краткое содержание
1588b-2022	Amendment 1	Нормативное отображение (mapping) PTP поверх Optical Transport Network (OTN) ;
1588g-2022	Amendment 2	Ввод <i>опциональной</i> инклюзивной терминологии timeTransmitter / timeReceiver вместо <i>master/slave</i> , новые имена состояний портов;
1588a-2023	Amendment 3	Расширения для BMCA : улучшенный TLV <i>Enhanced Accuracy</i> , пояснительный Annex по алгоритму выбора Grandmaster, опциональное управление таймаутом Announce;
1588d-2023	Amendment 4	Руководство по использованию GDOI (Group Domain of Interpretation) для распределения ключей безопасности PTP
1588e-2024	Amendment 5	Полные MIB и YANG -модули для всех PTP-dataset'ов;

1588b-2022
PTP over OTN (G.709)



1588g-2022

Изменение терминологии в области синхронизации

International Telecommunication Union

ITU-T

TELECOMMUNICATION
STANDARDIZATION SECTOR
OF ITU

G.8273.2/Y.1368.2

(08/2019)

SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA,
DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKSPacket over Transport aspects – Synchronization, quality
and availability targetsSERIES Y: GLOBAL INFORMATION
INFRASTRUCTURE, INTERNET PROTOCOL ASPECTS,
NEXT-GENERATION NETWORKS, INTERNET OF
THINGS AND SMART CITIES

Internet protocol aspects – Transport

**Timing characteristics of telecom boundary
clocks and telecom time slave clocks**ITUPublications
RecommendationsInternational Telecommunication Union
Standardization Sector

Recommendation

ITU-T G.8273.2/Y.1368.2 (06/2023)

SERIES G: Transmission systems and media, digital
systems and networksPacket over Transport aspects – Synchronization, quality
and availability targetsSERIES Y: Global information infrastructure, Internet
protocol aspects, next-generation networks, Internet of
Things and smart citiesInternet protocol aspects – Transport

**Timing characteristics of telecom boundary
clocks and telecom time synchronous clocks
for use with full timing support from the
network**

1588a-2023 Расширения для BMCA

Alternate Best Master Clock Algorithm стал частью IEEE 1588 - 2019

В Enhanced Accuracy Metrics TLV введены новая метрика:

- stepsRemovedInaccuracyNs (накопленная ошибка пути)

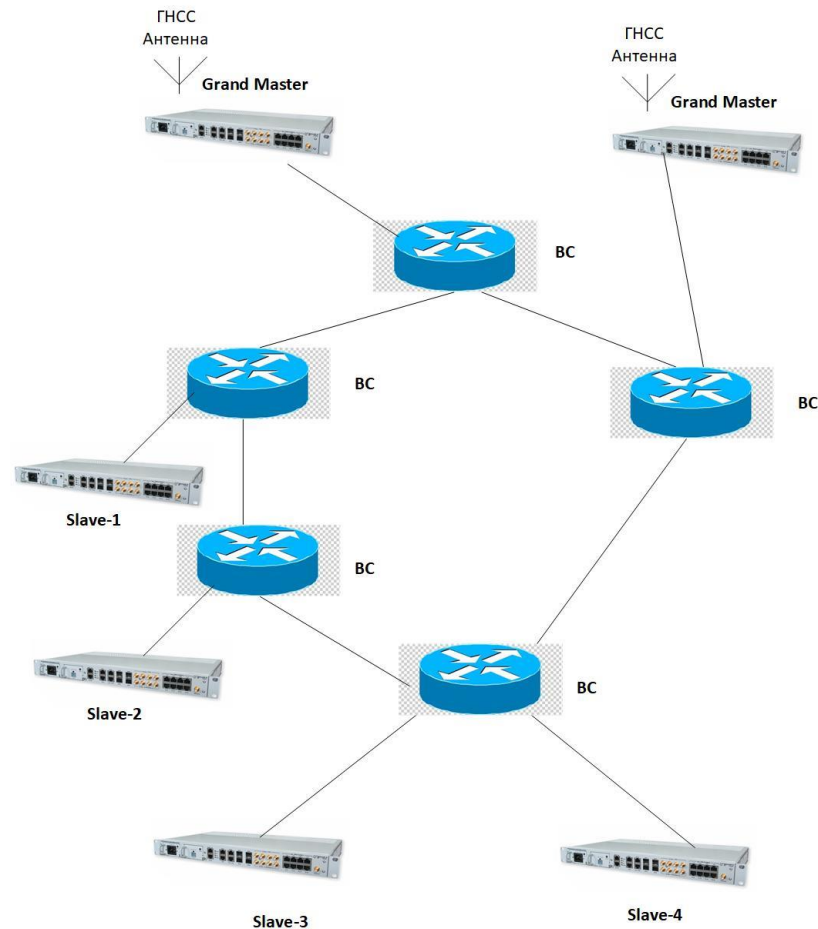
Введен опциональный механизм управления Announce-timeout

В Signaling-кадрах определяется новый параметр —

AnnounceReceiptTimeoutRequest. Узел-инициатор может предложить соседу увеличить/уменьшить таймаут приёмов

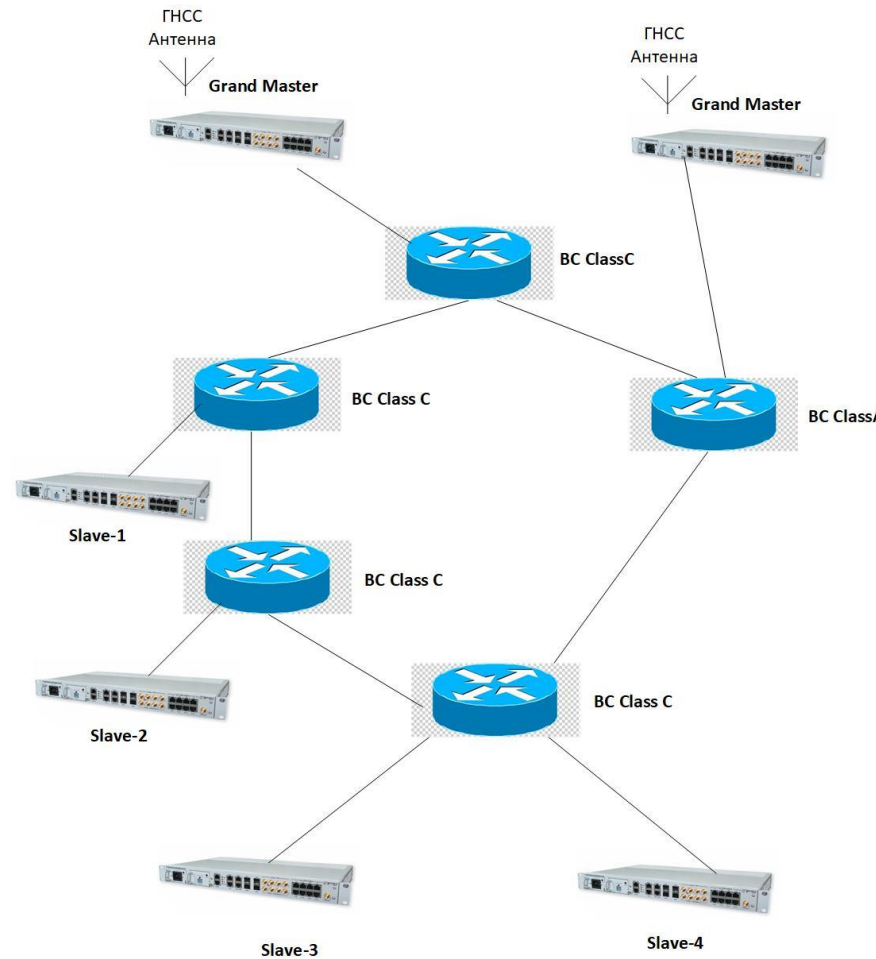
1588a-2023 Расширения для VMCA

Что дает метрика Enhanced Accuracy Metrics TLV в выборе по алгоритму VMCA



1588a-2023 Расширения для ВМСА

Что дает метрика Enhanced Accuracy Metrics TLV в выборе по алгоритму ВМСА



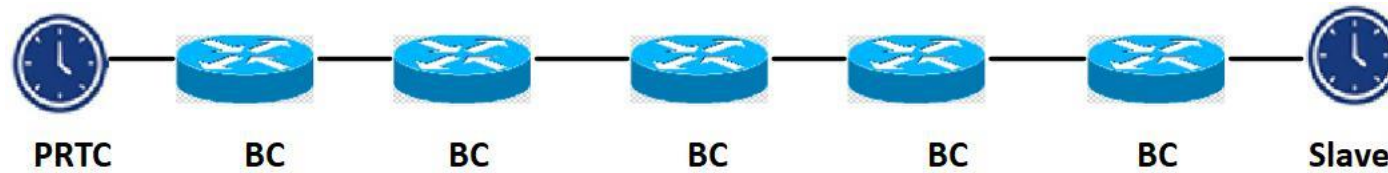
SyncE
Сравнение EEC (G.8262) и eEEC (G.8262.1)

Параметр	EEC (G.8262)	eEEC (G.8262.1)
Frequency Accuracy	4.6 ppm	4.6 ppm
Pull in/Hold in	4.6 ppm	4.6 ppm
Wander generation	MTIE: 40ns @ 0.1s, rising to 113ns @1000s TDEV: 3.2ns @ 0.1s, rising to 6.4ns@1000s	MTIE: 7ns @ 0.1s, rising to 25ns @1000s TDEV: 0.64ns @ 0.1s, rising to 1.28 ns@1000s
Wander tolerance	250ns @ 0.1s, rising to 5000ns @1000s	250ns @ 0.1s, rising to 5000ns @1000s
Jitter generation	0.5UI (1G,10G) 1.2UI (25G)	0.5UI (1G,10G) 1.2UI (25G)
Clock Bandwitn	1-10 Hz	1-3 Hz
Holdover	120ns initial step, then 50ns/s frequency offset, plus 1.16×10^{-4} ns/s ² drift (const.temp)	10ns initial step, then 10 ns/s frequency offset, plus 1.16×10^{-4} ns/s ² drift (const.temp)

Терминология ОЕС / еОЕС

	Базовая рекомендация	Описание и целевая область применения
ОЕС (O TN E quipment Clock)	G.8251 (для транспорта OTU-k)	Физические OTN-часы, аналог ЕЕС для Ethernet
еОЕС (e nhanced OTN Equipment Clock)	G.8262.1	ОЕС с ужесточёнными шумовыми масками (полностью идентичны еЕЕС) предназначен для сетей 5G, fronthaul, eCPRI.

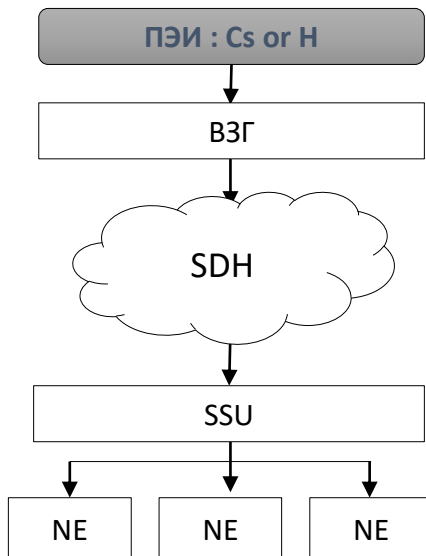
G.8275.1



Профиль G.8275.1 фазовый. Работает в режиме Ethernet Multicast. Требуется поддержка протокола PTP в качестве Boundary Clock или Transparent Clock на всех транзитных узлах сети от GM до Slave. Рекомендуется использовать совместно с SyncE для передачи частоты.

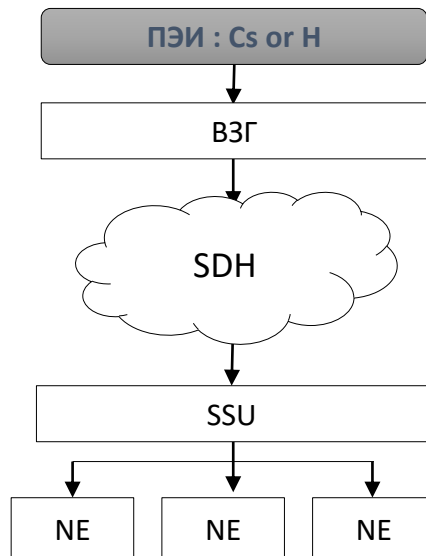
Эволюция PRC

PRC (G.811) Частота



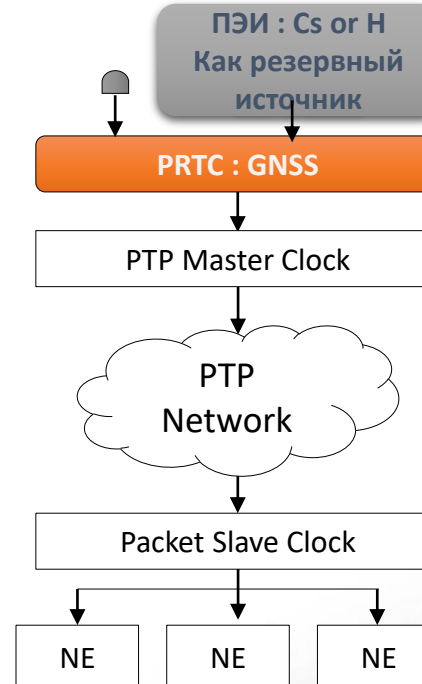
$$\frac{\Delta f}{f} = 1 \cdot 10^{-11}$$

ePRC (G.811.1) Частота



$$\frac{\Delta f}{f} = 1 \cdot 10^{-12}$$

PRTC (G.8272) Частота + Фаза

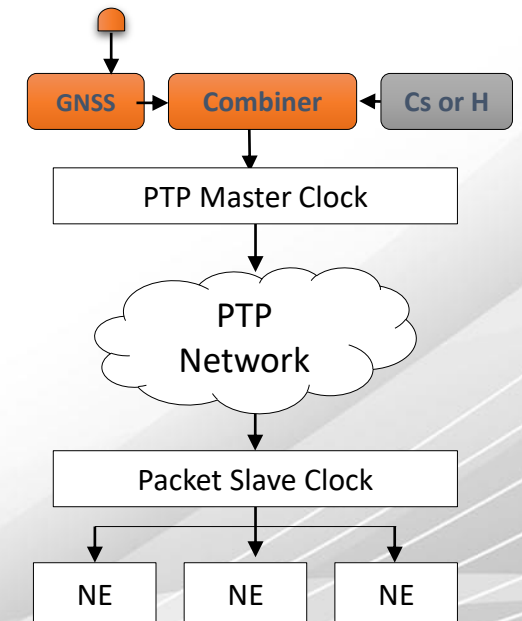


$$\frac{\Delta f}{f} = 1 \cdot 10^{-12}$$

$$\Delta \varphi = \pm 100 \text{ ns (для PRTC-A)}$$

$$\Delta \varphi = \pm 40 \text{ ns (для PRTC-B)}$$

ePRTC (G.8272.1) Частота + Фаза

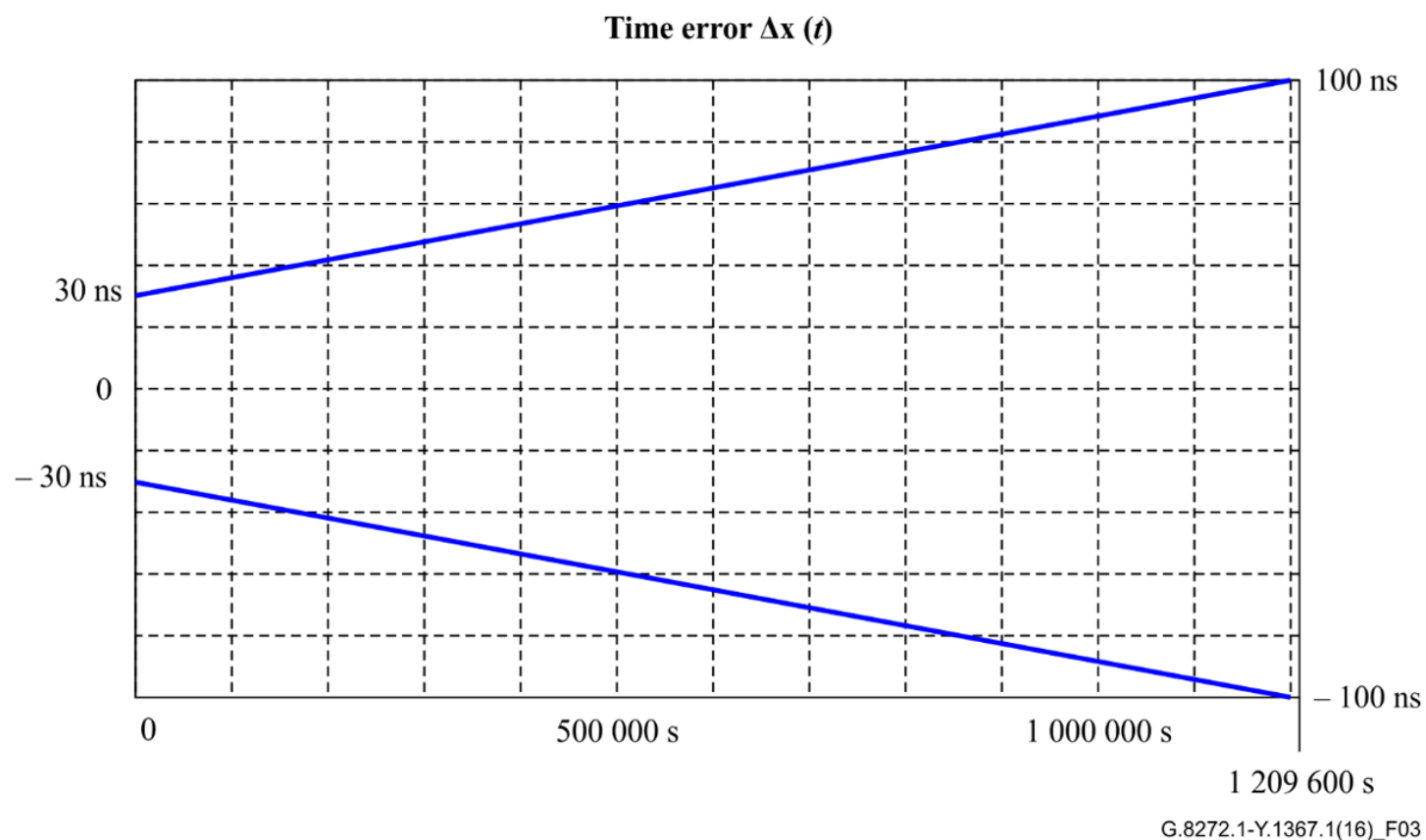


$$\frac{\Delta f}{f} = 1 \cdot 10^{-12}$$

$$\Delta \varphi = \pm 100 \text{ ns (для PRTC-A)}$$

$$\Delta \varphi = \pm 30 \text{ ns (для PRTC-B)}$$

В режиме удержания в течении 14 дней отклонение фазы от UTC от 30 до 100нс!! (рекомендация G.8271.1)



ePRTC(G.8272.1)

**PTP Master Clock с приемником ГНСС и
функцией комбайнера**

ПЭИ : высокоточный источник частоты

PTP Grand Master (GM) VCH-505



ПЭИ VCH -1008C



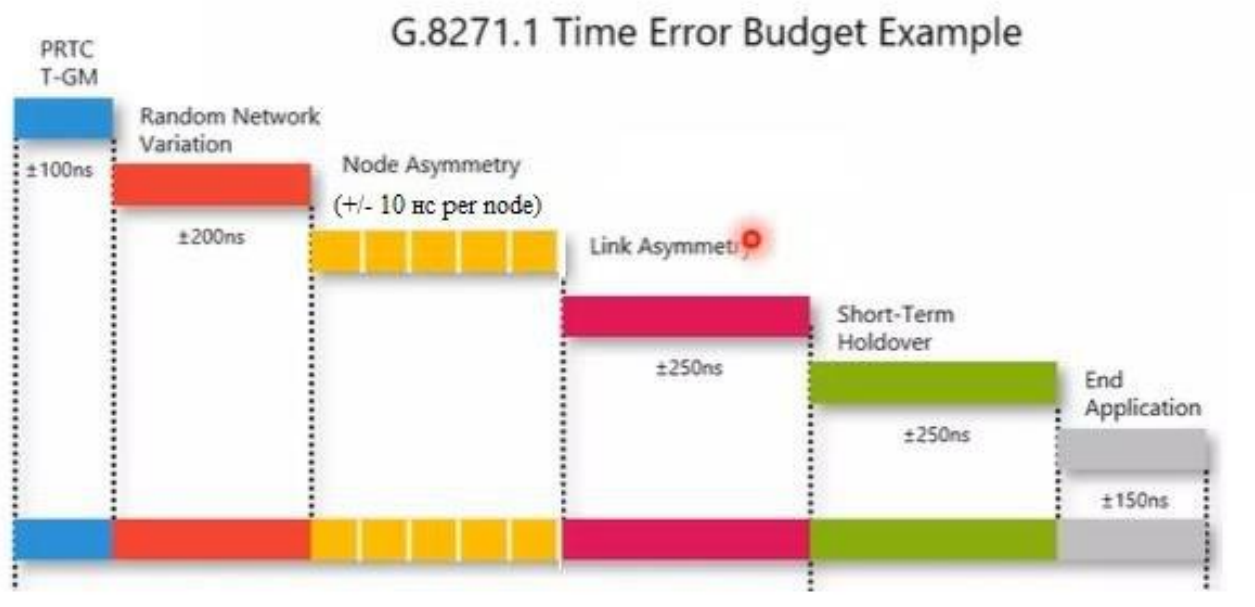
Рекомендация G.8273.2 Timing characteristics of telecom boundary clocks and telecom time slave clocks

Класс ВС	Max. Absolute Time Error; Max TE (нс)	Constant time Error; cTE (нс)
A	≤ 100 ns	$\leq \pm 50$ ns
B	≤ 70 ns	$\leq \pm 20$ ns
C	≤ 30 ns	$\leq \pm 10$ ns
D	≤ 5 ns	Для будущего исследования

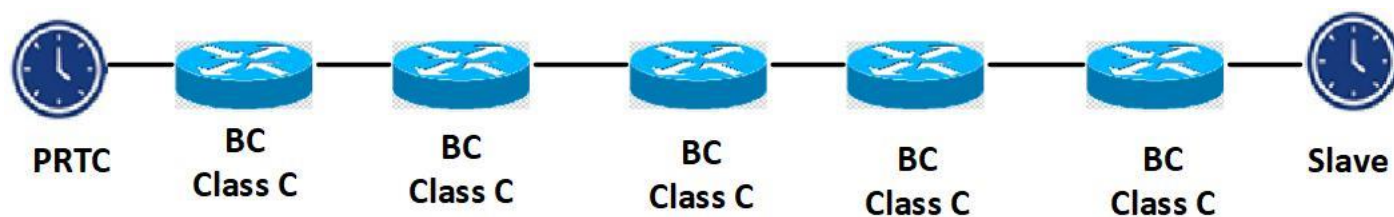
Рекомендация G.8273.3
Timing characteristics of telecom transparent clocks

Класс ТС	Max. Absolute Time Error; Max TE (нс)	Constant time Error; cTE (нс)
A	≤ 100 ns	$\leq \pm 50$ ns
B	≤ 70 ns	$\leq \pm 20$ ns
C	≤ 10 ns	$\leq \pm 10$ ns

Рекомендация G.8271.1 Расчет бюджета

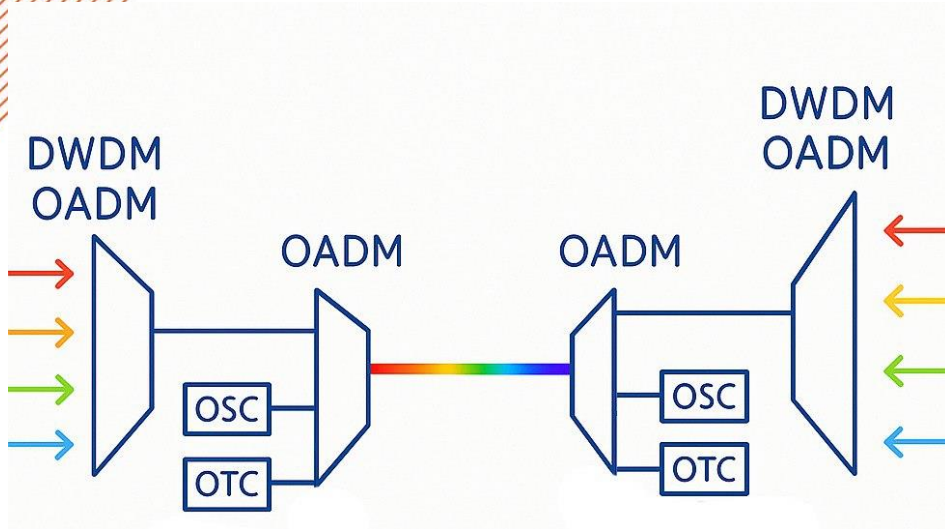


Рекомендация G.8271.1 Расчет бюджета

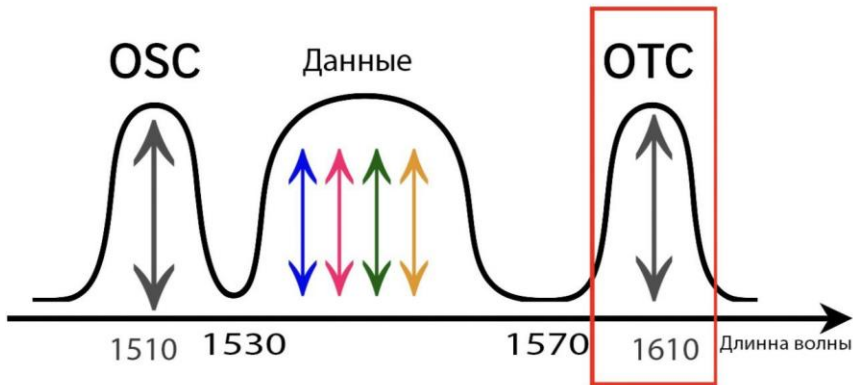


$$TE = 100\text{нс} + 200\text{нс} + 10 \cdot 10\text{нс} + 250\text{нс} + 250\text{нс} + 150\text{нс} = 1050\text{нс} (< 1500\text{нс})$$

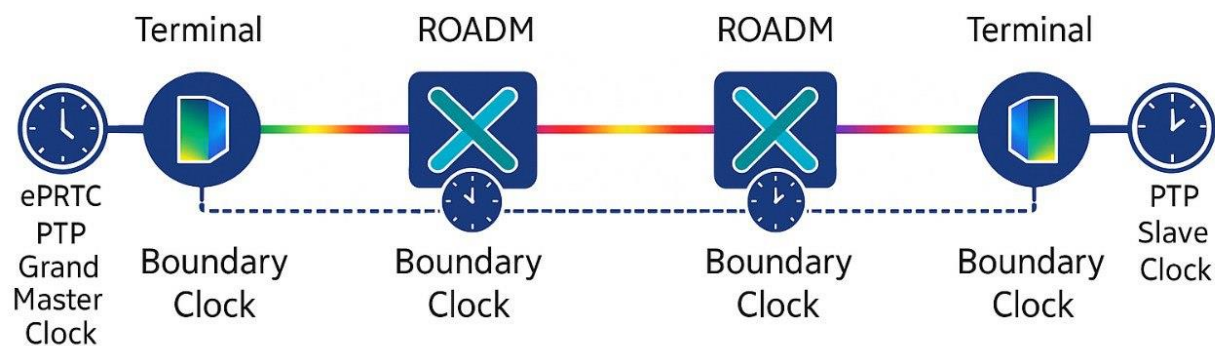
OTC (Optical Time Channel)



- Реализуется в системах связи DWDM
- Выделяется отдельный оптический канал на своей длине волны для передачи сигналов синхронизации (на картинке пример для канала 1610 нм, но на практике могут использоваться другие)
- Работает подобно каналу управления OSC (Optical Supervisory Channel)
- Удобно использовать двунаправленный режим передачи с использованием bidirectional SFP модулей (упрощает реализацию компенсации асимметрии).



OTC (Optical Time Channel)



- Минимальные и предсказуемые задержки
- Защита от влияния клиентского трафика
- Независимость от отказов ГНСС
- В ОТС для передачи синхронизации используется протокол PTP (IEEE 1588)
- Для передачи и вывода синхронизации на транзитных узлах должна быть реализована функциональность PTP Boundary Clock

Расчет и калибровка ОТС

1

Оптический бюджет для передачи в канале ОТС на определенное расстояние

2

Временной бюджет ОТС

1

Задержки на транзитных узлах Boundary Clock

2

Асимметрия задержек в волокне

Расчет и калибровка ОТС. Асимметрия задержек в волокне

Асимметрия возникает при передаче и приёме сигналов по одному волокну на разных длинах волн (bidirectional OTC).

$$сТЕ \approx (L / 2) \times \Delta\lambda \times D,$$

где:

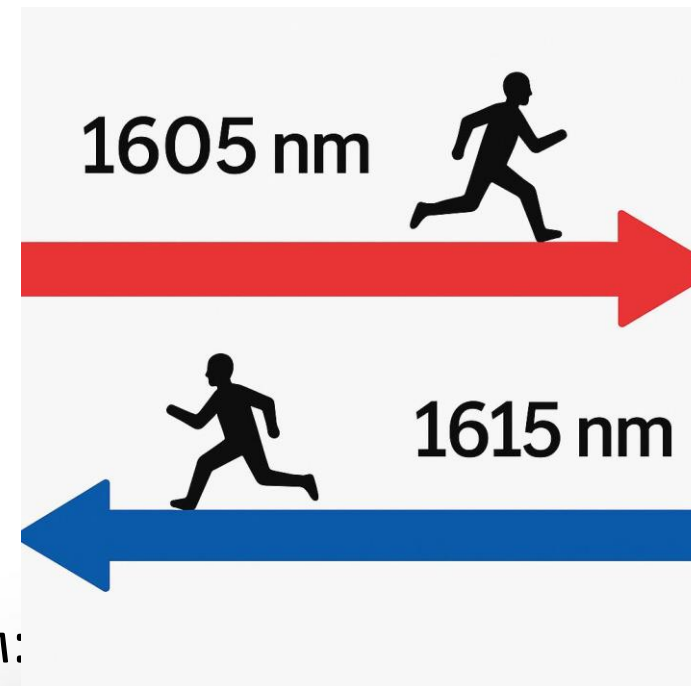
L — длина волокна (в км),

$\Delta\lambda$ — разница длин волн (в нм),

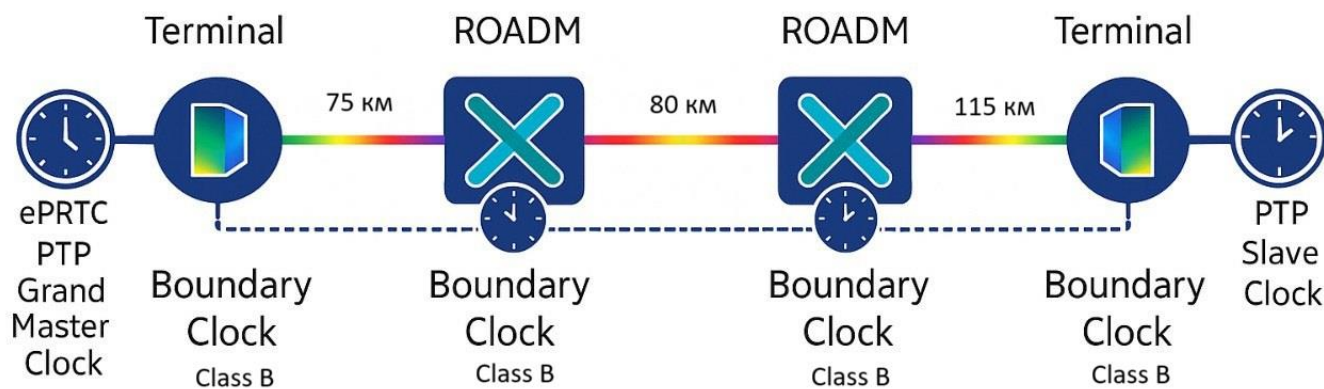
D — коэффициент хроматической дисперсии (обычно ~ 18 пс/нм·км для волокна G.652).

Пример для 100 км волокна и разницы длин волн 10 нм:

$$сТЕ \approx (100 / 2) \times 10 \times 18 = 9000 \text{ пс} = 9 \text{ нс}$$



Пример расчет временного бюджета ОТС



1	cTE (BC)	20 нс	20 нс	20 нс	20 нс	$\sum cTE(BC) = 80 \text{ нс}$
2	cTE (LINK)	6.75 нс	7.2 нс	10.35 нс		$\sum cTE(LINK) = 24 \text{ нс}$

$$cTE(ОТС) = (80 \text{ нс} + 24 \text{ нс}) * 1,3 = 135 \text{ нс}$$

Синхронизация в пакетных сетях

Синхронизация через ...	Технология	ТЕ (Time Error)
Layer 3	Маршрутизация (PTP G.8275.2, NTP)	мс/мкс
Layer 2	Коммутация (PTP G.8275.1)	мкс/(нс)
Layer 2	OTN (in band transmission)	мкс/нс
Layer 1	WDM (PTP via OTC)	нс
Layer 1	Темное волокно (White Rabbit CERN)	нс
Layer 1	Использование оптический модемов (не PTP)	< нс