

Научно-практический семинар  
**Единое точное время в пакетных сетях:  
требования, задачи и их решения от АО «Время-4»**

# **Общие вопросы систем синхронизации в сетях связи. История развития и эволюция решений.**

АО «Время-4»  
Докладчик Шварц Михаил Львович

В соавторстве:  
А.В. Рыжков, В.М. Аладин, М.И. Вексельман, Б.А. Сахаров,  
С.Ю. Медведев, К.Г. Мишагин, Е.А. Богданов, В.А. Лоховин

## Системы ТСС

### Потребители:

- ✓ Системы коммутации каналов  $n \times 64$ кБит/с: АТС, гибкие мультиплексоры

### Сети с плезиохронной иерархией – СП ПЦИ

- ✓ Синхронизация на уровне коммутационных станций
- ✓ Относительная точность частоты  $10^{-6} \div 10^{-8}$  по отношению к номиналу

### Сети с синхронной иерархией – СП СЦИ:

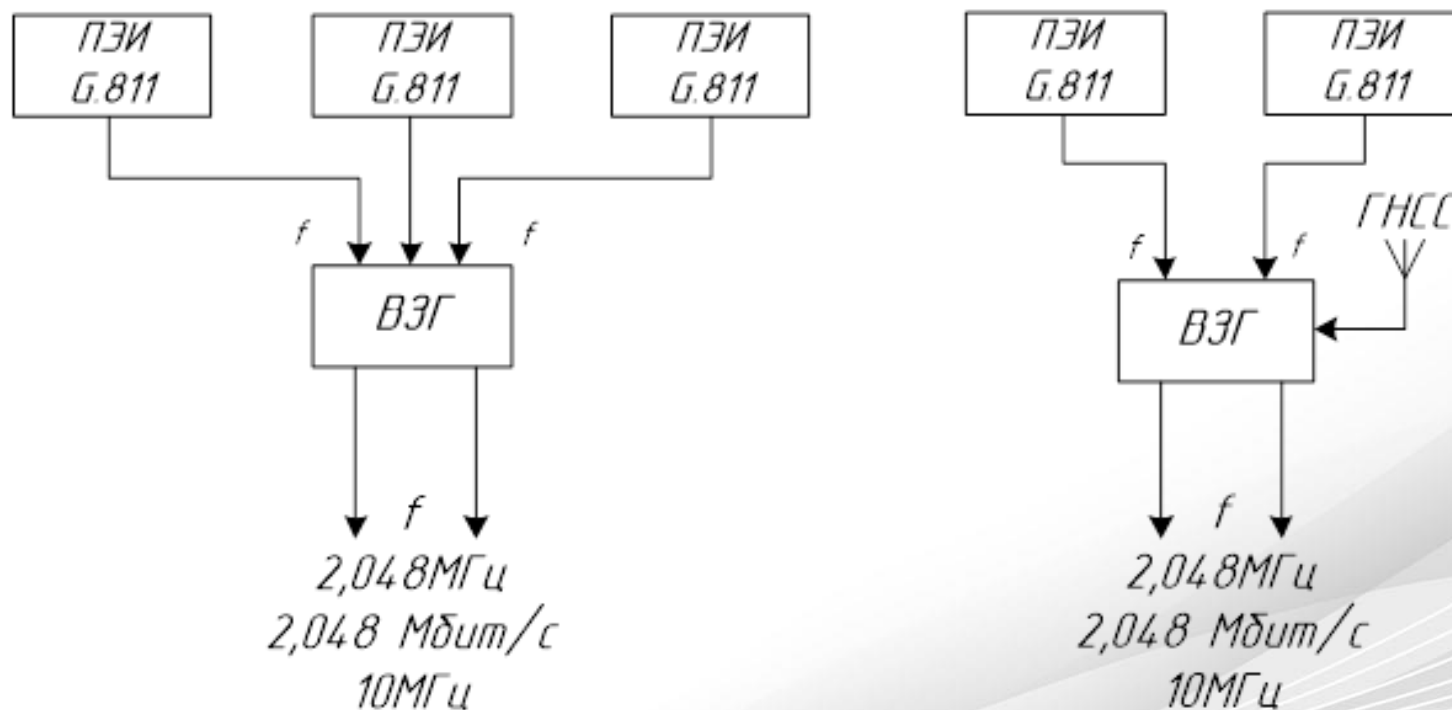
- ✓ относительная точность частоты  $10^{-11}$  по отношению к номиналу
- ✓ Появление сетей ТСС и комплекса нормативных документов

### Асинхронные сети с коммутацией пакетов :

- ✓ отсутствие требований к ТСС

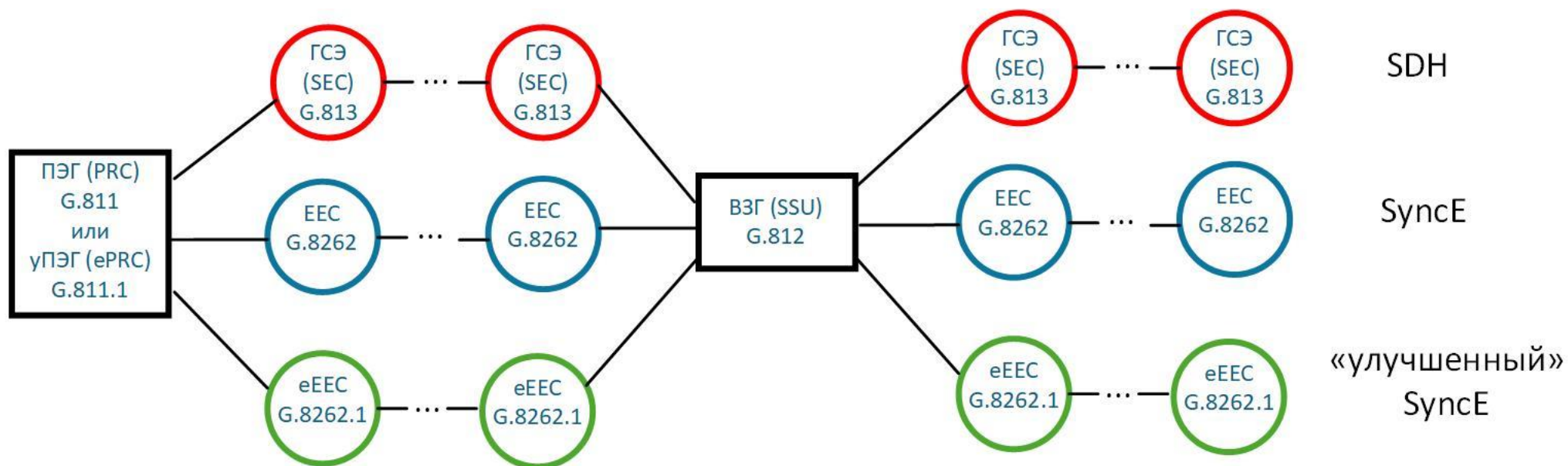
## Системы ТСС

ПЭГ  
G.811



## Примеры построения комплексов ПЭГ

## Системы ТСС



### Рекомендация G.803:

- В цепочке синхронизации не должно быть более 60 элементов ГСЭ и не более 10 ВЗГ.
- Между ПЭГ и ВЗГ или ВЗГ и ВЗГ не более 20 ГСЭ.

Частота передаётся на физическом уровне в линейных сигналах по оптическому волокну с минимальными искажениями, что позволяет обеспечить передачу эталонной частоты на расстояния сотни и тысячи км

## Сотовые сети связи

### Подсистема базовых станций:

- требования к точности синхронизации частоты: не хуже  $10^{-8}$  по отношению к номиналу

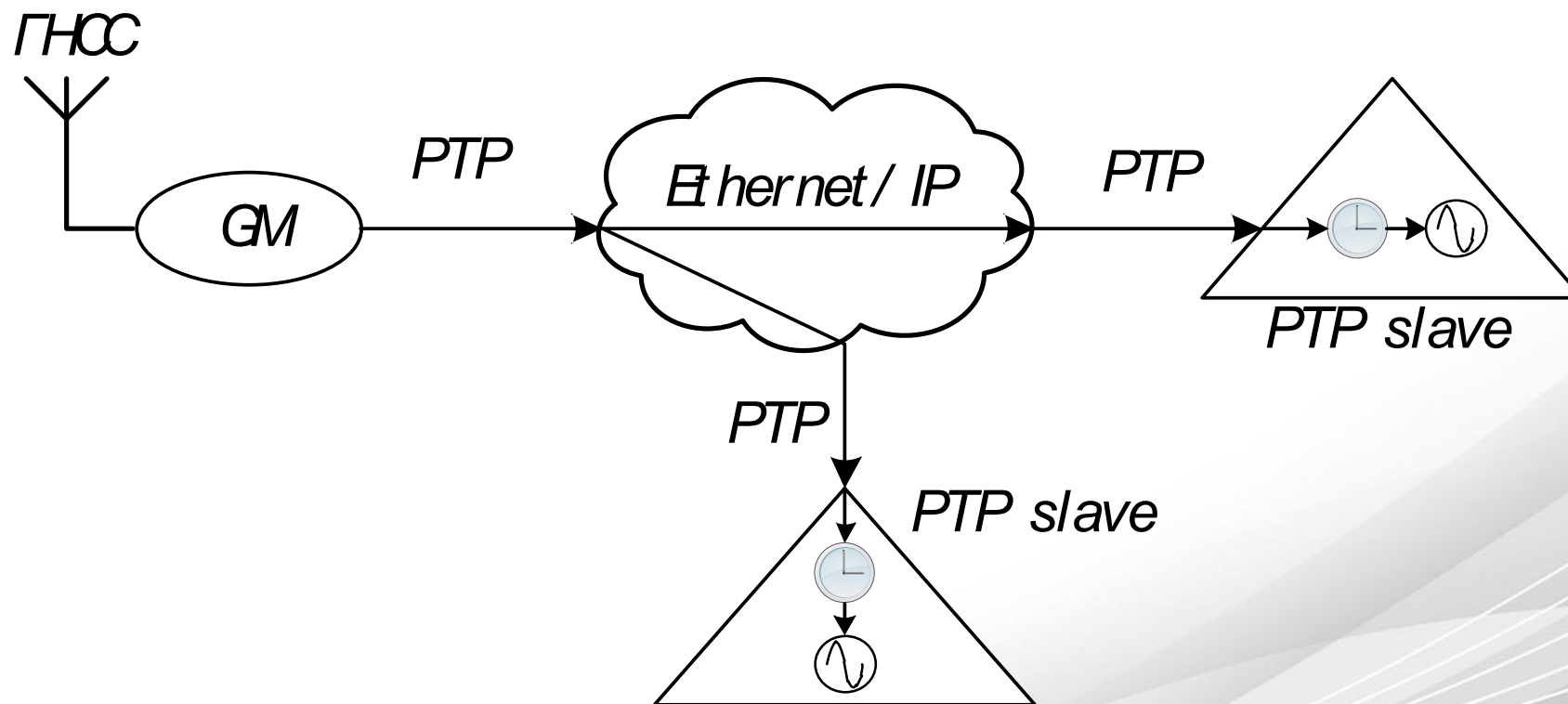
### Сети связи 2G, 2,5G:

- система ТСС в СЦИ + потоки E1

### Сети связи 3G, 4G FDD :

- РТР с частотным профилем: точность восстановления частоты -  $10^{-8} \div 10^{-10}$  по отношению к номиналу
- SynchroEthernet – аналог системы ТСС в СЦИ

## Синхронизация часов – способ восстановления эталонной частоты



Синхронизация генераторов оконечного оборудования  
от ведомых часов PTP

## Синхронизация компьютерных часов

### Различные сервисные платформы и услуги

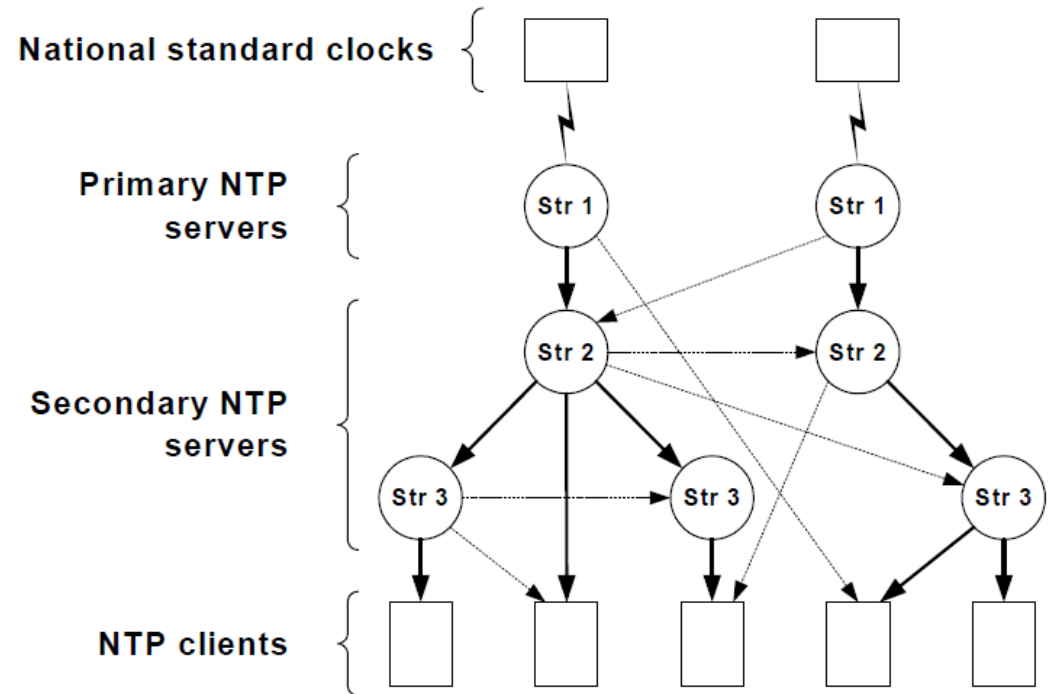
- точность шкал времени –  $10 \div 50$ мс
- применение протокола NTP
- Источники шкалы времени:
  - ✓ «На глаз» 😊
  - ✓ Что-то в интернете или сервер соседа

#### Более точные варианты:

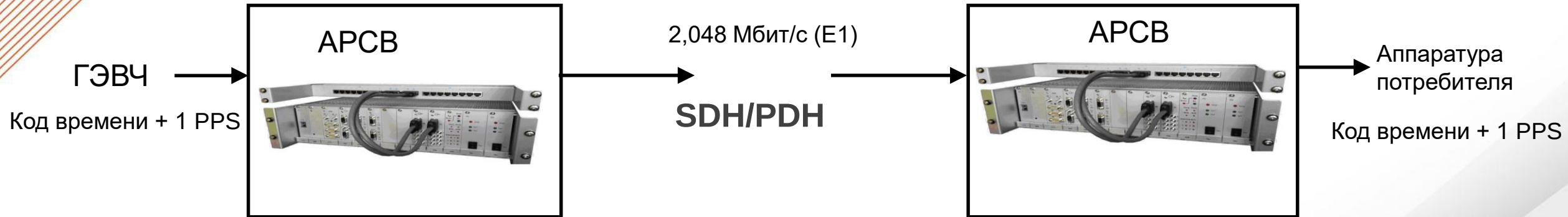
- ✓ Приёмник ГНСС в первичном NTP-сервере
- ✓ NTP-серверы ВНИИФТРИ

## Сетевой протокол NTP

- Протокол создан 1985 году
  - RFC 5905 (версия 4)
  - UDP port 123
- Использует UTC шкалу (начало отсчета с 01.01.1900, 00:00)
- Значения времени представляют собой 64-разрядные числа с фиксированной запятой, 32 бита для целой части, 32 бита для дробной части (переполнение 2036 год)
  - Доступно предупреждение о добавочной секунде (Leap second)
- Не поддерживает местное время и переходы на летнее время
- Реализация в ОС: Unix/Linux – daemon ntpd или chrony, MS Windows – W32Time



## Аппаратура распределения сигналов времени (APCB)



- ✓ Передача меток времени в потоках 2.048 Мбит/с (E1) в SDH/PDH
- ✓ Двусторонний обмен метками; точность до десятков нс благодаря предсказуемой асимметрии E1.

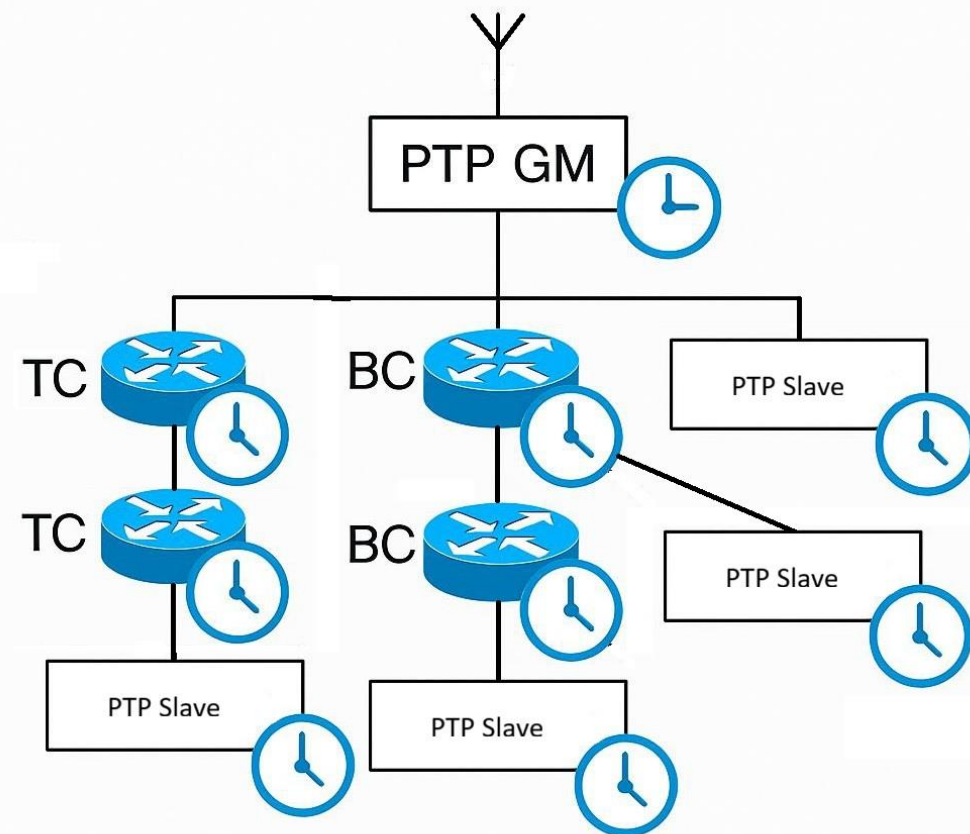
## Оптические модемы для передачи эталонных сигналов частоты и времени



Вносимая сопряжённой парой модемов VCH-608 абсолютная погрешность синхронизации выходного сигнала времени 1PPS независимо от длины ВОЛП в диапазоне от 100 м до 50 км не превышает 200 пс

## Прецизионный протокол времени (PTP)

- PTP – Precision Time Protocol
  - IEEE 1588-2008 версия 2.0
- Использует шкалу TAI (Начало отсчета 1970 год - Unix эпоха)
  - Использует аппаратные часы и аппаратное указание/чтение метки времени
- Определен для работы поверх L1, L2 или L3/L4
  - Master – Slave
- Кодирование времени: 48 бит для числа секунд и 32 бита для дробной части



## Профили протокола РТР

- Профиль G.8265.1 частотный. Предназначен для воспроизведения на ведомых часах только эталонной частоты. Он ориентирован на существующие пакетные сети связи, в оборудовании которых не имеется специальной аппаратной поддержки протокола РТР.
- Профиль G.8275.1 фазовый. Предназначен для надёжной реализации системы временной синхронизации в пакетных сетях, но реализуется только при наличии аппаратной поддержки протокола РТР на всех элементах сети.
- Профиль G.8275.2 фазовый. Используется в сетях с неполной (частичной) аппаратной поддержкой протокола РТР
- Профиль IEC 61.850-9.3 и С.37 «энергетический». Применяется в сетях энергетики.
- Около 20 иных профилей для различных отраслей техники.

## Сотовые сети 4 и 5 поколения

### Сети связи 4G TDD

- SynchroEthernet+PTP с фазовым профилем
- ✓ точность шкалы времени  $<1,5$  мкс
- ✓ точность частоты -  $10^{-11}$  по отношению к номиналу

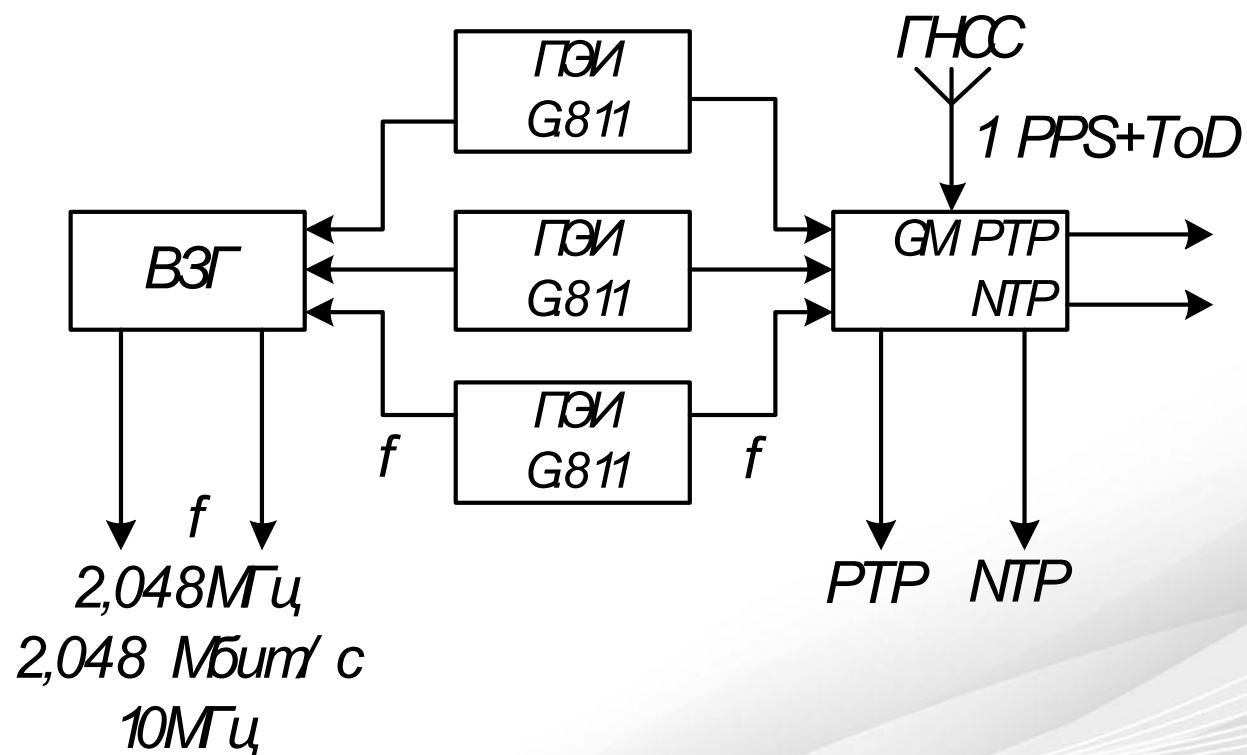
### Сети связи 5G

- SynchroEthernet+PTP с фазовым профилем
- ✓ точность шкалы времени  $<150 \div 250$  нс
- ✓ точность частоты -  $10^{-12}$  по отношению к номиналу
- ✓ Улучшенные генераторы всех уровней

## Структура ПЭВЧ

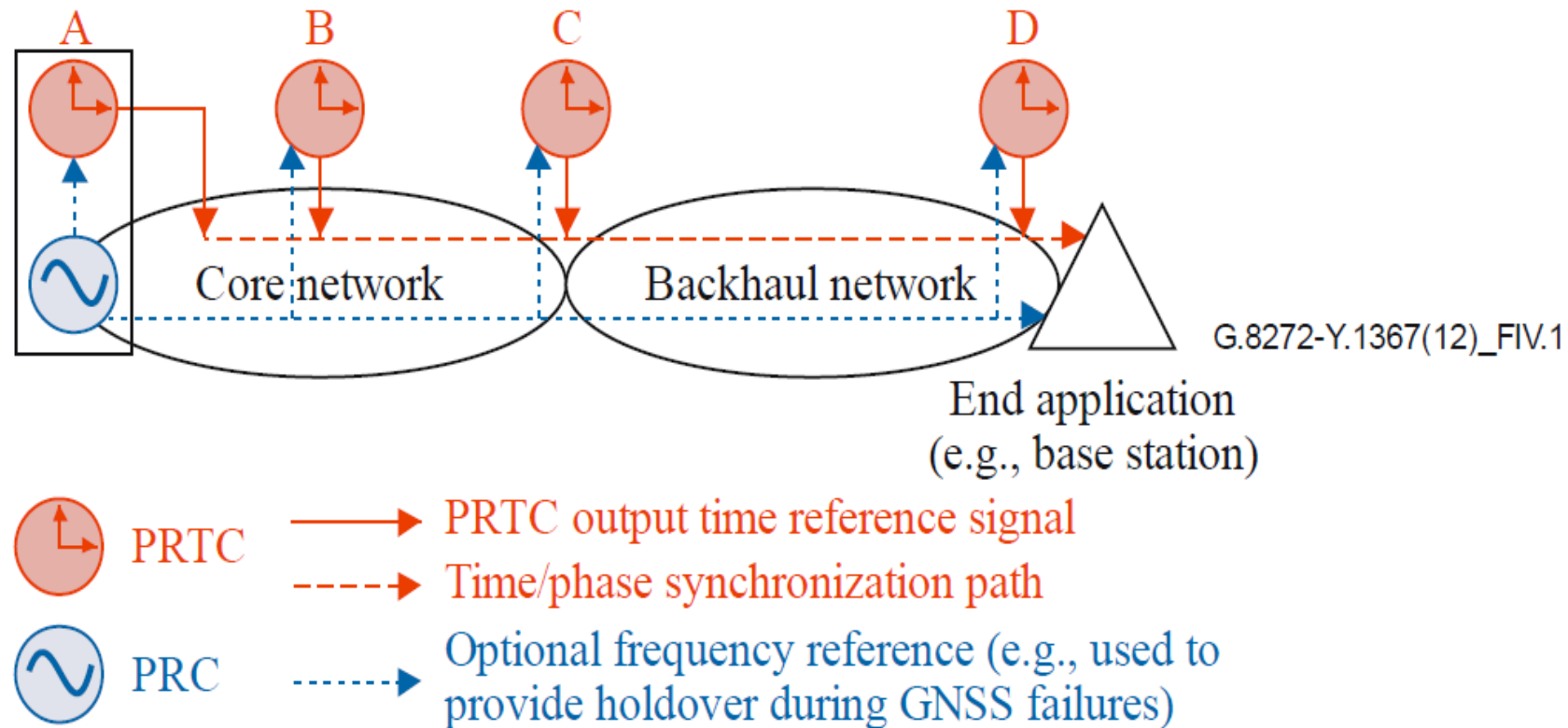
ПЭВЧ

G8272



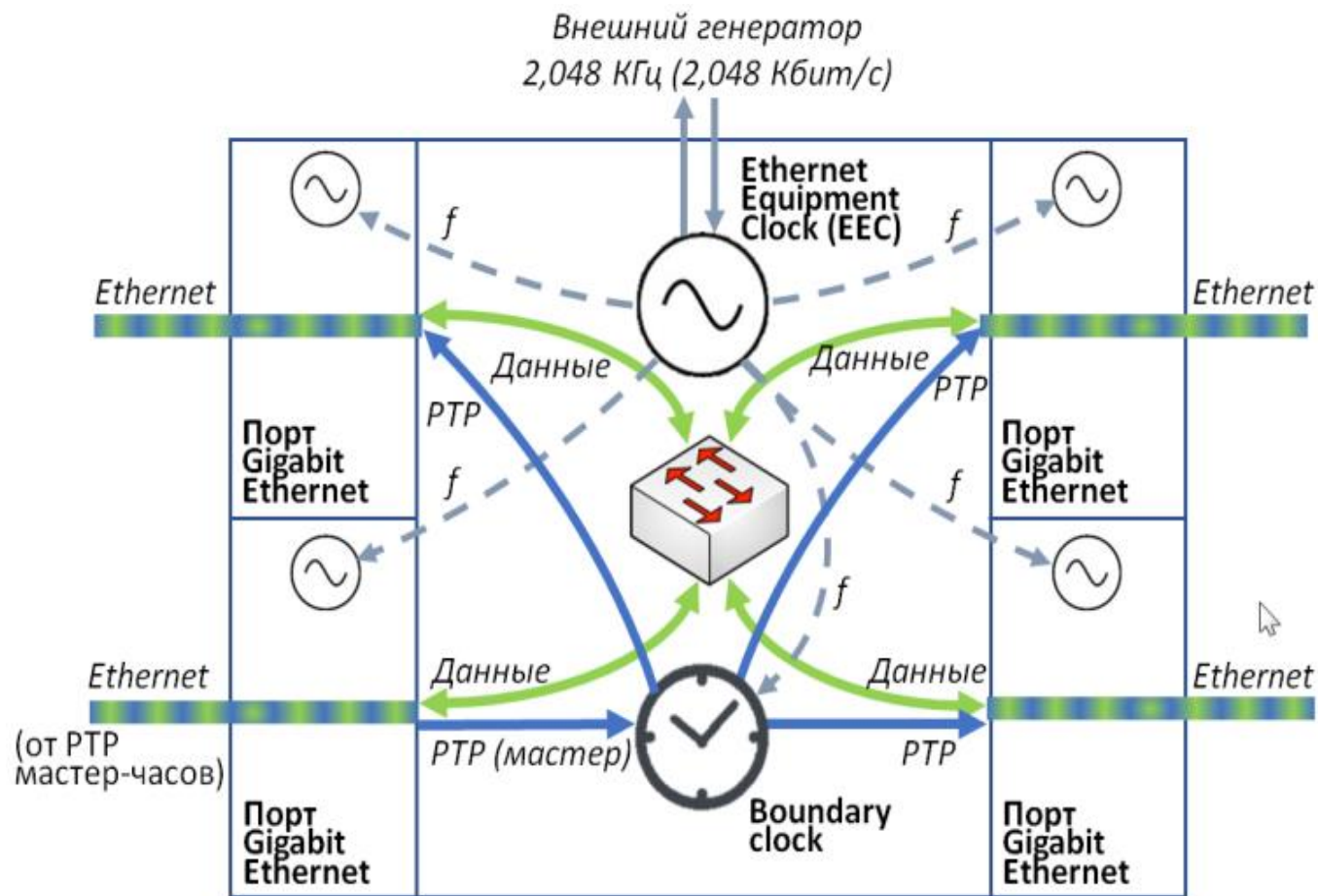
Пример построения комплекса ПЭВЧ (PRTC) для сетей 4G

## Применение ПЭВЧ в системах частотно-временной синхронизации



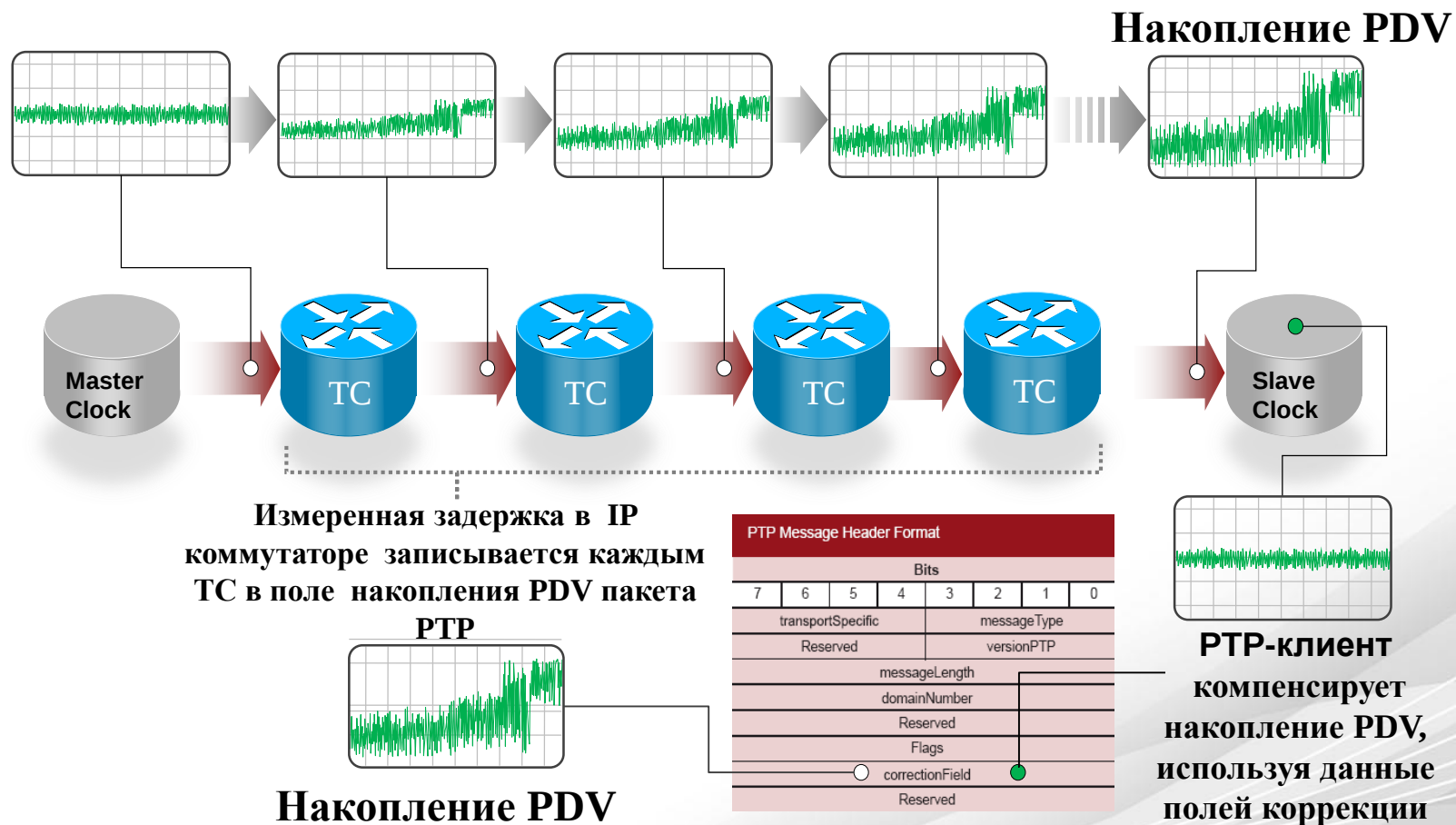
Применение ПЭВЧ (PRTC) согласно рекомендации МСЭ-Т G.8272

## Подсистема синхронизации сетевого элемента с поддержкой PTP и SyncE



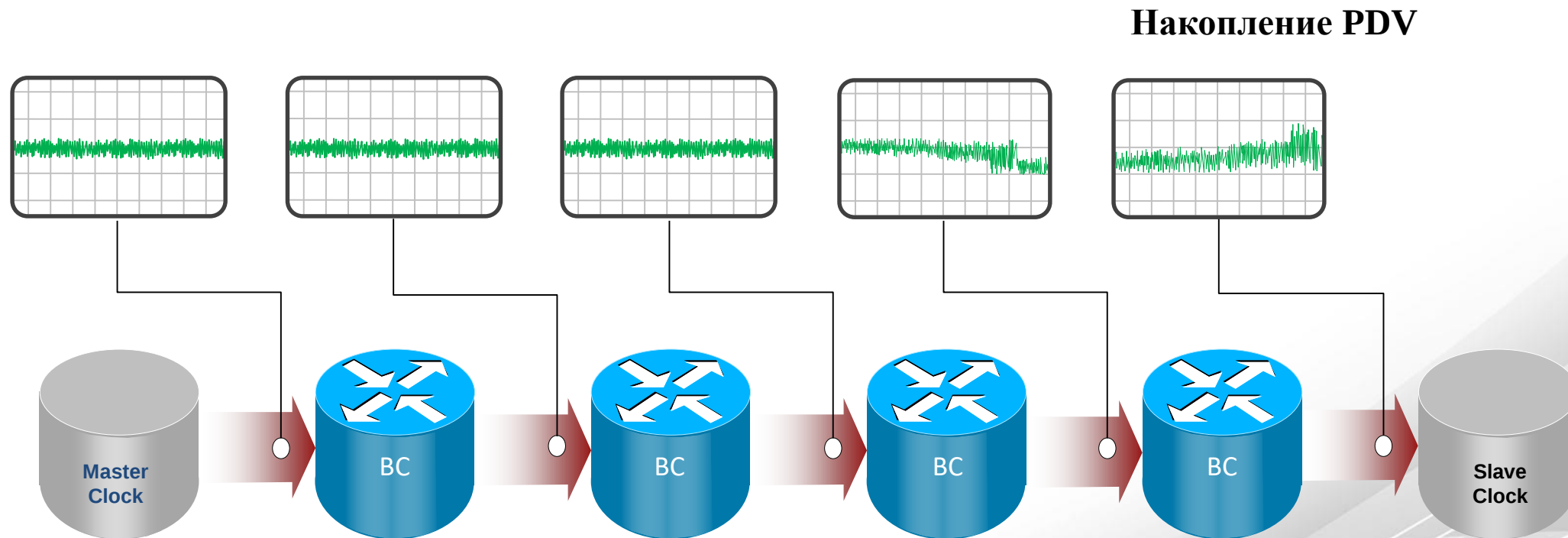
Структурная схема элемента транспортной сети с аппаратной поддержкой протокола PTP v.2 и SyncE

## Применение прозрачных часов (ТС)



**Включение прозрачных часов (ТС)  
с использованием полей коррекции ошибок**

## Применение пограничных часов (BC)



На точность шкалы времени клиента влияет только  
PDV линий связи и ошибки BC

## Сотовые сети 5 поколения

В рамках МСЭ-Т был разработан целый пакет новых рекомендаций. В них сформулированы требования к улучшенным генераторам:

- ✓ улучшенный ПЭГ – уПЭГ (G.811.1: enhanced PRC – ePRC)
- ✓ улучшенный ПЭВЧ – уПЭВЧ (G.8272.1: enhanced PRTC – ePRTC)
- ✓ улучшенный генератор для SyncE – уГСЭ (G.8262.1: enhanced EEC – eEEC)
- ✓ новые классы точности для пограничных часов (BC) – классы C и D (G.8273.2)
- ✓ Новые классы точности для прозрачных часов (TC) – классы B и C (G.8273.3)

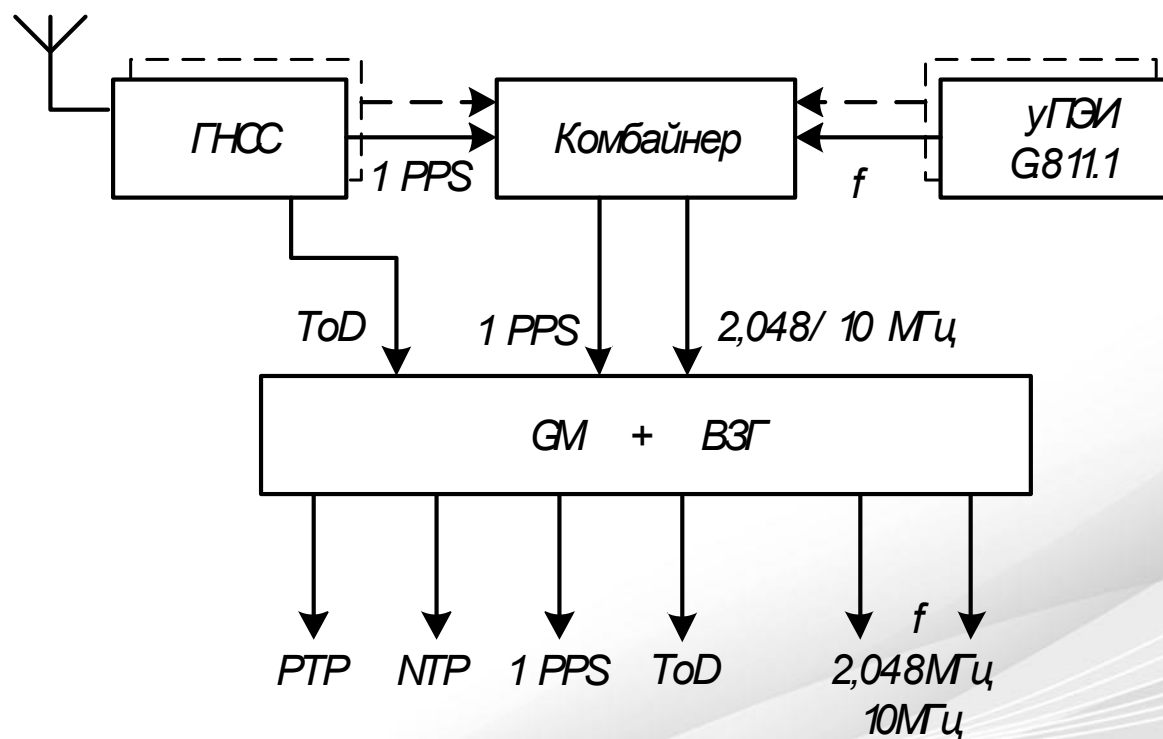
## Сотовые сети 5 поколения

### Основные задачи улучшенных устройств синхронизации:

- ✓ обеспечение более точного номинала частоты на выходах уПЭГ и уПЭВЧ – не хуже  $\pm 1 \times 10^{-12}$
- ✓ более точное формирование шкалы времени на выходах уПЭВЧ - точность фазы лучше  $\pm 30$ нс
- ✓ Снижение фазовых шумов и дрейфа частоты в генераторах сетевых элементов (уГСЭ)
- ✓ уменьшение накопления ошибок передачи шкалы времени в прозрачных (ТС – классы В и С) и пограничных часах (ВС – классы С и D)

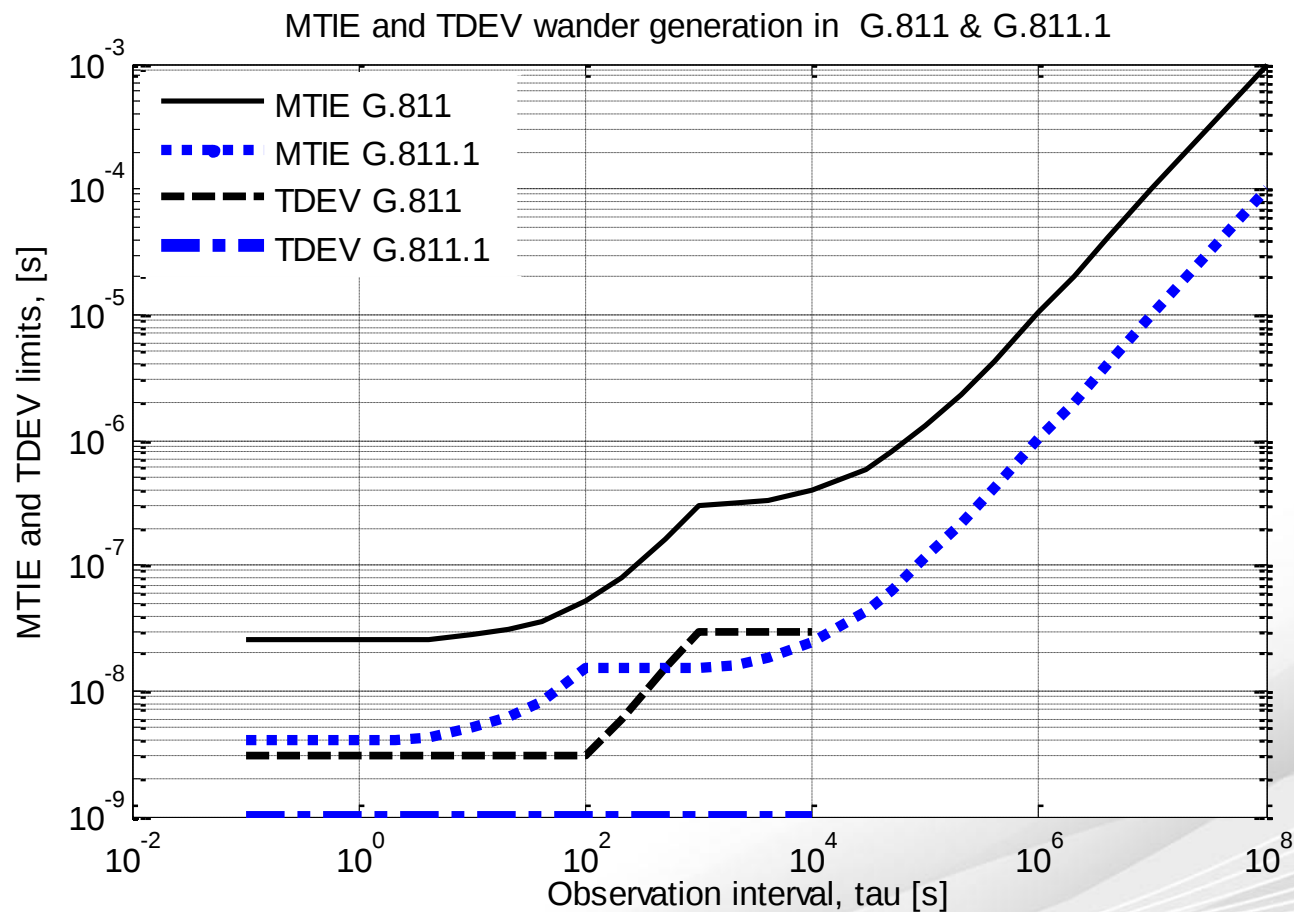
## Структура уПЭВЧ

уПЭВЧ  
G8272.1



Структура уПЭВЧ (ePRTC) согласно рекомендации МСЭ-Т G.8272.1

## Сравнение характеристик ПЭГ для сетей 4 и 5 поколений



Сравнение требований G.811 и G.811.1 к параметрам ПЭГ

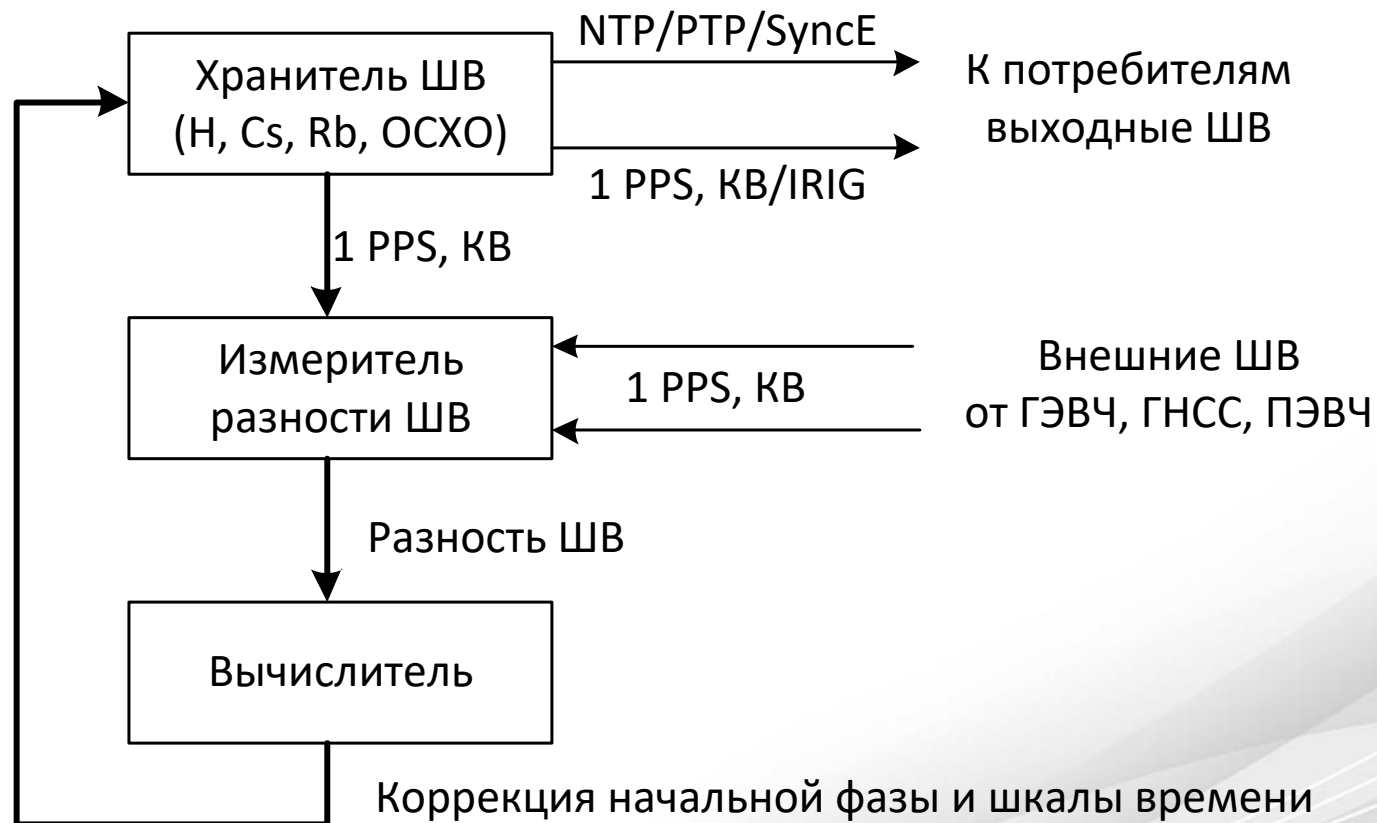
## Рекомендации МСЭ-Т для систем синхронизации пакетных сетей

| Направление стандартизации                      | Частотная синхронизация – серия G.826x |                   | Фазовая (временная) синхронизация – серия G.827x             |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------|
|                                                 | SyncE                                  | PTP               | PTP                                                          |
| Термины и определения, метрики                  | G.8260<br>G.810                        |                   |                                                              |
| Общие принципы (базовая, рамочная рекомендация) | G.8261                                 |                   | G.8271                                                       |
| Сетевые нормы                                   | G.823                                  | G.8261.1          | G.8271.1, G.8271.2                                           |
| Генераторное оборудование                       | G.8262<br>G.8262.1                     | G.8263,<br>G.8266 | G.8272, G.8272.1, G.8273,<br>G.8273.2, G.8273.3,<br>G.8273.4 |
| Архитектура сети синхронизации                  | G.8264                                 | G.8265            | G.8275                                                       |
| Профили протокола PTP                           | –                                      | G.8265.1          | G.8275.1, G.8275.2                                           |

## Ведущие часы на базе хранителей шкалы времени

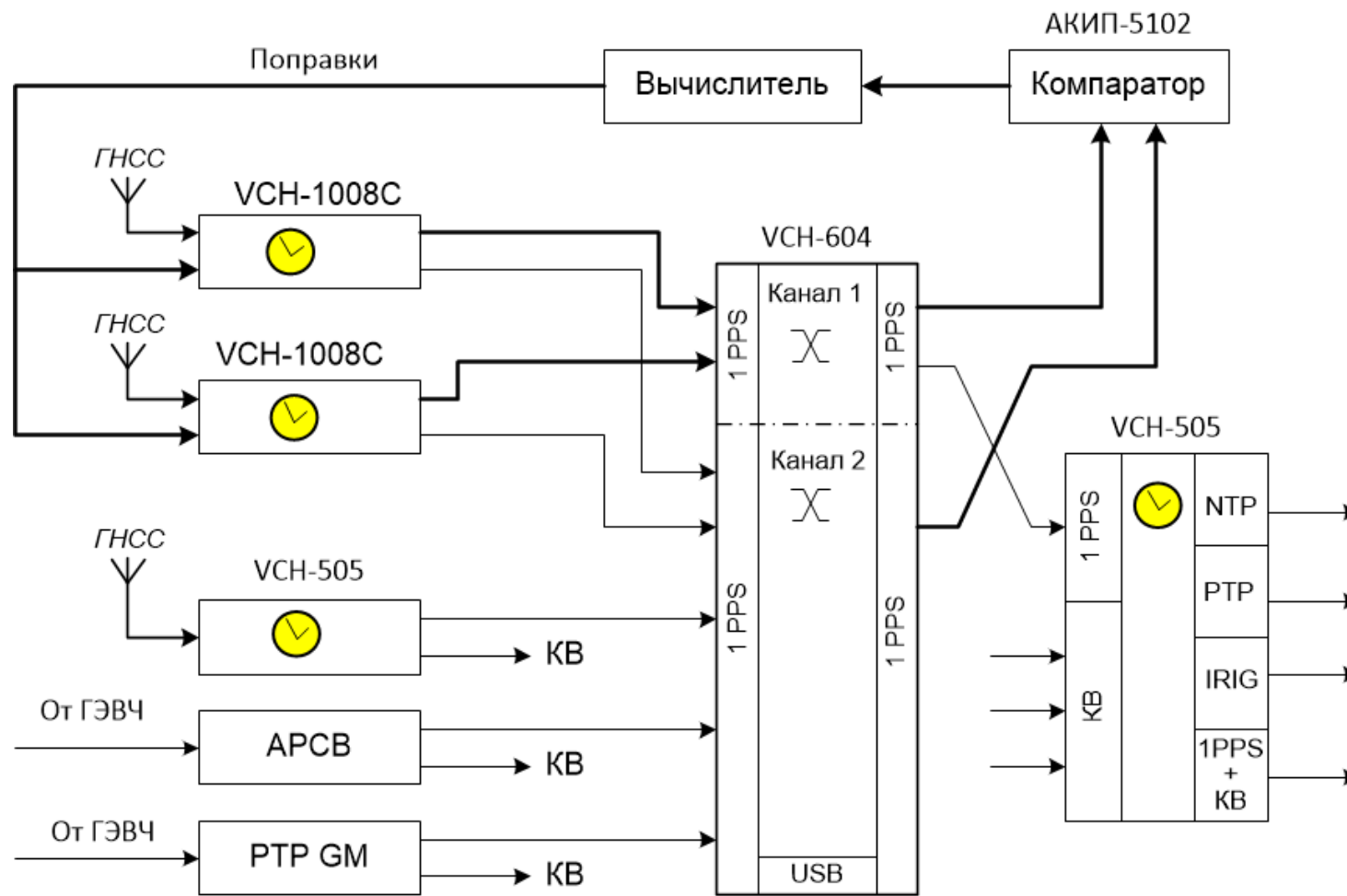
- APNT – Assured Position, Navigation and Timing: системы, в которых формирование шкалы времени осуществляется рабочим эталоном с периодической подстройкой или коррекцией по принятым данным об эталонной шкале времени
- Если наблюдается существенная разница между рабочей и принятой шкалой, то принятая шкала подлежит отбраковке (запрещению) для коррекции рабочей шкалы
- Дополнением к этой структуре может и должна служить система обнаружения помехи типа spoofing

## Ведущие часы на базе хранителей шкалы времени



Формирование шкалы времени ведущих часов на базе технологии APNT

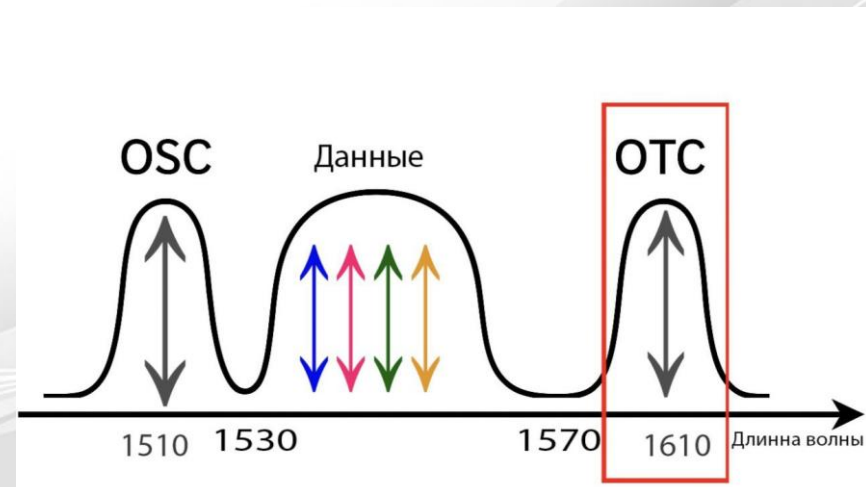
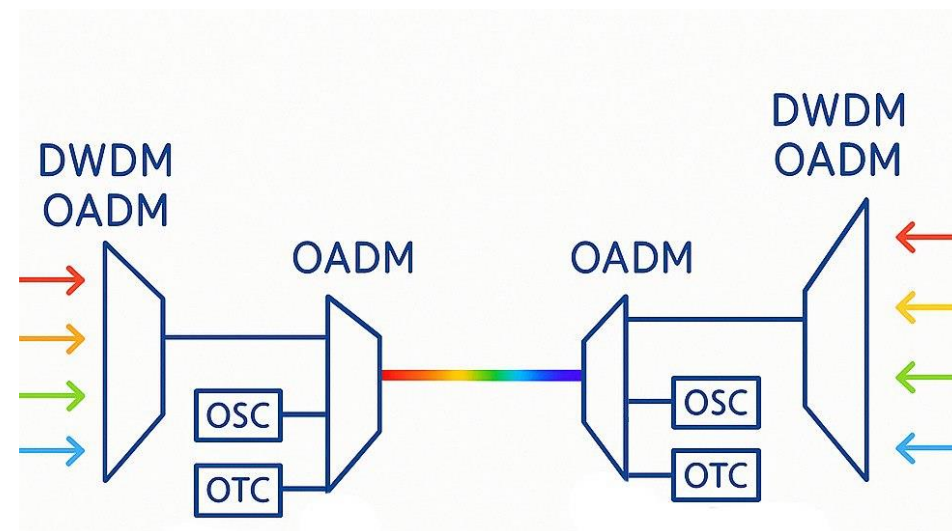
## Ведущие часы на базе хранителей шкалы времени



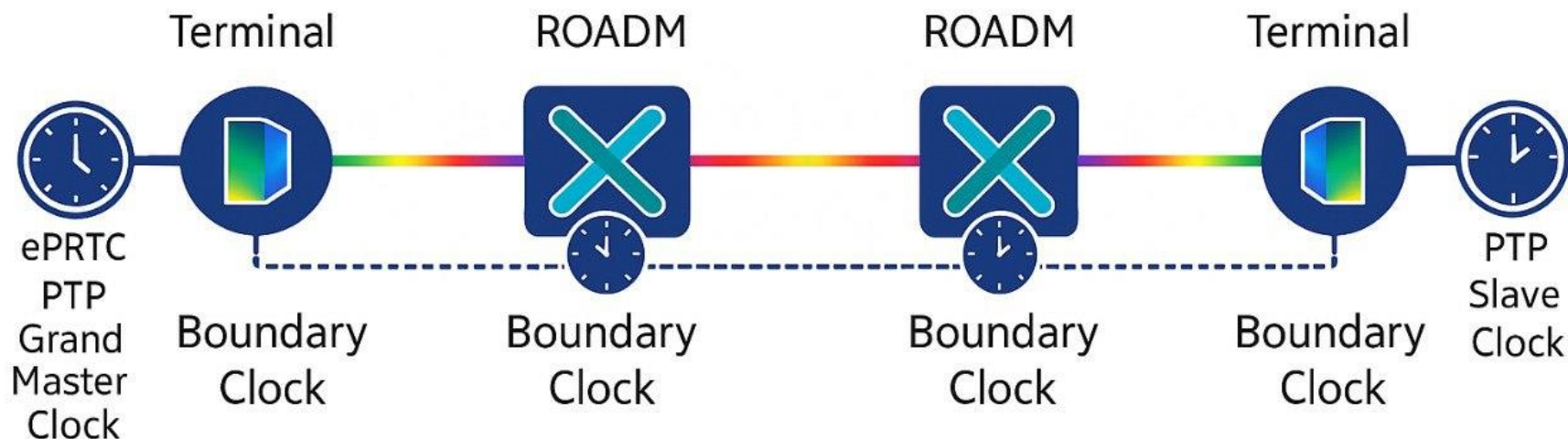
Реализация ведущих часов на базе технологии APNT

## Оптический временной канал (ОТС) в DWDM

- ✓ Выделяется отдельный оптический канал на своей длине волны для передачи синхронизации
- ✓ Работает подобно каналу управления OSC (Optical Supervisory Channel)
- ✓ Удобно использовать двунаправленный режим передачи с использованием bidirectional SFP модулей (упрощает реализацию компенсации асимметрии).



## Оптический временной канал (ОТС) в DWDM



- ✓ Минимальные и предсказуемые задержки
- ✓ Независимость от клиентского трафика
- ✓ В ОТС для передачи синхронизации используется протокол РТР (IEEE 1588)
- ✓ Для передачи и вывода синхросигналов на транзитных узлах должна быть реализована функциональность Boundary Clock

## Оптический временной канал (ОТС) в DWDM

- Устойчивость к помехам и атакам: ОТС не использует радиочастотный эфир, что исключает угрозы глушения (jamming) и подмены сигнала (spoofing), характерные для ГНСС.
- Интеграция в существующую оптическую инфраструктуру: ОТС работает поверх существующих DWDM-линий с использованием отдельной длины волны, не влияя на клиентские каналы.
- Гибкость развёртывания: временной канал может быть организован для синхронизации удалённых или труднодоступных узлов, в том числе в местах, где невозможен приём сигнала от ГНСС.
- Прогнозируемость параметров: известные и управляемые задержки по оптическому каналу позволяют точно рассчитать временной бюджет и заранее определить погрешность передачи времени.
- Совместимость с PTP: ОТС интегрируется в архитектуру IEEE 1588



## Протоколы White Rabbit и PTP версии 2.1



- Протокол White Rabbit — это расширение протокола PTP, разработанное в CERN, для синхронизации измерительного оборудования с субнаносекундной точностью
  - ✓ Выравнивание частоты (SyncE)
  - ✓ Грубая подстройка фазы (PTP версии 2.1)
  - ✓ Точная подстройка фазы (Digital Dual Mixer Time Difference).
  - ✓ Автоматическое фазовое выравнивание на физическом уровне (DDMTD)
  - ✓ Типовая точность: до ~50 ps\*

\*- при калиброванной оптической линии связи, высококачественных калиброванных Bi-directional SFP-трансиверах и стабильной температуре

## Протоколы White Rabbit и PTP версии 2.1

- Основные новые возможности:
  - ✓ Мульти доменная структура (несколько временных доменов параллельно)
  - ✓ Асимметрия (стандартизованные средства описания/учёта асимметрии канала);
  - ✓ Диагностика/мониторинг (расширенные наборы данных, служебные TLV,
  - ✓ отчётность по качеству времени/задержкам);
  - ✓ Гибридные архитектуры (сосуществование разных профилей/классов устройств и доменов);
  - ✓ Безопасность (усиленное внимание к целостности/аутентичности временных
  - ✓ сообщений — на уровне рекомендаций и TLV).
  
- **PTP v2.1 совместим с PTP v2.0** (Эволюционный и постепенный переход)

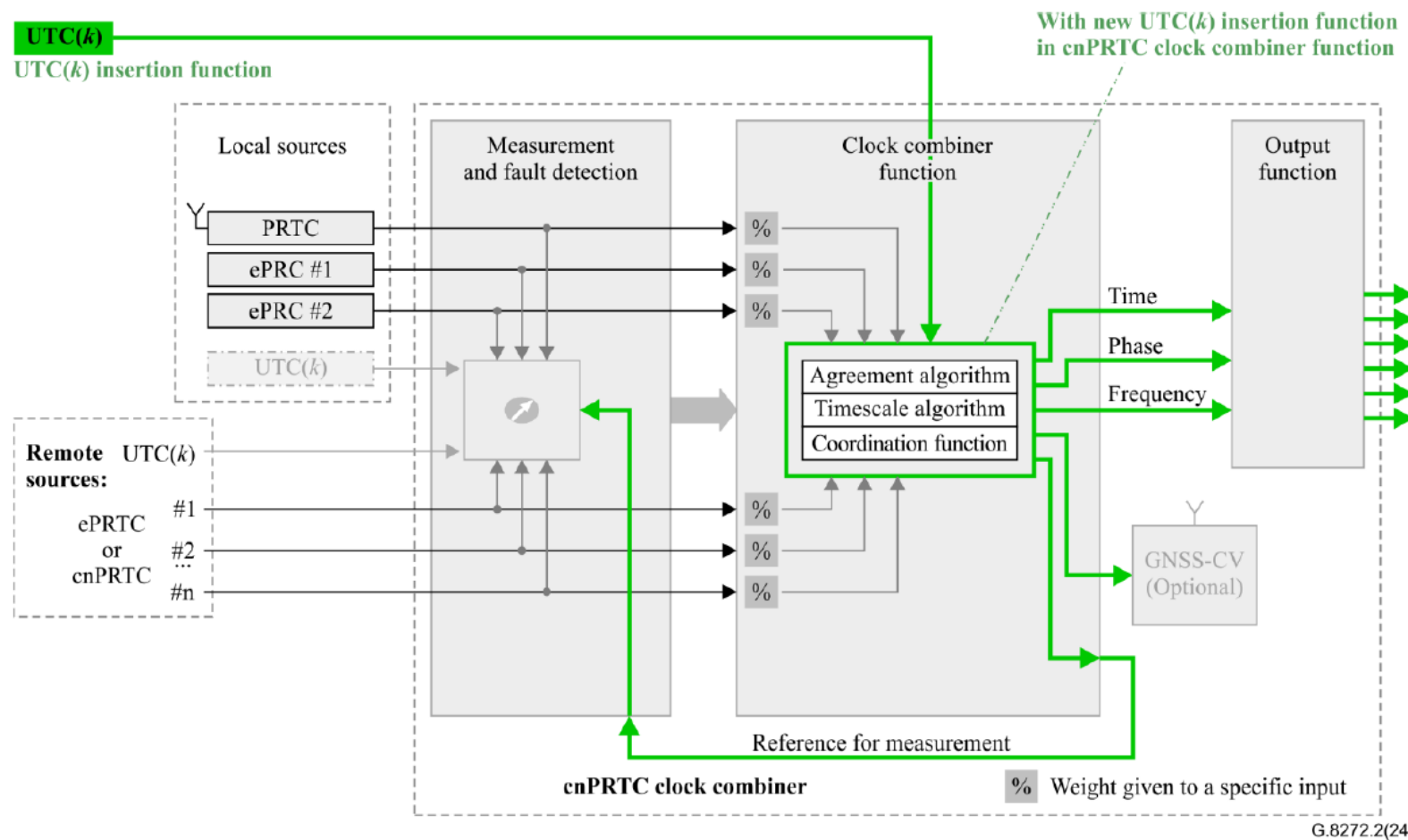
## Технологии синхронизации шкалы времени

| Уровень взаимодействия   | Технология                                   | TE (Time Error) |
|--------------------------|----------------------------------------------|-----------------|
| Layer 3/4                | Маршрутизация (PTP G.8275.2, NTP)            | мс/мкс          |
| Layer 3 (поток E1 в СЦИ) | APCB                                         | <мкс            |
| Layer 2                  | Коммутация (PTP G.8275.1)                    | мкс             |
| Layer 2                  | OTN (in band transmission)                   | мкс/нс          |
| Layer 1                  | WDM (PTP via OTC)                            | нс              |
| Layer 2                  | Темное волокно (White Rabbit CERN, PTP v2.1) | нс/< нс         |
| Layer 1                  | Использование оптических модемов             | < нс            |

## Перспективная когерентная система синхронизации

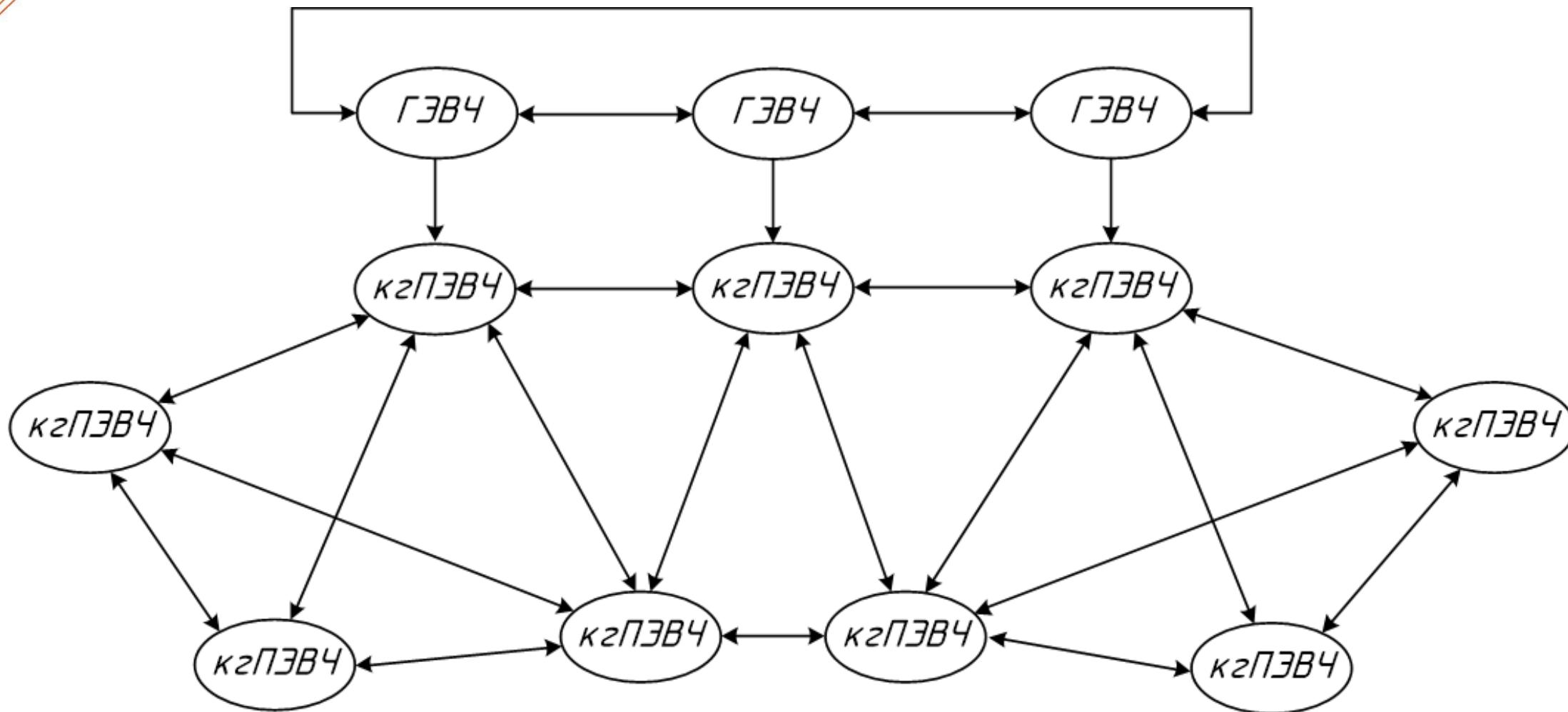
- В Приложениях 7 и 10 рекомендации МСЭ-Т G.8275 описана система когерентных ПЭВЧ – кгПЭВЧ (coherent PRTC – cnPRTC);
- Описание кгПЭВЧ дано в новой рекомендации МСЭ-Т - G.8272.2
- кгПЭВЧ предполагают совместное, когерентное взаимодействие между собой;
- Все связанные между собой кгПЭВЧ вырабатывают усреднённую групповую шкалу времени, включая групповую частоту;
- В этой системе будут участвовать национальные эталоны частоты и времени – UTC(k)
- Для связи между кгПЭВЧ или между UTC(k) и кгПЭВЧ применяется протокол RTP v2.1 (IEEE1588-2019)

## Перспективная когерентная система синхронизации



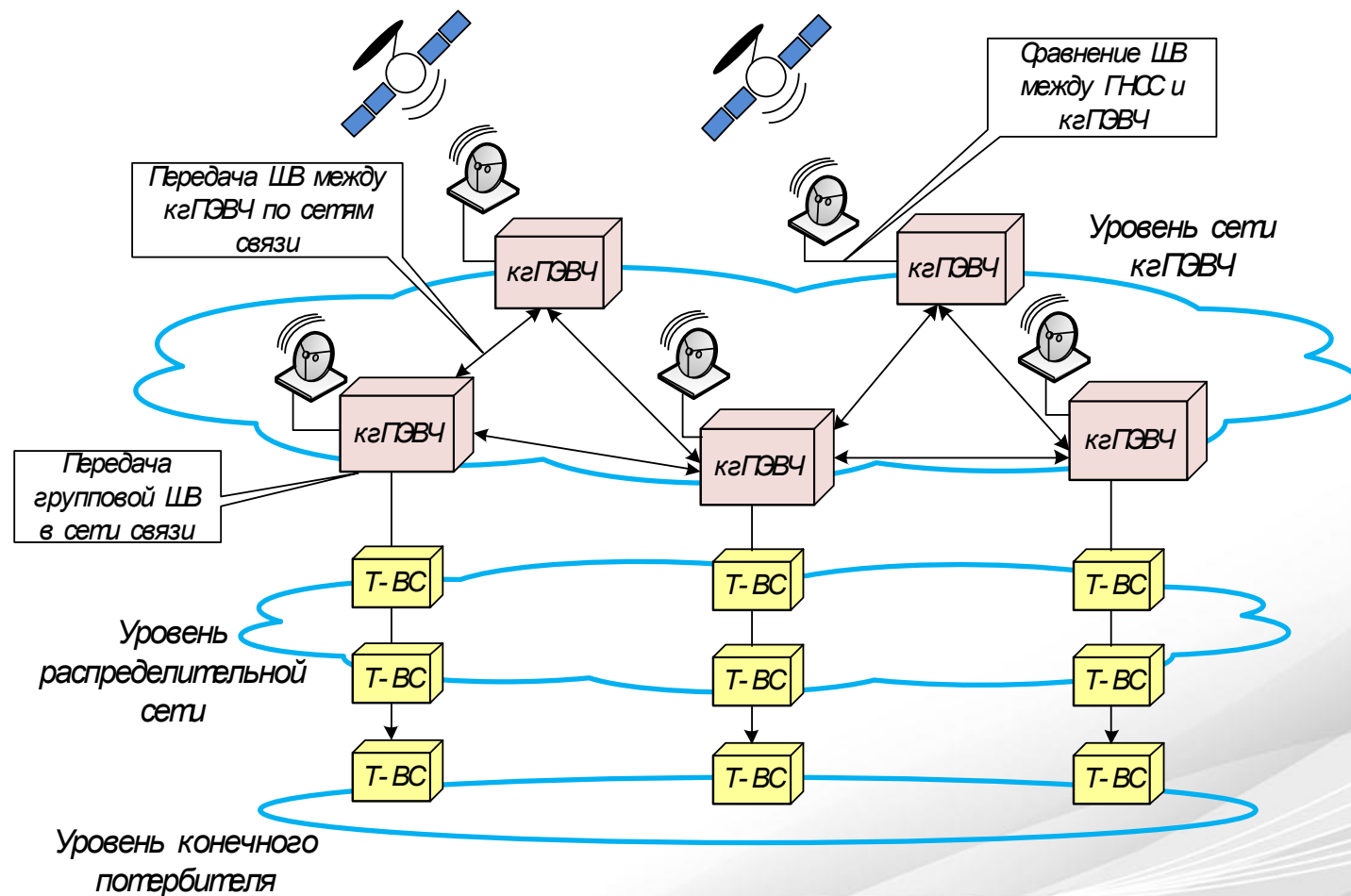
Модифицированная функциональная блок-схема кгПЭВЧ (Приложение А рек. МСЭ-Т G.8272)

## Перспективная когерентная система синхронизации



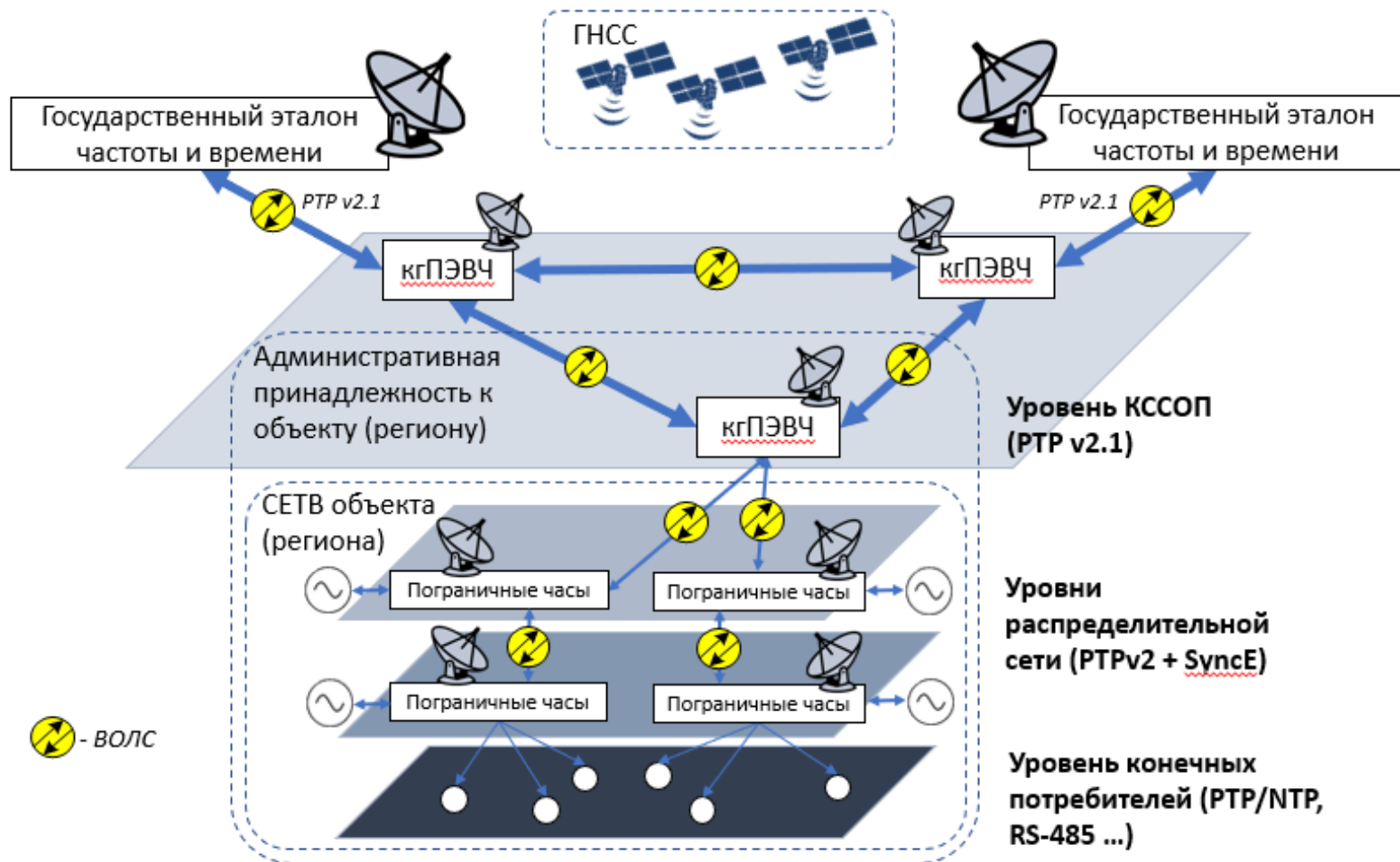
Структура когерентной сети (Приложение А рек. МСЭ-Т G.8272)

## Перспективная когерентная система синхронизации



## Структура когерентной ССОП

## Перспективная когерентная система синхронизации



## Структура когерентной ССОП