



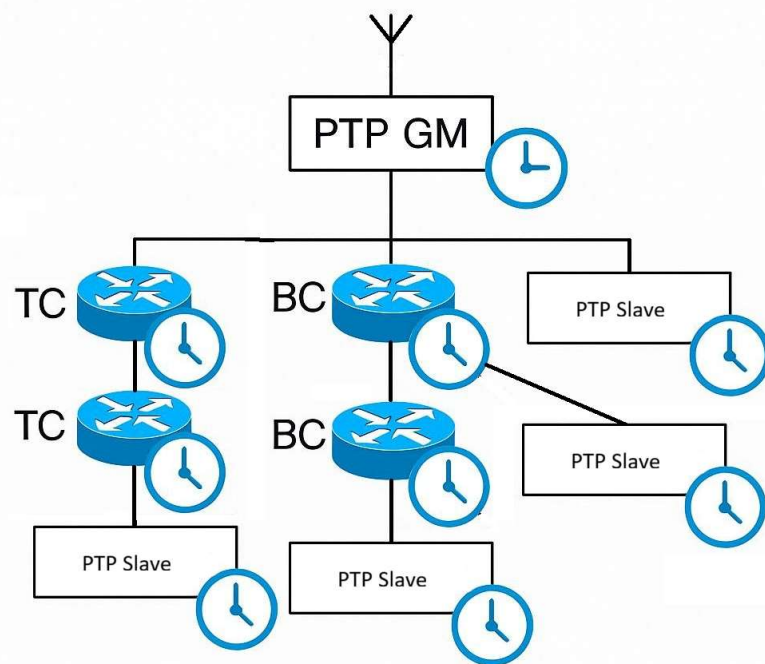
Научно-практический семинар
**Решения АО «Время-Ч» в задачах
синхронизации в пакетных сетях**

Современные технические требования к РТР-устройствам. Развитие протокола РТР по стандарту White Rabbit

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

20–22 октября 2026 года, г. Нижний Новгород

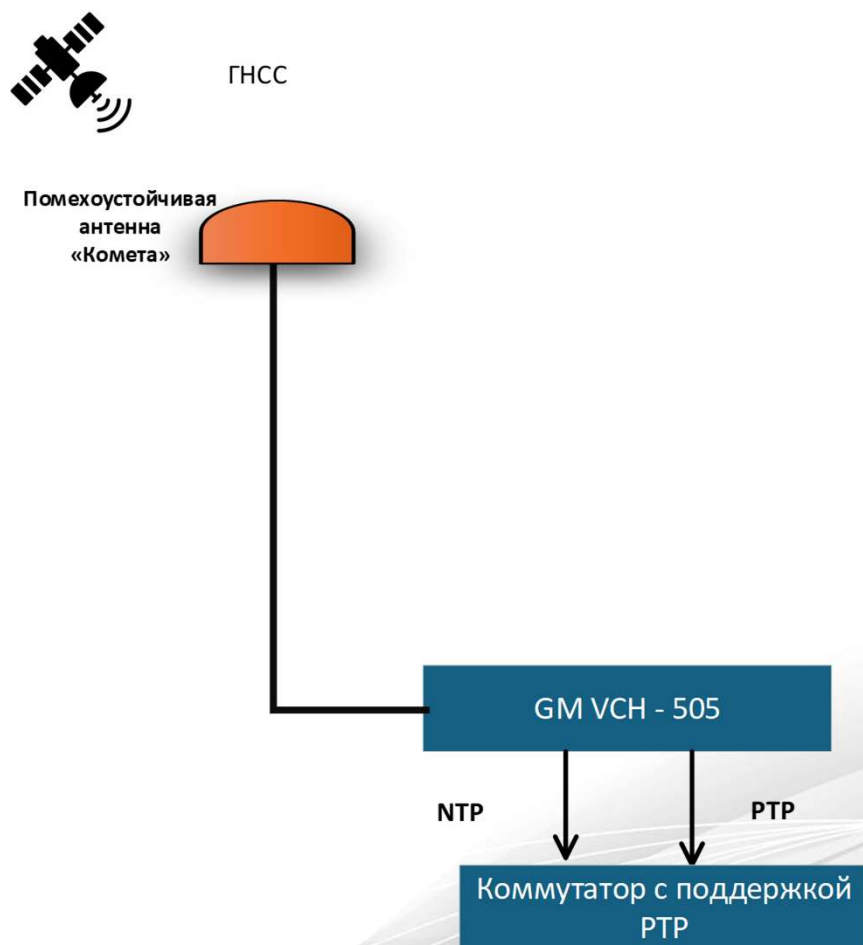
PTP устройства в пакетной сети



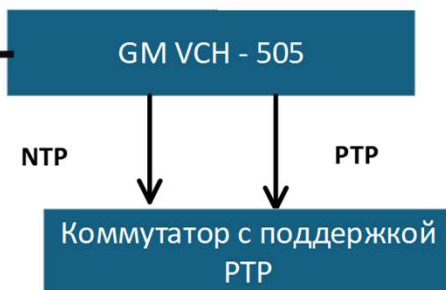
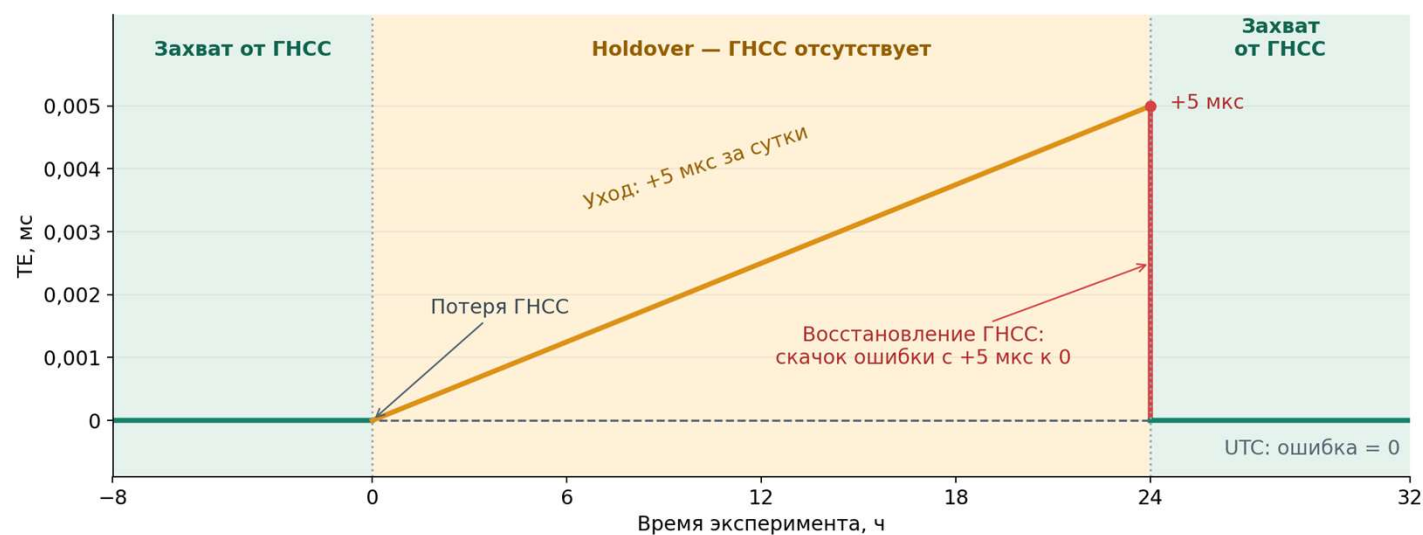
РТР GM с многоканальным приемником ГНСС

Система	Страна	Покрытие	Диапазоны
GPS	США	Глобальное	L1, L2, L5
GLONASS	Россия	Глобальное	L1, L2, L3
BeiDou/BDS	Китай	Глобальное	B1, B2, B3
Galileo	Европейский союз	Глобальное	E1, E5, E6
QZSS	Япония	Региональное — Япония и прилегающая территория	L1, L2, L5, L6
IRNSS	Индия	Региональное — Индия и прилегающая территория	L1, L5

РТР GM с приемником ГНСС и помехоустойчивых антенн на основе технологии цифровых антенных решеток



PTP GM с приемником ГНСС в режиме Holdover



РТР GM с приемником ГНСС и высокостабильной частотной опорой



ГНСС



Водородный стандарт
частоты
VCH-1008C

10MHz

CLK-IN

1 pps

PPS-IN

GM VCH - 505

NTP

PTP

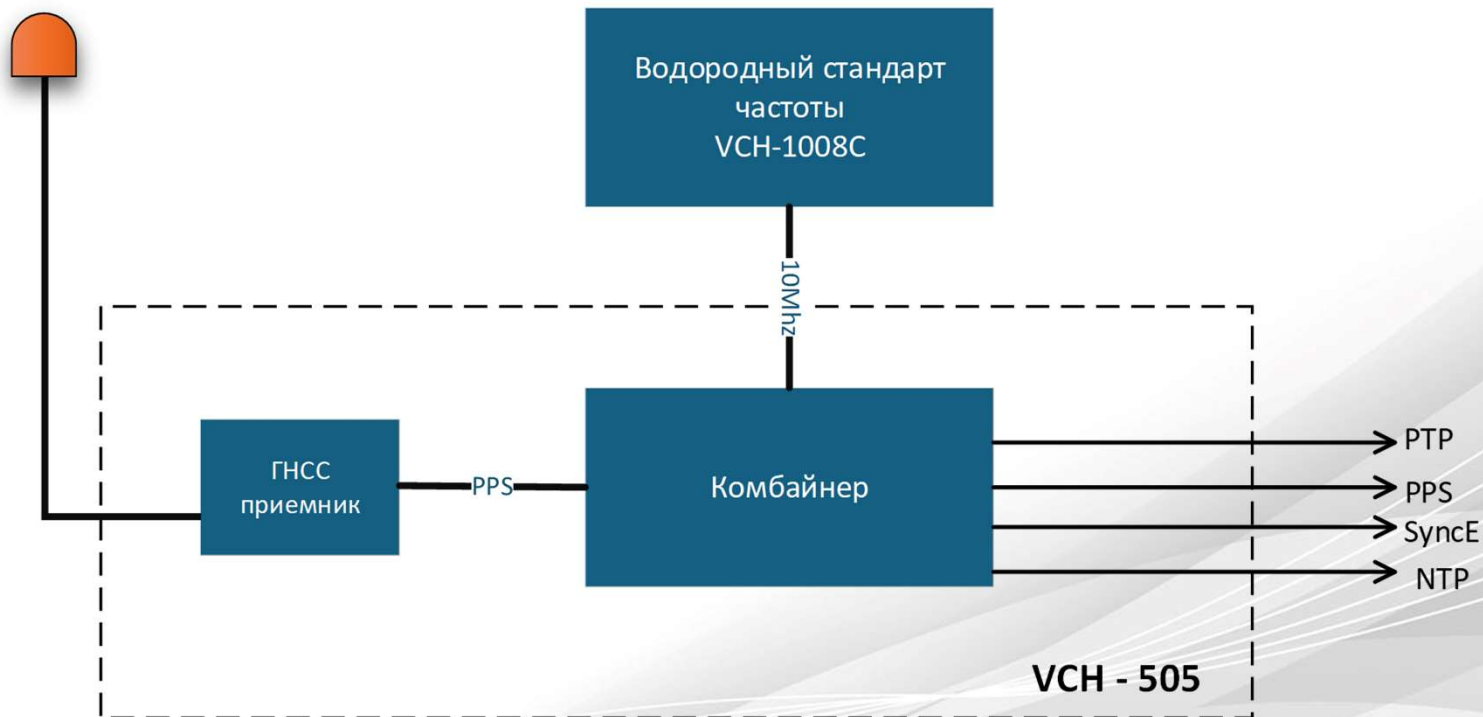
Коммутатор с поддержкой
РТР

- PRTC (G.8272)
- ePRTC (G.8272.1)

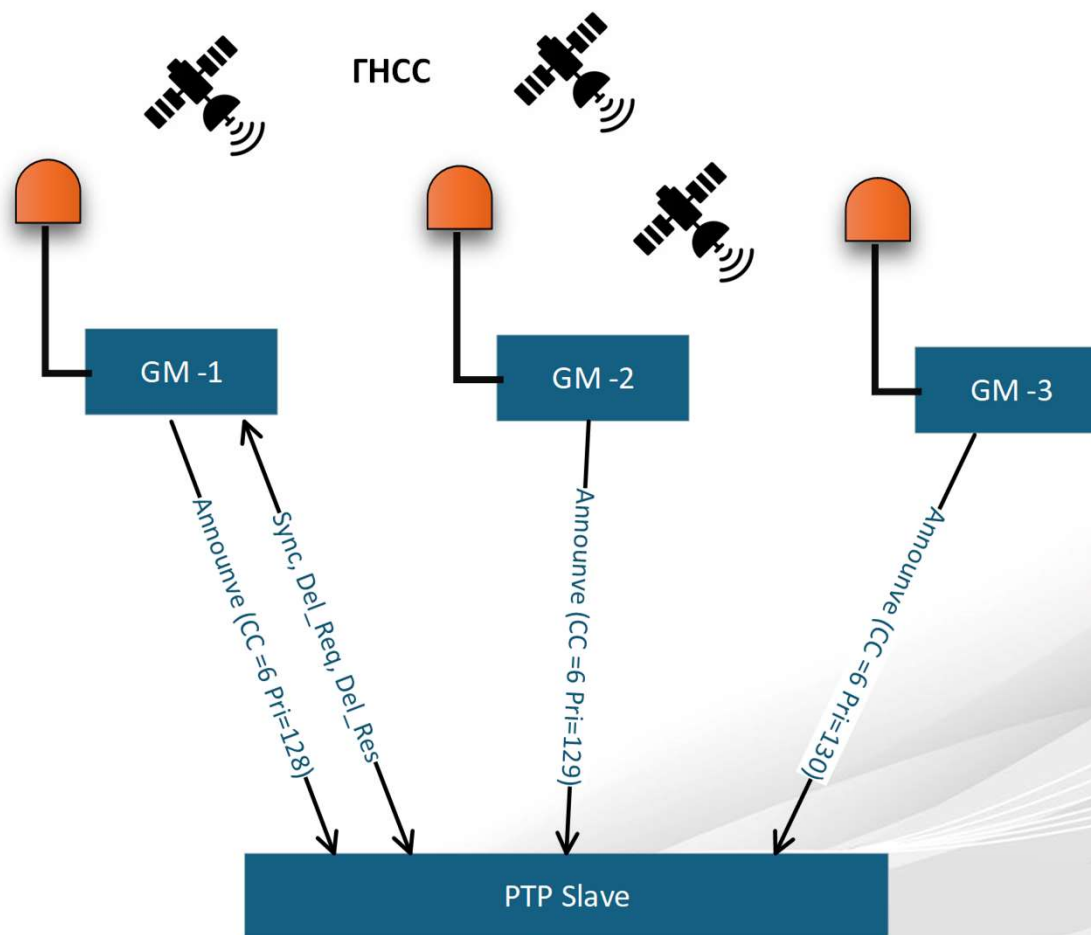
ePRTC (G.8272.1) Комбайнер частоты и времени



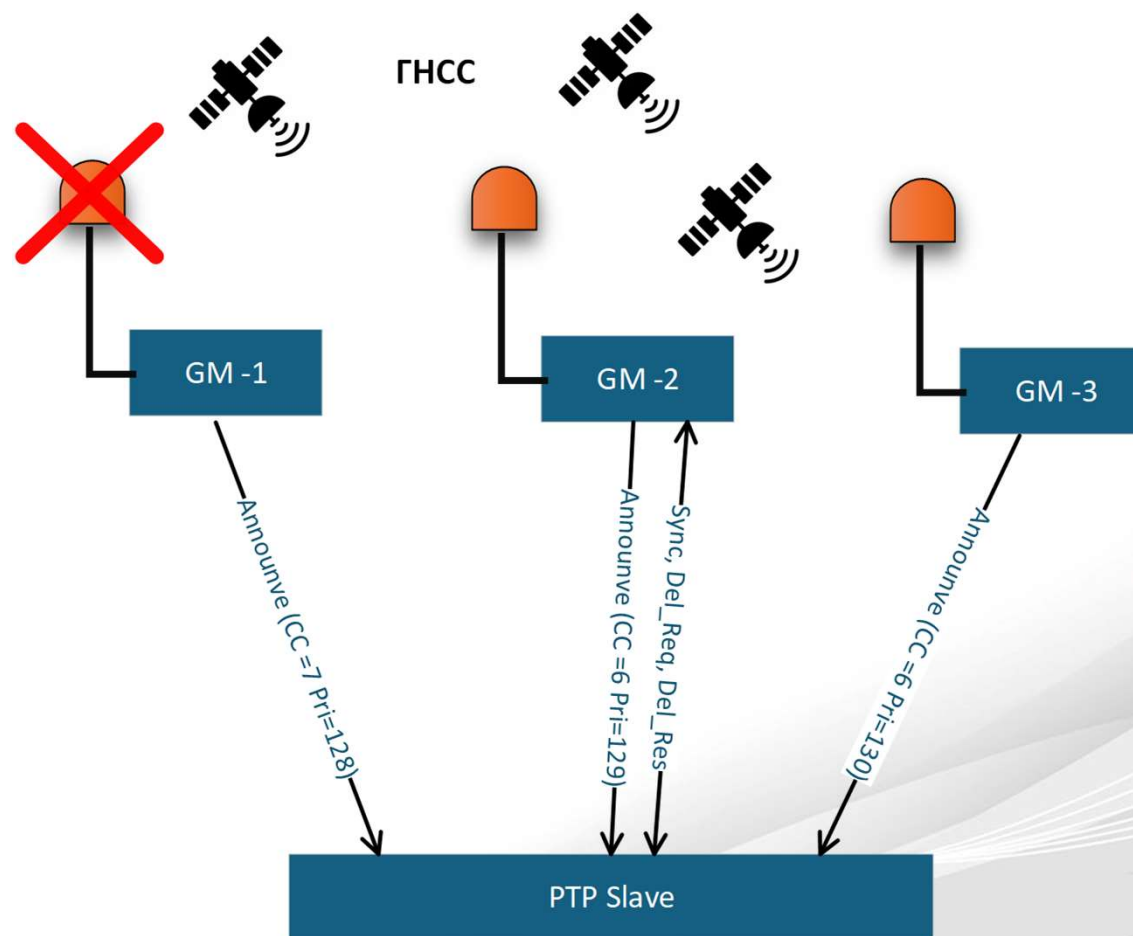
ГНСС
L1, L2



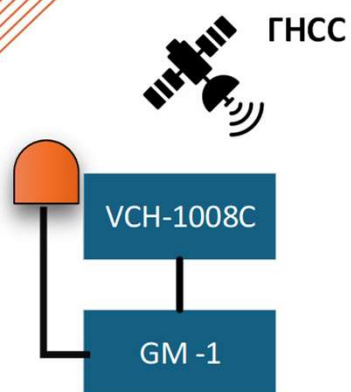
Best Master Clock Algorithm (BMCA) протокола PTP v2



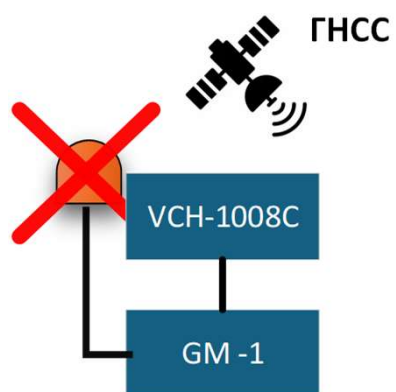
Уязвимости алгоритма Best Master Clock Algorithm (BMCA) протокола PTP v2



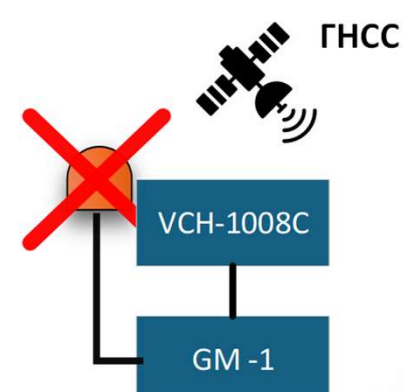
Изменение ClockClass



CC=6
frequencyTraceable flag =TRUE
timeTraceable flag = TRUE

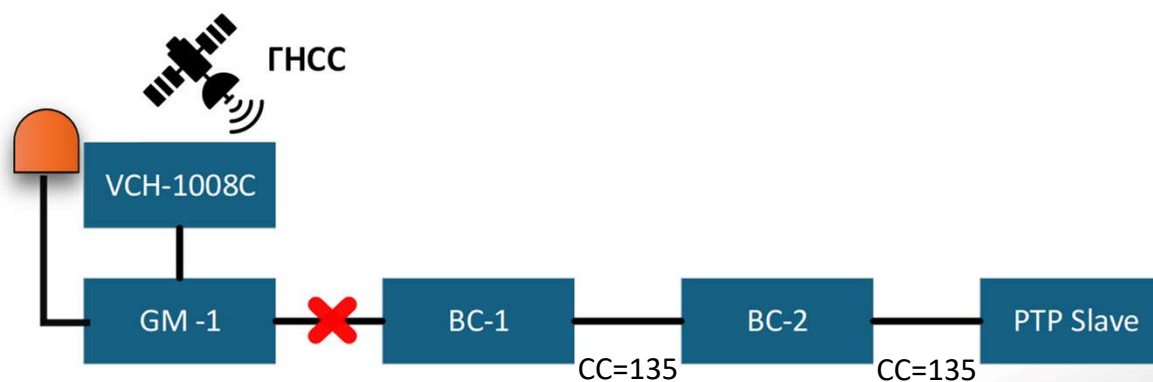


CC=7
frequencyTraceable flag =TRUE
timeTraceable flag = TRUE



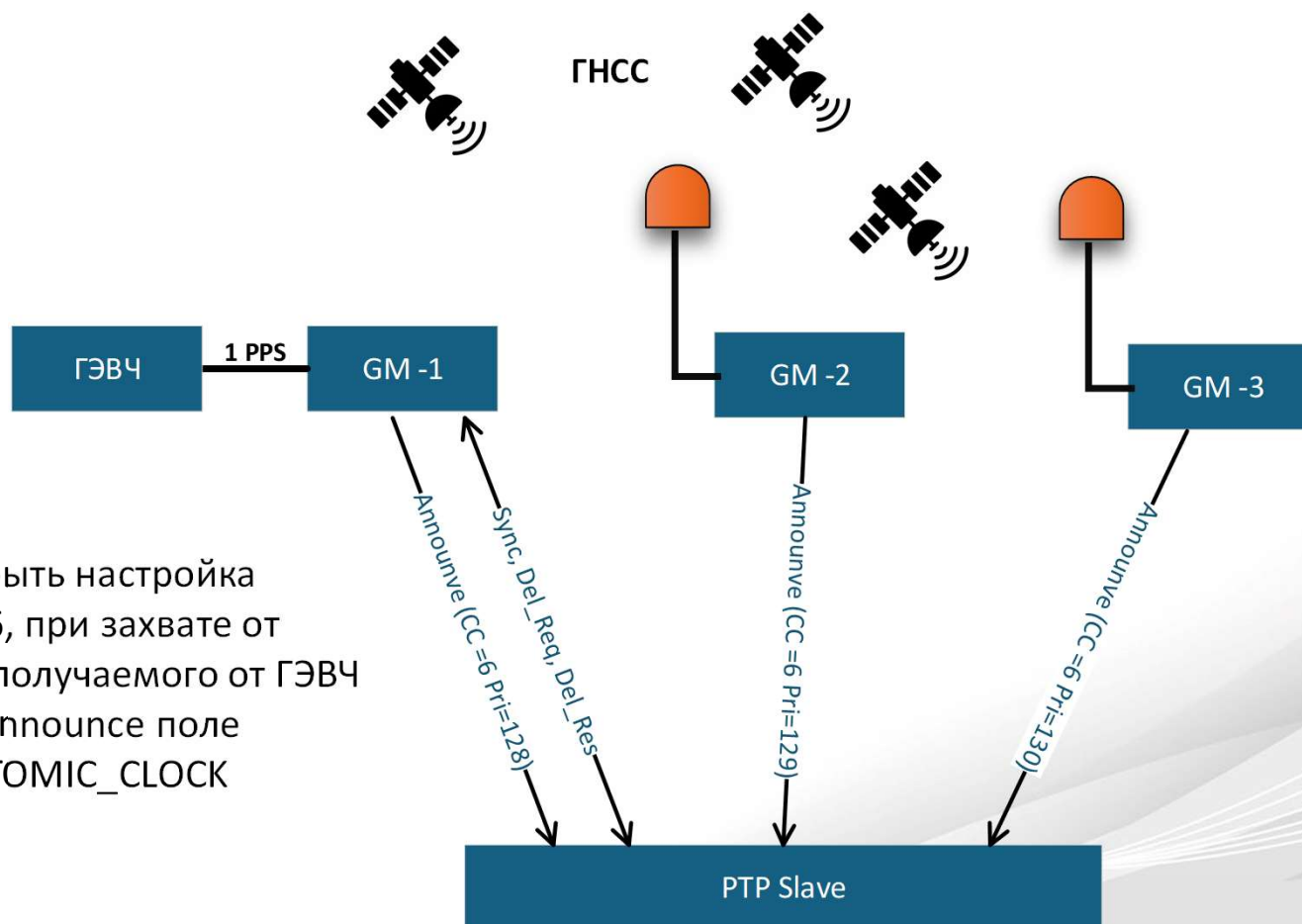
CC=140
frequencyTraceable flag =TRUE
timeTraceable flag = FALSE

Изменение ClockClass



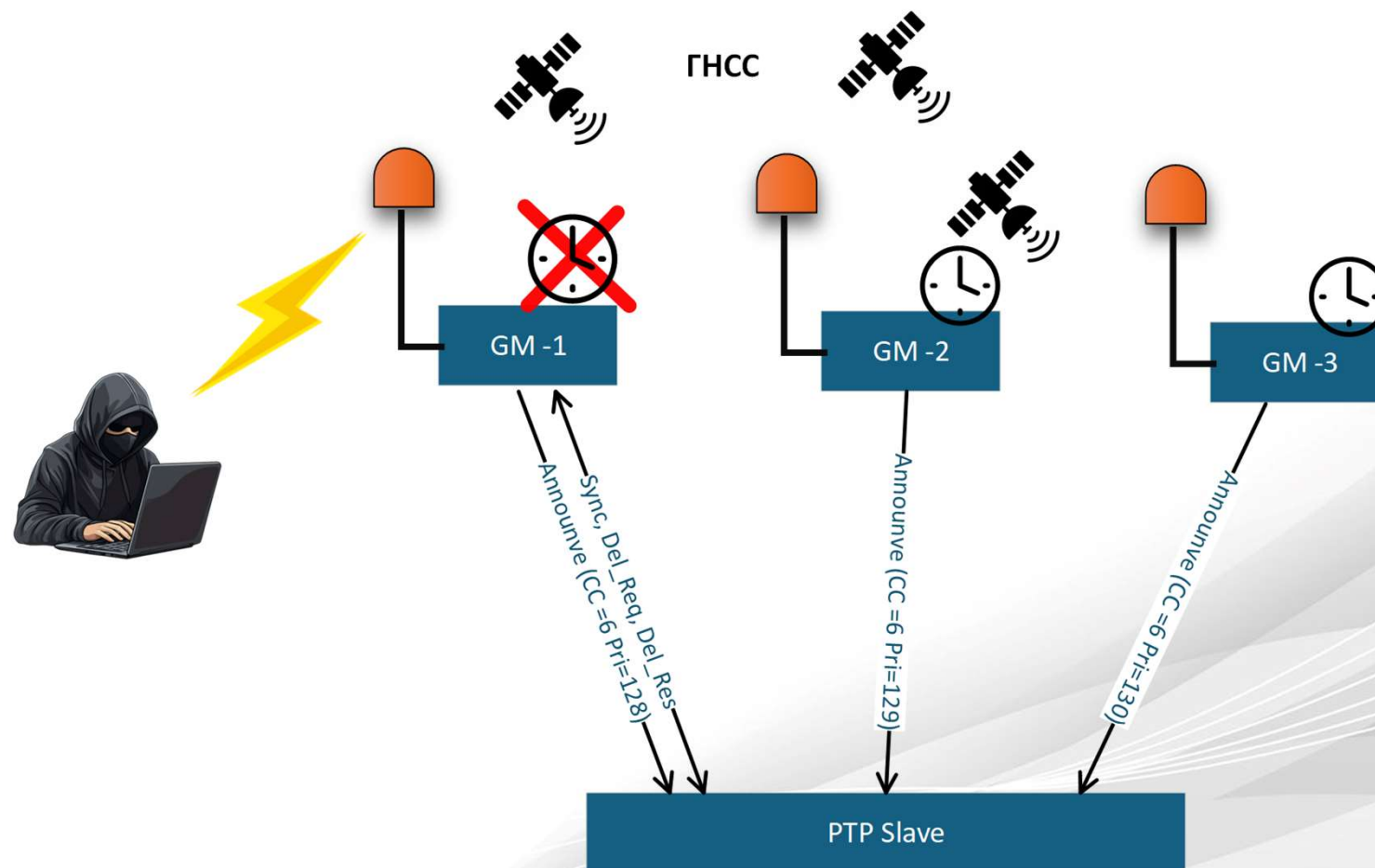
PTP Slave должна быть настройка «Ожидаемый ClockClass»

Подключение к Государственному Эталону Времени и Частоты

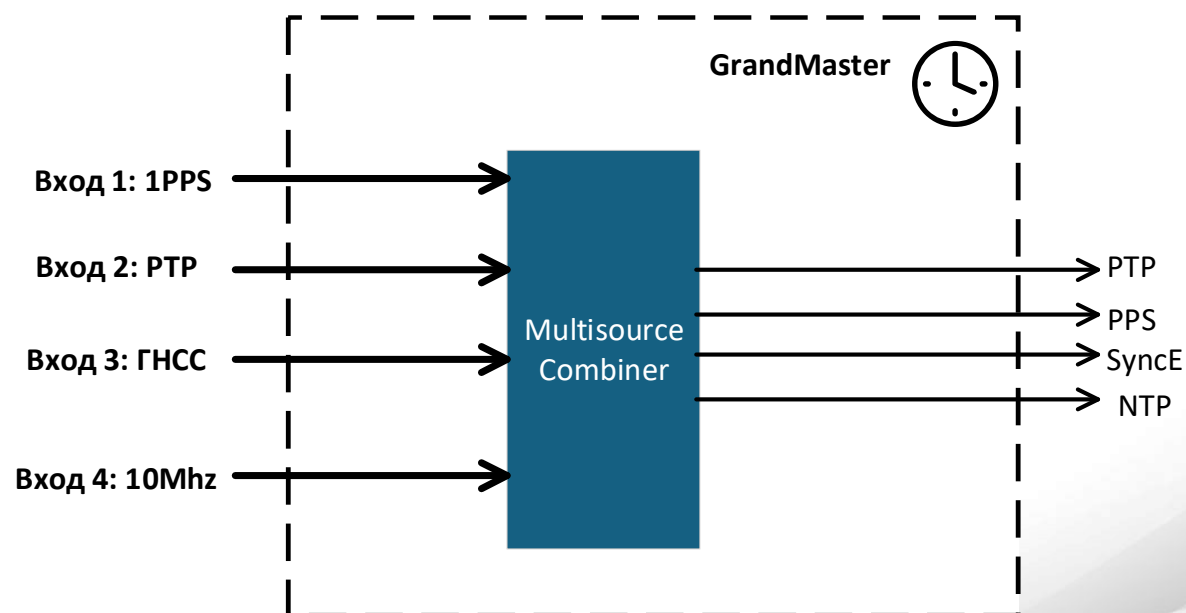


GM-1 должна быть настройка выставить CC=6, при захвате от сигнала 1 PPS, получаемого от ГЭВЧ
В сообщении Announce поле timeSource = ATOMIC_CLOCK

Уязвимости алгоритма Best Master Clock Algorithm (BMCA) протокола PTP v2



GM с функцией Multisource Combiner

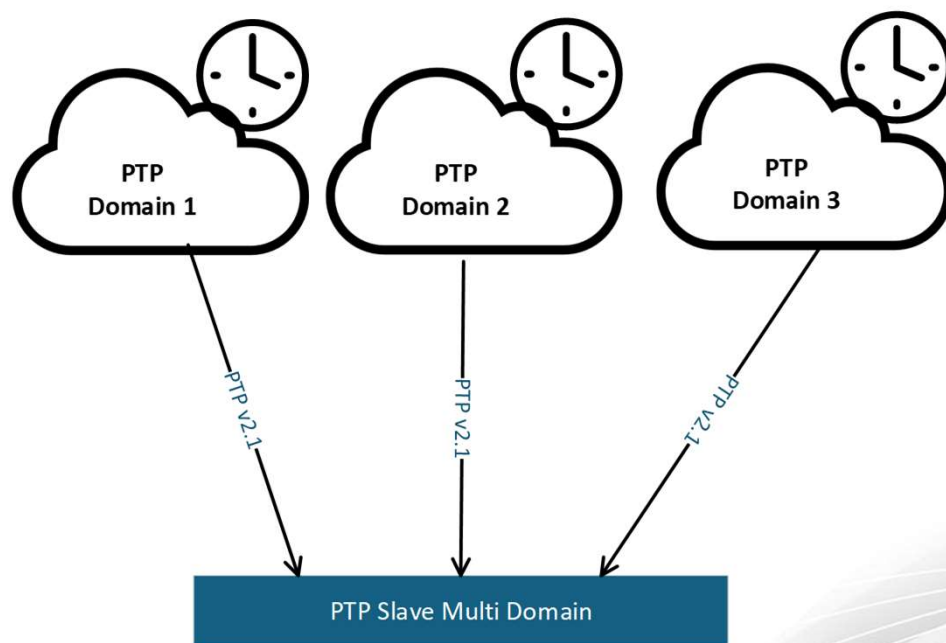


В Multisource Combiner могут назначаться веса для каждого входа для формирования групповой шкалы

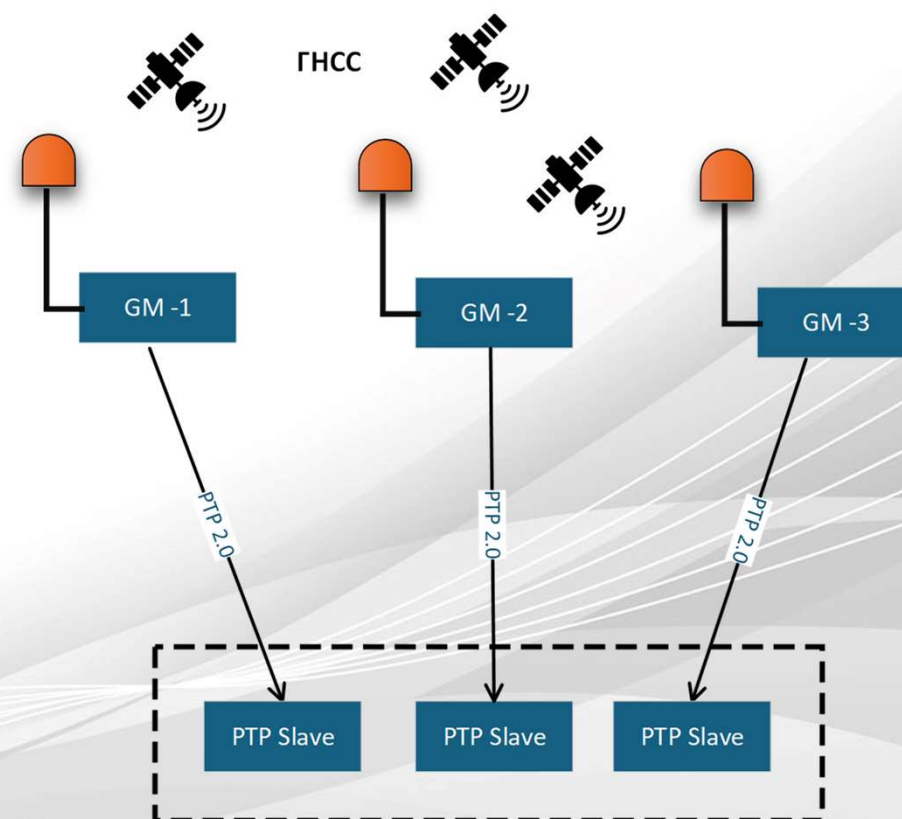
Multisource Combiner делает анализ и отбраковку входов

PTP Slave с функцией анализа и отбраковки входов

PTP v 2.1

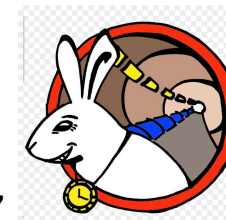


PTP v 2.0



Развитие протокола PTP по стандарту White Rabbit

White Rabbit (WR) — это технология сверхточной синхронизации времени и частоты, разработанная в CERN (Европейской организации ядерных исследований).



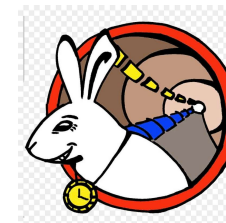
Сферы применения:

- Крупные научные установки;
- Метрология, национальные метрологические институты, распределение эталонной шкалы времени и высокоточные измерения;
- Распределенные измерительные системы - синхронизация географически разнесённых датчиков и измерительных комплексов.

Технология объединяет три основных механизма:

- 1.PTP (IEEE 1588) — передача шкалы времени и измерение задержки.
- 2.SyncE (Synchronous Ethernet) — синтонизация частоты между устройствами.
- 3.DDMTD (Digital Dual Mixer Time Difference) — высокоточное измерение фазового сдвига, позволяющее выполнять фазовое выравнивание с пикосекундным разрешением.

Физическая модель White Rabbit



Для Master $\rightarrow$ Slave: $d_{MS} = \Delta_{TXM} + \delta_{MS} + \Delta_{RXS}$

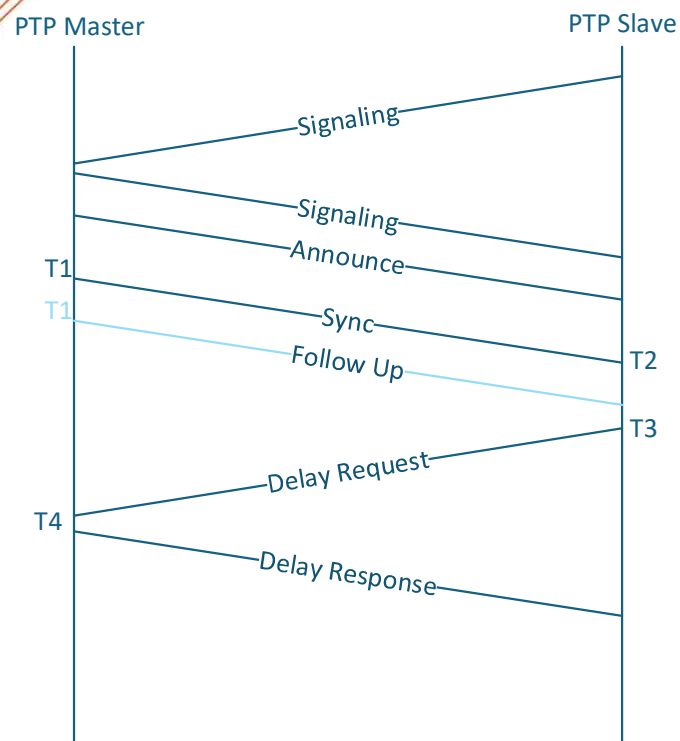
Для Slave $\rightarrow$ Master: $d_{SM} = \Delta_{TXS} + \delta_{SM} + \Delta_{RXM}$

где Δ_{TXM} и Δ_{TXS} - задержки передающих аппаратных трактов Master и Slave

Δ_{RXS} и Δ_{RXM} - задержки принимающих трактов

δ_{MS} и δ_{SM} - — задержки распространения в оптическом волокне

Сообщения РТР



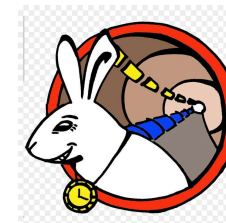
T1 – время формирования пакета Sync

T2 – Время получения пакета Sync

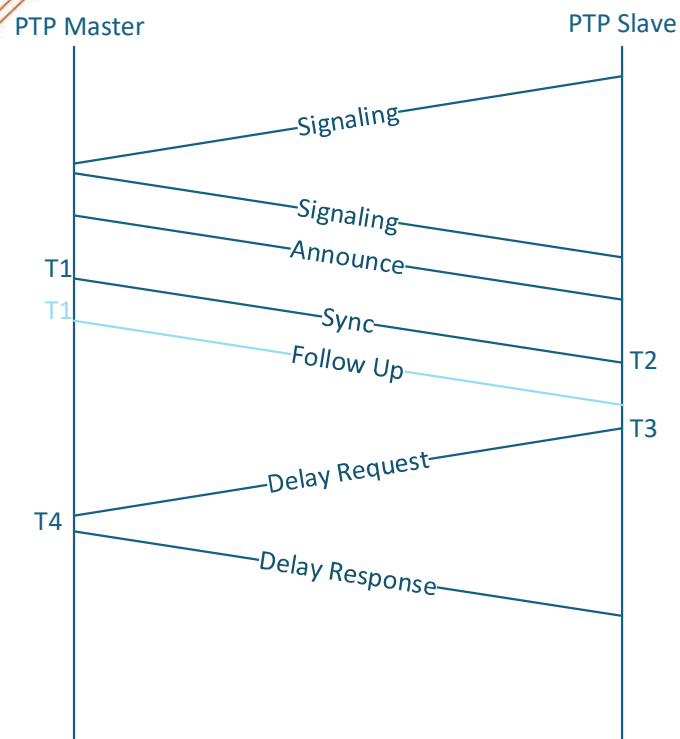
T3 – Время формирования пакета Delay Req

T4 – Время получения Delay Res

Расхождение времени $\theta = \frac{1}{2}[(T2-T1)+(T3-T4)]$

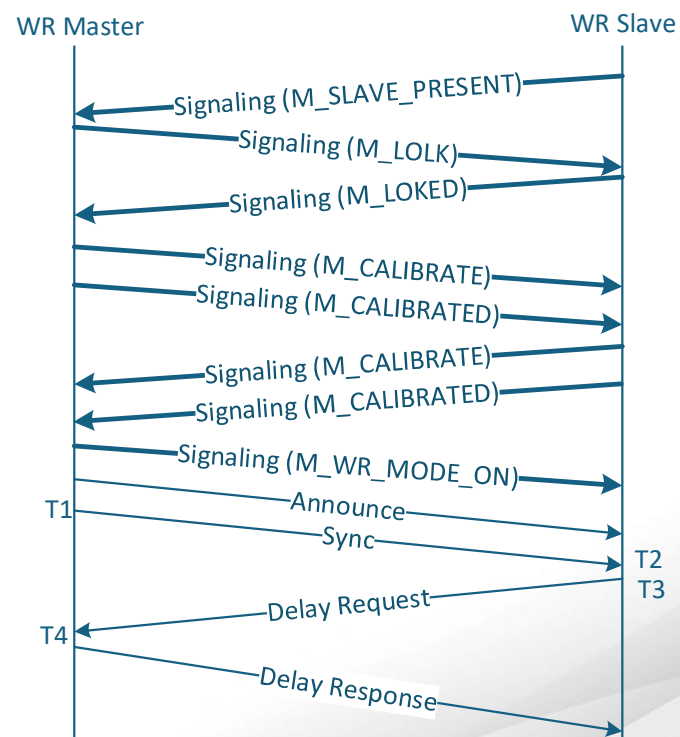


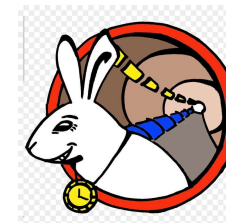
Сообщения White Rabbit



T1 – время формирования пакета Sync
 T2 – Время получения пакета Sync
 T3 – Время формирования пакета Delay Req
 T4 – Время получения Delay Res

Расхождение времени $\theta = \frac{1}{2}[(T2-T1)+(T3-T4)]$





Последовательность процессов в White Rabbit



1. Предварительная аппаратная калибровка WR Master И WR Slave. Определяются временные поправки: Δ_{TXM} , Δ_{RXS} , Δ_{TXS} , Δ_{RXM}

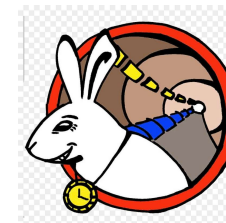
Задержки создаются:

- Электрические компоненты и дорожки
- Передающие и приемные тракты SFP
- Внутренняя логика FPGA
- Физический интерфейс Ethernet

Последовательность процессов в White Rabbit



2. Предварительная калибровка задержек связанных с оптическим волокном. Определяется коэффициент асимметрии α , характеризующий отношение задержек распространения сигналов в направлениях Master $\rightarrow$ Slave и Slave $\rightarrow$ Master. Абсолютные значения задержек рассчитываются в процессе работы по измеренной двусторонней задержке с учётом аппаратных поправок.



Последовательность процессов в White Rabbit

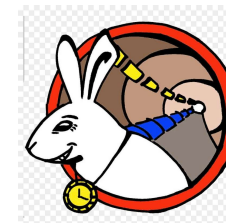


3. Установление WR Соединения

3.1. Синхронизация WR Slave с помощью SyncE (Синтонизация)



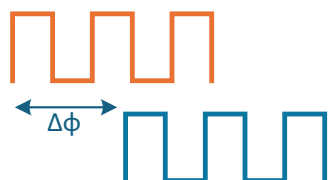
Частотная синхронизация WR Slave по тактовому сигналу, восстановленному из Ethernet-потокa WR Master.



Последовательность процессов в White Rabbit

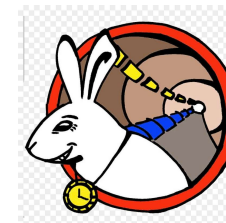


3.2. **DDMTD** измеряет разность фаз между восстановленным из входного Ethernet-потoka тактовым сигналом и локальным опорным тактовым сигналом WR Slave. Эти измерения используются для высокоточного определения временных интервалов и управления фазовой синхронизацией.



Тактовый сигнал RX Clock, восстановленный из SyncE-потoka WR Master

Локальный тактовый сигнал WR Slave



Последовательность процессов в White Rabbit

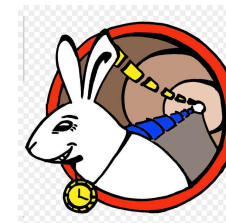


4. Калибровка при установке WR Соединения. Выполняется при каждом установлении или восстановлении линка. Определение и компенсация переменных задержек PHY при установлении WR-соединения.

4.1. Определение bitslide. Выявление дополнительной задержки, возникающей при выравнивании принимаемых битов и кодовых групп.

4.2. Измерение переменных задержек PHY. Определение фазовых задержек передающего и принимающего трактов, зависящих от состояния PHY после установления соединения.

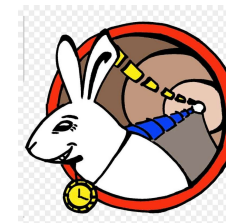
Последовательность процессов в White Rabbit



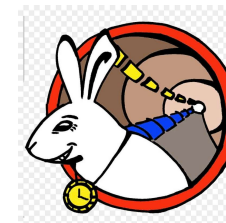
5. Измерения во время работы. В процессе PTP-обмена формируются четыре аппаратные временные метки T1,T2,T3,T4. В классической архитектуре White Rabbit временные метки приёма T2 и T4 дополнительно уточняются с помощью фазовых измерений DDMTD, поскольку приём данных и формирование временных меток происходят в разных тактовых доменах устройств. Метки передачи T1 и T3 такого уточнения не требуют, поскольку передача данных и формирование меток синхронизированы с одним тактовым сигналом.

Расхождение времени $\theta = \frac{1}{2}[(pT2-T1)+(T3-pT4)]$

Последовательность процессов в White Rabbit



6. Поддержание синхронизации WR Slave. На основании уточнённых временных меток, измеренной двусторонней задержки, известных аппаратных поправок и коэффициента асимметрии α рассчитывается смещение шкалы времени WR Slave относительно WR Master. Полученная ошибка используется контуром управления PLL для коррекции фазы локальных часов. В рабочем режиме система периодически повторяет измерения и компенсирует изменения задержки оптического соединения.



Стандартизация White Rabbit

White Rabbit был частично стандартизован в IEEE 1588-2019

Первоначальный WR PTP был расширением IEEE 1588-2008. Для него разработали специальные TLV, состояния протокола и собственную процедуру установления WR-соединения.

Во время подготовки IEEE 1588-2019 разработчики стандарта решили обобщить эти механизмы и включить их в стандартную архитектуру PTP. В результате появился **High Accuracy Default PTP Profile (Annex I.5)**.

Раздел стандарта	Назначение
Annex L	Управление синхронизацией на физическом уровне
Annex M	Реализация субнаносекундной синхронизации
Annex N	Процедуры калибровки



Спасибо за внимание!

Вопросы

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

20–22 октября 2025 года, г. Нижний Новгород