

Методы синхронизации в сетях связи

Ф.А.Прошин, ассистент кафедры "Электрическая связь" ПГУПС /

fedorproshin@gmail.com,

М.Н.Сторожук, аспирант СПбГУТ / maxstor@bk.ru,

Н.Л.Сторожук, к.т.н., генеральный директор АО НПП "КОМЕТЕХ" / snl@kometeh.ru

УДК 621.395.44, DOI: 10.22184/2070-8963.2024.118.2.62.69

Для синхронизации оборудования связи необходимо построение систем частотно-временного обеспечения. Под временной синхронизацией понимается одновременная синхронизация ведущего и ведомого устройств по частоте, фазе и дате. В существующих сетях широко применяется метод синхронизации на основе протоколов NTP/SNTP, RTP и устройств распределения сигналов времени. Однако существует много факторов, влияющих на точность передачи времени при синхронизации от специализированного оборудования, установленного совместно с синхронизируемой аппаратурой связи. В статье рассматривается актуальность применения интегрируемых малогабаритных серверов времени, синхронизируемых от ГНСС, их преимущества и недостатки по сравнению с классическими методами синхронизации.

Введение

Сети связи, строящиеся на принципах коммутации пакетов, получают все большее распространение, включая области промышленной автоматизации, телекоммуникаций и других отраслей экономики, предполагающих высокие требования к качеству предоставляемых услуг. Развитие механизмов управления задержками и снижения их вариации обуславливается модернизацией аппаратной части оборудования и применением усовершенствованных алгоритмов маршрутизации. Особое значение при этом имеет синхронизация узлов сети, предполагающая процесс привязки шкалы времени на локальных часах. Классические сети временного мультиплексирования, продолжающие обслуживать значительную часть требовательных ко времени сервисов, функционируют при наличии частотной и фазовой синхронизации, в то время как для сетей пакетной передачи необходимо обеспечить, кроме передачи частоты, фазовую и временную синхронизацию.

Механизмы реализации данного режима определяются требованиями оконечных устройств по точности, сложностью и масштабом сети, а также возможностями операторов по выбору соответствующих устройств синхронизации шкалы времени. При этом на географически распределенных сетях реализация двунаправленных протоколов синхронизации упирается в ряд проблем, связанных с большими задержками передачи и асимметрией. Одним из вариантов решения подобных трудностей может быть принцип синхронизации с распределенными по сети серверами времени.

1. Общие принципы синхронизации и построения систем ЧВО

Обеспечение заданного качества услуг связи в сетях с коммутацией пакетов тесно связана с функционированием систем синхронизации частоты, времени и фазы.

Методы временной синхронизации в сетях электро-связи должны обеспечивать привязку шкалы времени

ведомых часов к шкале времени ведущих с определенной заданной точностью.

В существующих IP-сетях связи широкое распространение получил метод, называемый двунаправленной передачей времени (Two-Way Time Transfer, TWTT). Данный метод реализован в протоколах NTP/SNTP (Simple Network Time Protocol), PTP и в устройствах распределения сигналов времени [1].

До появления протоколов NTP, PTP и аппаратуры распределения сигналов времени использовались однонаправленные методы передачи времени в формате протоколов IRIG-B и 1PPS. Сегодня они еще находят применение для передачи сигналов времени, например, в сигналах телевидения, для передачи сигналов времени специализированными радиостанциями и распределения сигналов времени в пределах объекта. Кроме описанного механизма, основанного на протоколах сетевого времени и точного времени, существует принцип переноса синхронизации в сетях на физическом уровне, также известный как технология синхронного Ethernet (SyncE).

Под временной синхронизацией понимается одно-временная синхронизация ведущего и ведомого устройств по частоте, фазе и дате, как показано на рис.1. В нашем рассмотрении частотная и тактовая синхронизации базируются на однонаправленном распространении синхросигнала по принципу "ведущий – ведомый".

Передачик и приемник соединены линией связи с собственной задержкой, которая из-за воздействия окружающей среды не постоянна во времени, поэтому сохранить постоянные фазовые соотношения между передатчиком и приемником не представляется возможным. Следовательно, говорить о фазовой синхронизации не правомочно.

Следует также обратить внимание, что для временной синхронизации необходимо передавать метки времени, а именно информацию вида "число: месяц: год: час: мин: сек".

На современных телекоммуникационных сетях система частотно-временного обеспечения (ЧВО) строится на основе существующей сети передачи данных (СПД), которая имеет иерархическую структуру, что позволяет объединить через различные сетевые устройства отдельные сегменты сети, которые при этом будут функционировать как единая система.

Иерархическая структура сети имеет три уровня:

- сеть подуровня доступа;
- сеть подуровня распределения;
- сеть подуровня ядра.

Следует отметить, что создание систем частотно-временного обеспечения может быть реализовано

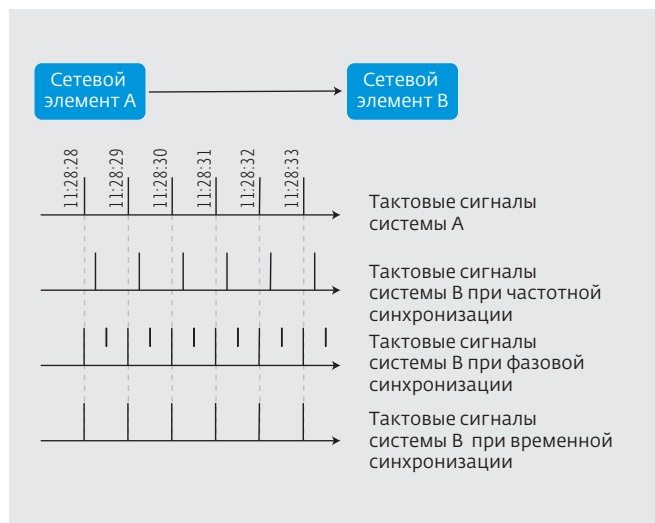


Рис.1. Сравнение видов синхронизации

с использованием ряда технических решений в зависимости от способов доставки эталонных синхросигналов.

Традиционным решением является создание специальных распределительных сетей ЧВО в виде иерархической структуры с реализацией процессов установки и последующей корректировки значений текущего времени и его хранения. Так как число приемов синхросигнала ограничено, то при этом способе приходится включать в состав сетевого оборудования синхронизации транзитные устройства, что соответственно увеличивает капитальные затраты и эксплуатационные расходы.

2. Синхронизация в пакетных сетях

В сетях связи, построенных с использованием технологии коммутации пакетов, возможны два основных способа передачи данных о частоте. К первому способу можно отнести технологию SyncE (синхронный метод), ко второму – пакетные методы передачи.

Существует несколько различий между пакетными и синхронными методами [1]:

- синхронные методы считаются односторонними и подходят для синхронизации частоты, а пакетные методы могут использоваться как в одностороннем режиме для синхронизации частоты и приближенно синхронизации времени, так и в двухстороннем режиме;
- синхронные методы являются двухточечными, каждый промежуточный узел должен быть частью системы распределения синхросигнала через соответствующие непрерывные цепи синхронизации, а в пакетных методах передачи

Таблица 1. Типы генераторного оборудования МСЭ-T и системы формирования, хранения, обработки шкалы времени

Тип по МСЭ-T		Тип в соответствии с терминологией классических систем единого времени
PRTC (PRTC-A, PRTC-B)	G.8272	ГЭВЧ
ePRTC	G.8272.1	
T-GM	G.8266	ПСВ
T-BC	G.8273.2	ВСВ
T-TC	G.8273.3	СПУТВ
T-TSC	G.8273.2	Отсутствует

синхросигнала возможно пересечение узлов, которые не включены в распределение синхросигналов;

- входной допуск на характеристики синхросигнала в синхронных методах выражен в терминологии "шума" и определен количественными характеристиками – максимальной ошибкой временного интервала и девиацией временного интервала, – а в сетях, использующих пакетную коммутацию, метрики качества, определяющие эффективность при передаче информации, связанные с потерей пакетов и девиацией их задержки, поэтому зависят как от топологии сети и характеристик трафика, так и от времени задержки пакетов.

Исходя из концепции синхронизации в сетях связи, использующих коммутацию пакетов, и выбора соответствующего протокола можно определить соответствие типов часов с точки зрения технологий [2], [3] и стандартизированной терминологии [4], как указано в табл.1 и 2.

3. Проблемы синхронизации в пакетных сетях

Наибольшей проблемой синхронизации в сетях, использующих технологию коммутации пакетов, является девиация временной задержки, которая может привести к возникновению проблем при обработке временных меток.

Таблица 2. Типы генераторного оборудования МСЭ-T и соответствие уровням NTP

Тип оборудования (уровень) NTP	Тип в соответствии с терминологией
Stratum 0	Государственные эталоны времени (ГЭВЧ)
Stratum 1	ПСВ
Stratum 2	ВСВ
Stratum 3	СПУТВ
Stratum 4	Локальные СВ, ПЧ

Существует несколько причин девиации временной задержки:

- флуктуационное изменение задержки, которое обусловлено задержкой пакетов в очередях;
- изменение времени задержек, зависящее от времени суток;
- изменение времени задержек, связанное с промежуточным накоплением задержки при транспортировке пакетов;
- изменения маршрутов передачи пакетов;
- перегрузки в сетях.

Общая задержка доставки временных меток в СПД, которая состоит из N узлов, определяется выражением:

$$T_{(общ)} = \sum_{i=1}^N (T_{расп} + T_{обр} + T_{ожид} + T_{пер}), \quad (1)$$

- где N – число маршрутизаторов;
 $T_{расп}$ – время передачи пакета;
 $T_{обр}$ – время, которое затрачивается на чтение заголовка пакета и вычисление маршрута;
 $T_{ожид}$ – время ожидания в очереди на транспортировку пакета;
 $T_{пер}$ – время, необходимое для освобождения пакетом места в буфере.

Девиация временной задержки пакетов в промежуточных маршрутизаторах СПД зависит в основном от вариации времени ожидания пакета в очереди на передачу, которая, в свою очередь, зависит от загрузки сети и может варьироваться в пределах от нескольких мкс до мс.

В сетях связи, использующих технологию коммутации пакетов даже для самого высокого класса обслуживания допустимая девиация задержки пакетов

Таблица 3. Классы точности для систем синхронизации времени

Классы точности	Требования по точности
1	500 мкс
2	100 мкс
3	5 мкс
4	1,5 мкс
5	1 мкс
6	Менее X нс

находится в диапазоне до 50 мс. Данный факт не позволяет без дополнительной обработки информации о времени и частоте обеспечить требуемые классы точности.

В общем виде выделяется шесть классов точности для систем синхронизации времени [5], которые представлены в табл.3.

4. Обобщенная структура ЧВО на основе систем пакетной коммутации

Для учета особенностей передачи сигналов частотно-временного обеспечения в сетях связи, использующих технологию пакетной коммутации, систему ЧВО можно представить в виде сетевой модели [1], которая приведена на рис.2.

Архитектура системы ЧВО с использованием протокола РТР должна представлять собой иерархическую

структуру, обеспечивающую синхронизацию локальных часов объектов синхронизации, и включать:

- системы синхронизации шкал времени (СШВ), обеспечивающие синхронизацию начальной фазы и времени на канальном или сетевом уровне;
- технические средства сети тактовой сетевой синхронизации (ТСС), наложенной на сеть электросвязи, системы управления ЧВО, а также средств связи ССоП, являющихся потребителями сигналов синхронизации.

СШВ должна строиться по иерархической древовидной топологии на основе РТР [6]. К техническим средствам СШВ относятся:

- первичный эталонный источник времени и частоты (ПЭИВЧ) (primary reference time clock, PRTC) – техническое средство, формирующее эталонные сигналы частоты (1PPS) и код времени (КВ);
- улучшенный первичный эталонный источник времени и частоты (уПЭИВЧ) (enhanced primary reference time clock, ePRTC) – техническое средство, формирующее сигналы 1PPS и КВ с улучшенными характеристиками в соответствии с требованиями сетей 5G;
- гроссмейстерские часы РТР (Т-GM), которые могут быть встроены в ПЭИВЧ и уПЭИВЧ;
- граничные часы РТР (Т-BC, Т-BC-A, Т-BC-P);
- прозрачные часы РТР (Т-TC);
- ведомые часы РТР (Т-TSC, Т-TSC-A, Т-TSC-P).

Каждый тип часов в зависимости от характеристик подразделяется на классы:

- ПЭИВЧ – А и В;
- граничные часы (Т-BC) и ведомые часы (Т-TSC) – А, В, С и D;

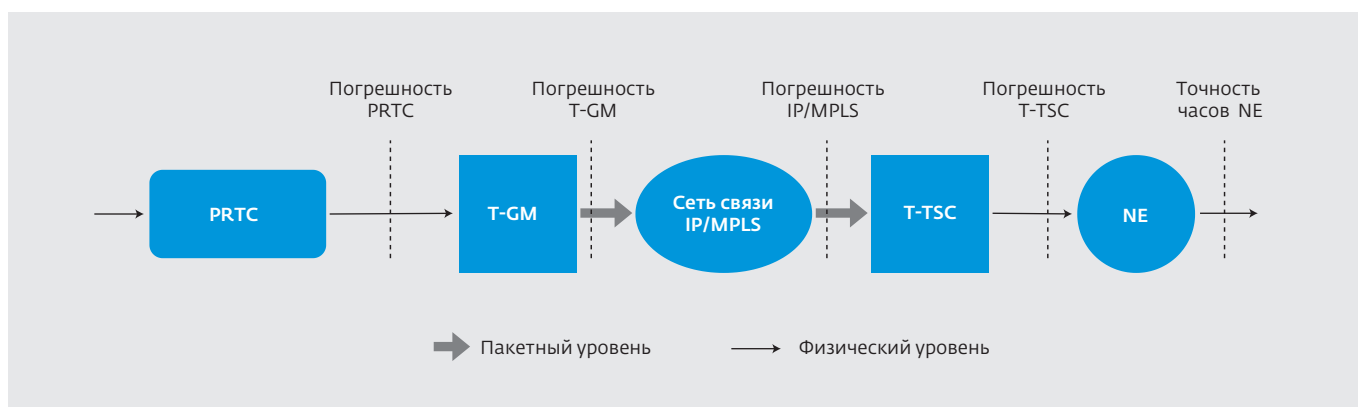


Рис.2. Сетевая модель сети с коммутацией пакетов при распределении сигналов частотно-временного обеспечения

- граничные часы (Т-ВС-А, Т-ВС-Р) и ведомые часы (Т-TSC-А, Т-TSC-Р) – А и В;
- прозрачные часы (Т-ТС) – А, В и С.

При этом часы класса А имеют худшие характеристики [6]. Характеристики интерфейсов часов СШВ приведены в табл.4.

Отметим, что при построении системы частотно-временного обеспечения необходимость в поддержке граничных (Т-ВС) или прозрачных часов (Т-ТС) не является обязательной [1].

5. Основные потребители и их требования

Актуальность построения системы единого точного времени в сетях электросвязи связана с развитием:

- мобильных сетей следующих поколений (NGMN; LTE);
- систем управления разного назначения (например, биллинговых систем);
- комплекса услуг различным потребителям (энергосистемам, банковским структурам, транспорту и др.).

К основным потребителям услуг информации о точном времени можно отнести сети связи, системы часофикации, различные автоматизированные системы управления, автоматизированные рабочие места информационных и информационно-управляющих систем, автоматизированные системы расчетов, оборудование тарификации и т. д.

К перспективным потребителям услуг информации о точном времени можно отнести:

- сети стандарта LTE-TDD и, как закономерное развитие, сети пятого (5G) и шестого (6G) поколений;
- оборудование, устанавливаемое в рамках внедрения технологии IoT/IIoT, – сенсоры, исполнительные устройства, датчики и др.;
- средства измерений и испытательное оборудование, предназначенные для измерения сетевых параметров (задержки, потери пакетов и пр.);
- современные системы эксплуатации и управления объектами технологических систем;
- системы дистанционной эксплуатации, диагностики и мониторинга инфраструктуры технологических систем, функционирующие с использованием принципов Big Data;
- удостоверяющие центры электронно-цифровой подписи;
- системы определения местоположения подвижных объектов, в том числе оконечного оборудования IoT, на базе технологий сотовой связи.

Если устройства в телекоммуникационной сети функционируют без привязки к общей шкале времени, то

Таблица 4. Входные и выходные интерфейсы различных источников шкал времени

Типы и классы часов	Интерфейс	
	входной	выходной
ПЭИВЧ/уПЭИВЧ	ГНСС, 5, 10, 2,048 МГц, 2,048 Мбит/с	1PPS, ToD, 5*, 10, 2,048 МГц, 2,048 Мбит/с
Гроссмейстерские часы (Т-ГМ)	1PPS, ToD, KB, 5*; 10; 2,048 МГц, 2,048 Мбит/с	1PPS, ToD, РТР, 5*; 10; 2,048 МГц*, 2,048 Мбит/с
Прозрачные часы (Т-ТС)	РТР	РТР
Граничные часы (Т-ВС, Т-ВС-А, Т-ВС-Р)	1PPS*, ToD*, РТР, 5*; 10; 2,048 МГц, 2,048 Мбит/с	1PPS, ToD, РТР, 5*; 10; 2,048 МГц*
Ведомые часы (Т-TSC, Т-TSC-А, Т-TSC-Р)	1PPS*, ToD*, РТР, 5; 10; 2,048 МГц, 2,048 Мбит/с	1PPS*, ToD*, 5*; 10*; 2,048 МГц*

* – Дополнительные интерфейсы.

могут возникать такие нарушения процессов функционирования, как:

- сбой в диагностике функциональных отказов;
- пропадание архивных данных;
- нарушение безопасности доступа к ресурсам сети;
- проблемы с биллингом;
- отказы в работе системы общеканальной сигнализации № 7 (ОКС-7);
- сбой систем криптографии и шифрования.

6. Общие принципы переноса шкал времени между различными видами часов

Под точностью сигналов времени понимается максимально допустимое абсолютное отклонение значения времени, передаваемого сигналом, от соответствующего значения времени эталонной шкалы. Наивысшая точность достигается при непосредственной передаче с использованием оптического кабеля на расстояние до 50 км и составляет порядка 10–50 пс. Точность при распространении сигнала времени с использованием коаксиального

кабеля, микрополосковой линии или сети наземного телевидения достигает 1–10 нс.

Следует отметить, что высокая точность доставки сигналов времени относительно собственной системной шкалы (50–500 нс) обеспечивается спутниковыми радионавигационными системами ГЛОНАСС/GPS.

Количество элементов сети для устройств T-BC, T-TSC классов А и С, согласно эталонной модели, должно соответствовать [6]:

- один T-GM, до 10 T-BC при условии, что T-TSC (внутренние локальные часы) встроены в оконечное оборудование;
- один T-GM, до девяти T-BC, один T-TSC как внешний источник для оконечного оборудования.

Для классов В и D данные ограничения находятся на уровне 20 и 19 T-BC, соответственно. Эталонная модель предполагает сценарии:

- короткий режим удержания объекта (1 мин) при переключении на резервный T-GM из-за пропадания PRTC;
- сетевой режим удержания в элементе (5 мин) при пропадании сигнала от глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и переводе PRTC на внутренний источник или переводе

на резервный источник сигналов по РТР из внешней среды;

- длительный сетевой режим удержания (одни сутки).

Пакетная сеть для реализации РТР должна соответствовать требованиям:

- общая задержка прохождения не превышает 100 мс;
- вариация задержки передачи не более 5 мс;
- величина потерь пакетов не выше 2%;
- обработка пакетов с метками времени с наивысшим приоритетом или с приоритетом уровня данных настоящего времени;
- данные с высоким приоритетом занимают не более 60% общей полосы пропускания;
- количество изменений маршрута доставки сообщений не более шести в сутки;
- маршрут прохождения сообщения в каждом направлении должен быть одинаковым.

Для обеспечения необходимой точности синхронизации разность показаний двух часов должна быть менее заданного порогового значения. Ведущие часы отправляют метку времени ведомым, которые записывают полученное с учетом коррекции на задержку распространения.

Основная причина нарушения точности синхронизации между ведущим и ведомым устройствами заключается

XVI Федеральная конференция

ТЕЛЕКОМ: ПЕРЕЗАГРУЗКА SATELLITE RUSSIA

31.05.2024
«Звезды Арбата»
(Марриотт Новый Арбат)
Москва, Новый Арбат, д. 32






Главная ежегодная площадка для обсуждения «горячих» тем и обмена опытом между российскими игроками рынка спутниковой связи



Открытый диалог между партнерами о текущих и перспективных проектах в России



Демонстрация новейших решений и технологий для обеспечения развития бизнеса

200
Более 200 участников и 30 экспертных выступлений





Главная ежегодная площадка для обсуждения «горячих» тем и обмена опытом между российскими игроками рынка спутниковой связи



Открытый диалог между партнерами о текущих и перспективных проектах в России



Демонстрация новейших решений и технологий для обеспечения развития бизнеса

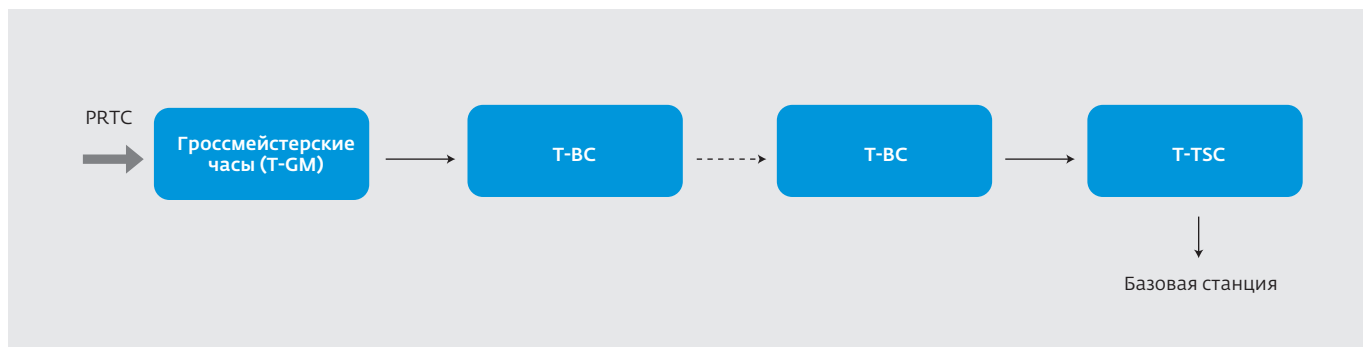


Рис.3. Стационарная сеть с пакетной коммутацией

в задержке на передачу сигнала времени и ошибках компенсации. Сеть с пакетным режимом передачи предполагает периодический обмен временными метками, что позволяет вычислять задержки в каждом из направлений. На практике задержки в каждом направлении могут отличаться, если на пути между часами включены коммутаторы или маршрутизаторы.

7. Предложения по вариантам построения сетей синхронизации на базе РТР

Рассмотрим варианты работы синхронизации по протоколу РТР в разных архитектурах. Основная задача заключается в синхронизации часов на удаленном узле, в качестве которого может выступать, например, базовая станция мобильной связи.

В варианте 1 стационарная сеть с пакетной коммутацией (на основе Ethernet) представлена на рис.3. Эталонный сигнал от РРТС подается на T-GM, расположенный в данном узле или на минимальном расстоянии от него. Далее сообщения передаются по сети, включающей промежуточные устройства. Если сеть

поддерживает протокол РТР, такими устройствами выступают T-BC, T-TC в соответствии с требованиями эталонной модели РТР. При данном варианте задержка прохождения сигнала контролируется, обеспечивая более высокую точность и низкую асимметрию.

Если на протяжении маршрута прохождения сообщения находятся устройства, не поддерживающие протокол РТР, величина задержек при обработке сообщений зависит от нагрузки сети. При таком условии асимметрия задержки достигает высокого уровня, снижая качество синхронизации.

Удаленный узел предполагает наличие T-TSC, получающего сигнал сети единого точного времени (ЕТВ) и использующего его для подстройки подключенных локальных часов базовой станции.

Для развертывания мобильных и фиксированных сетей связи в настоящее время чаще всего используется выделенное оборудование синхронизации, которое монтируется в телекоммуникационные шкафы, а к нему подключаются соединительные кабели и подводится электропитание.

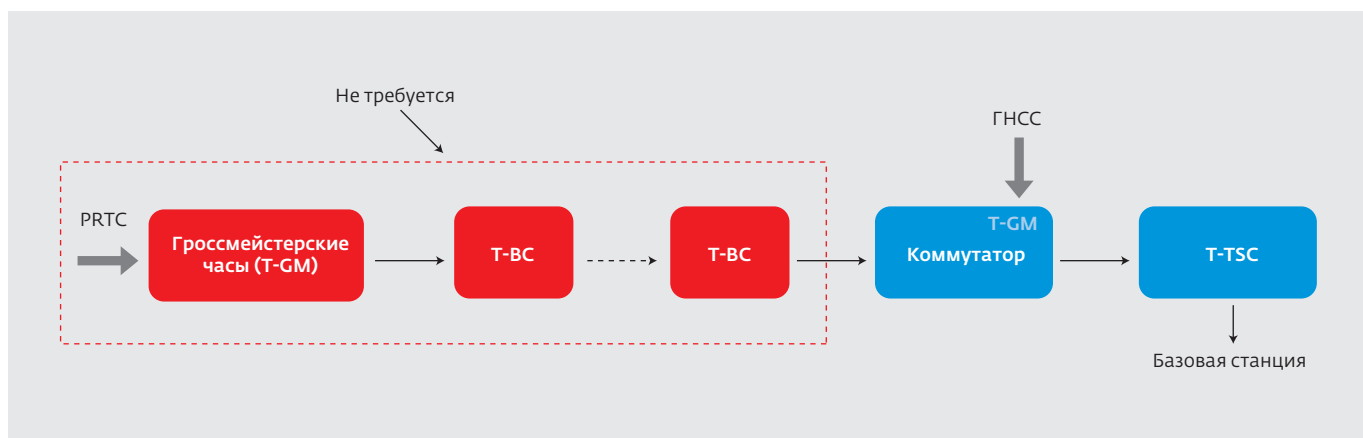


Рис.4. Сеть с использованием приемника ГНСС

Таблица 5. Сравнение моделей построения сети

Стационарная сеть	
Достоинства	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> Независимость от погодных условий (низкого качества сигнала ГНСС); наличие выходов синхронизации для подключения дополнительных клиентов 	<ul style="list-style-type: none"> Необходимость системы передачи для переноса сигналов РТР; необходимость монтажа дополнительного оборудования электропитания; требуется достаточное пространство и место крепления
Сеть с использованием модуля часов SFP	
Достоинства	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> Отсутствие необходимости дополнительного электропитания; занимает стандартный порт Ethernet; отсутствуют дополнительные интерфейсы для подключения внешних источников (RS-232); широкий диапазон рабочей температуры; снижение количества промежуточных элементов 	<ul style="list-style-type: none"> Зависимость от атмосферных условий; менее стабильный кварцевый генератор; отсутствие интерфейсов вывода; необходимость вывода антенны ГНСС

Вариант сети 2 с применением приемников ГНСС на удаленном узле представлен на рис.4. На удаленном узле располагается устройство РТР, которое способно принимать сигнал ГНСС. Данное устройство в виде модуля SFP может быть вставлено в один из портов Ethernet действующей базовой станции.

Сигнал ГНСС поступает на приемник, встроенный в SFP. По качеству данный модуль отвечает требованиям T-GM. Следовательно, на данном узле получаем источник ЕТВ, соответствующий по качеству Grandmaster.

Устройство SFP Grandmaster преобразовывает базовую станцию в устройство, поддерживающее РТР для подстройки внутренних часов. Сравнение моделей построения сети приведено в табл.5.

На основании описанного можно сказать, что стационарная сеть для синхронизации удаленного объекта имеет определенные преимущества и недостатки. При большом количестве ведомого оборудования на конечном узле может потребоваться наличие дополнительных выходов синхронизации, что на данное время обеспечивается на стандартных T-TSC. Также следует сказать, что стационарная сеть не подвержена внешним (атмосферным) воздействиям, что может затруднить прием сигналов ГНСС. Учитывая сказанное, нужно отметить, что с точки зрения простоты и эффективности использования ресурсов такая сеть менее предпочтительна, чем доставка сигналов ЕТВ с использованием ГНСС.

Так как удаленные узлы находятся в условиях ограниченного пространства, монтаж дополнительного оборудования для их синхронизации и систем электропитания затрудняется. Значительное количество подобных узлов организовывается для подключения базовых станций в труднодоступных районах с учетом имеющейся инфраструктуры. Шкафы для размещения оборудования могут быть рассчитаны на монтаж только самой станции без дополнительных систем обеспечения. Вариант подключения модуля SFP, обеспечивающего уровень T-GM в таком случае наиболее предпочтителен, так как клиентом РТР выступает одно устройство на узле. Влияние погодных условий при этом выступает менее значительным недостатком по сравнению с достоинствами реализации ЧВО на таких удаленных узлах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мазуренко Д.К.** Сетевые решения построения пакетной сети распределения сигналов единого точного времени // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 4. С. 67–71.
2. RFC 5905. Network time protocol version 4: protocol and algorithms specification.
3. Стандарт IEEE 1588v2 (2019). Протокол синхронизации прецизионных часов для сетевых измерений и систем управления.
4. ГОСТ Р 71148-2023. Требования по построению систем синхронизации сетей связи: сетей связи с коммутацией каналов, сетей связи с коммутацией пакетов.
5. Time and phase synchronization aspects in telecommunication networks. ITU-T Recommendation G.8271/Y.1366 (03/2020).
6. **Рыжков А.В.** Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 270 с.