

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ СВЯЗИ И СИНХРОНИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-11-30-37

Лоховин Владимир Александрович,
АО "ЦЭНКИ", Москва, Россия, v.lohovin@russian.space

Manuscript received 28 September 2024;
Accepted 03 November 2024

Шварц Михаил Львович,
МТУСИ, Москва, Россия, mschwartz@srd-mtuci.ru

Рыжков Анатолий Васильевич,
МТУСИ, Москва, Россия, ryjkov.anatoly@yandex.ru

Ключевые слова: когерентная сеть связи, ГНСС, шкала времени, частотно-временная синхронизация, PTP2.1, SyncE

Современные объекты промышленной, транспортной, энергетической инфраструктуры строятся с широким применением телекоммуникационных и IT технологий, обеспечивающих информационное взаимодействие производственных и инженерно-технических систем, управление технологическими процессами, контроль состояния элементов инфраструктуры. Сбой процесса синхронизации по времени элемента сети, характеризующийся неточными, неправильно принятыми сигналами или неприкрытыми потерями сигналов от эталонного источника, может привести к потере нарушению привязки ведомых часов к эталонной шкале времени, что, в свою очередь, является предпосылкой к возникновению ряда проблем. Важным является обеспечение протекания технологических процессов в едином временном поле. В статье рассмотрены общие вопросы построения систем связи и синхронизации, освещены основные проблемы, в том числе зависимость от глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) при сличении с эталонной шкалой Государственной службы времени и частоты (ГСВЧ). В качестве решения предлагается использование технологии когерентных систем синхронизации на базе волоконно-оптических систем передачи. Представлен вариант интеграции телекоммуникационных комплексов региональных сетей и инфраструктурных объектов в когерентную сеть связи общего пользования, приведена оценка применимости технологии когерентных сетей. Построение когерентных сетей позволит технологически и организационно объединить в единый комплекс системы связи инфраструктурных объектов и системы синхронизации, добиться большей унификации оборудования внутри телекоммуникационных комплексов, а также будет способствовать развитию и внедрению искусственного интеллекта в инфраструктурные объекты различной сложности.

Для цитирования:

Лоховин В.А., Шварц М.Л., Рыжков А.В. Перспективные направления развития систем связи и синхронизации сложных инфраструктурных объектов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №11. С. 30-37.

For citation:

Lokhovin V.A., Schwartz M.L., Ryzhkov A.V. (2024). Development trends regarding communication and synchronization systems of complex infrastructure facilities. *T-Comm*, vol. 18, no.11 pp. 30-37. (in Russian)

Введение

Прежде, чем приступить к основной части статьи, необходимо описать несколько первоочередных понятий, в том числе понятие шкалы времени, точности шкалы времени, единства шкал времени и когерентности применительно к рассматриваемой области:

1. Сложный инфраструктурный объект – комплекс интеллектуального оборудования в отдельно стоящих зданиях и сооружениях, расположенных на значительных расстояниях друг от друга и связанных общей телекоммуникационной, транспортной и энергетической инфраструктурой.

2. Шкала времени (ШВ) – система отсчета меток (кода) времени, которая формируется путем суммирования эталонных интервалов времени, начиная с некоторого начального момента времени, принятого условно (условного нуля). Эталонный интервал времени (1 секунда) формируется на основе метрологических измерений высокостабильных физических процессов в эталонных атомных стандартах частоты и времени посредством измерения частоты квантовых переходов элементарных частиц цезия-133 и равен $9\,192\,631\,770$ периодам. Устройство, формирующее размеры эталонных единиц частоты и времени для передачи их по каналам связи потребителям, расположенным на удаленных объектах, будем называть эталонным источником частоты и времени инфраструктурного объекта.

3. Точность ШВ – мера соответствия ШВ рассматриваемого объекта шкале времени национального эталонного источника.

4. Единство нескольких ШВ – мера соответствия друг другу шкал времени, формируемых в границах рассматриваемого объекта, и без учёта соответствия их национальному эталону.

Соответствие шкал времени достигается путём решения задачи синхронизации шкал – временной синхронизацией.

Успешность её выполнения определяется выполнением с заданной точностью следующих критериев:

- синхронизация точности хода часов, т.е. длительности интервала отсчёта 1 с;
- синхронизация начала отсчёта, т.е. начала отсчёта новой секунды (фазовая синхронизация часов);
- синхронизация значения кода времени – значения текущих данных о дате времени в формате год-месяц-день-часы-минуты-секунды.

Для обеспечения единства отсчёта ШВ Федеральным законом «Об исчислении времени» от 03.06.2011 № 107-ФЗ установлено использование национальной шкалы времени Российской Федерации, воспроизводимой и хранимой Государственной службой времени и частоты – UTC (SU) [1].

Для различных часовых поясов используется местное время, в том числе для г. Москва используется московское время. Московское время соответствует третьему часовому поясу в национальной ШВ Российской Федерации (UTC (SU) +3). Значения кода времени в субъектах Российской Федерации в разных часовых зонах отличаются на целое число часов. Местное время одной часовой зоны одинаково. Счет минут и секунд во всех часовых зонах одинаков.

Таким образом, понятие синхронизации ШВ следует рассматривать как процесс установления единства хода синхронизируемых часов со шкалой UTC (SU) и внесения поправки

на местное (локальное) время, которое для г. Москва составляет +3 часа.

Общее описание проблем временной синхронизации

Сбой процесса синхронизации по времени элемента сети, характеризующийся неточными, неправильно принятыми сигналами или потерями сигналов, от эталонного источника, может привести к нарушению привязки ведомых часов к эталонной ШВ, что, в свою очередь, является предпосылкой к возникновению ряда проблем. Среди прочих других:

- нарушение последовательности выполнения технологических процессов;
- потеря хронологической достоверности телеметрической информации;
- снижение уровня безопасности (промышленной, информационной и др.);
- нарушение работы информационных сервисов;
- потеря архивных данных.

Перечисленные проблемы широко обсуждаются в технической литературе последних лет [2, 9, 10]. Особое внимание уделяется выработке подходов к повышению качества и надежности частотно-временного обеспечения широкого круга потребителей в масштабах государства, развитию систем синхронизации в сетях электросвязи и технологиям передачи частотно-временной информации, снижению зависимости от спутниковых систем, способам организации частотно-временного обеспечения (ЧВО) промышленных объектов.

Типовая структура связи и системы синхронизации сложного телекоммуникационного комплекса

В качестве примера рассмотрим сложный телекоммуникационный комплекс регионального уровня, объединяющий различные инфраструктурные объекты, состоящие из множества интеллектуального оборудования инженерно-технических и производственных систем зданий и сооружений, промышленных комплексов. Также представим, что рассматриваемый телекоммуникационный комплекс представляет собой конвергенцию технологий связи: в составе комплекса применены системы на базе технологии синхронной цифровой иерархии (СЦИ) и асинхронные системы связи с пакетной коммутацией (Ethernet), используются проводные каналы передачи (медные, волоконно-оптические) и радиоканалы. Упрощенная схема такого телекоммуникационного комплекса изображена на рисунке 1.

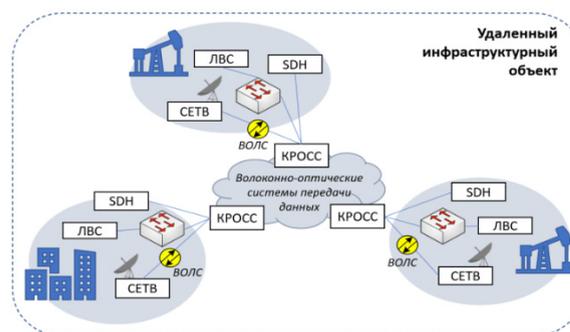
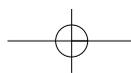


Рис. 1. Упрощенная схема сложного телекоммуникационного комплекса



СВЯЗЬ

Неотъемлемой частью подобных телекоммуникационных комплексов является система единого и точного времени (СЕТВ). СЕТВ выполняет задачи обеспечения единства и точности шкал времени всех элементов инфраструктурного объекта. В том числе СЕТВ реализует формирование, длительное хранение ШВ и передачу ШВ технологическому оборудованию по протоколам NTP, RTP в виде физических сигналов ШВ (1 PPS + код времени (KB)) и т.п.

В большинстве случаев СЕТВ строится по иерархическому, древовидному принципу. В вершине топологии расположены один или несколько ведущих узлов, на которых выполняется формирование эталонных сигналов времени объекта (функции ведущих сетевых часов) [3-8, 11, 12]. Компоненты СЕТВ распределены по объекту и информационно объединены друг с другом. Функционально СЕТВ является наложенной системой на сети связи, а топология СЕТВ определяется в первую очередь топологией сети связи. Также в составе СЕТВ, как правило, предусматривается технологический центр, осуществляющий мониторинг ШВ и общего технического состояния компонентов системы.

В свою очередь, учитывая наличие системы связи СЦИ, в СЕТВ интегрирована подсистема тактовой сетевой синхронизации (ТСС), которая обеспечивает синхронизацию частот всех задающих генераторов цифровых устройств связи СЦИ. В соответствии с рекомендациями МСЭ-Т G.811.1 относительная точность установки частоты должна быть не хуже $\pm 1 \times 10^{-12}$.

В настоящее время основным способом формирования прецизионной ШВ в СЕТВ и ТСС подобных объектов является использование данных, принятых от спутниковых систем: ГНСС и геостационарных спутников. На рисунке 2 приведена схема привязки местной ШВ к эталонной ШВ по сигналам ГНСС. Схема иллюстрирует прямой метод приема сигналов эталонной ШВ.

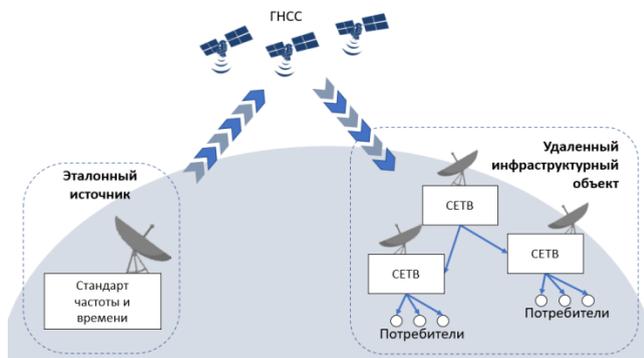


Рис. 2. Схема привязки местной ШВ к ШВ ГЭВЧ по сигналам ГНСС (прямой метод)

Минусы такого способа очевидны – подверженность влиянию атмосферных явлений на распространение сигнала и качество приема, а также влиянию внешних помех (промышленных и бытовых, в том числе преднамеренных). В отдельных случаях возникают сложности при работе в плотной городской застройке, ограничивающей видимость, или в заглубленных сооружениях, не оборудованных антенно-фидерными устройствами (АФУ) или не приспособленных к их установке. Сегодня существуют различные методы сличения разнесенных ШВ – прямой метод (рис. 1), дифференциальные

и дуплексные методы сличения разнесенных шкал, например, Common-view, PPP (Precise Point Positioning) и TWSTFT (Two Way Satellite Time and Frequency Transfer). Методы обладают высокой точностью сравнения – от сотен наносекунд до десятков пикосекунд, и применимы при совместной работе со спутниками системы ГЛОНАСС [13-16].

Однако необходимость использования спутниковых сигналов в перечисленных методах является слабой стороной таких систем передачи сигналов ЕТВ [2, 17]. Частично данный недостаток можно нивелировать использованием на удаленном объекте высокостабильных генераторов частоты для длительного хранения рабочей ШВ до момента восстановления связи со спутниками.

Сейчас наземные каналы передачи данных о ШВ могут быть реализованы в сетях связи синхронной цифровой иерархии (передача ШВ в потоках E12) [18] или на основе выделенных волоконно-оптических линий связи с использованием протокола прецизионного времени RTP совместно с системой синхронного Ethernet (SyncE). При этом, как следует из практики их применения, данные системы не обладают достаточной надёжностью, не исключающей снижения точности приёма и формирования шкалы на выходах сетевых часов, связанными с возможными отказами в оборудовании синхронизации времени или систем передачи.

Таким образом, сегодня ощущается необходимость в дальнейшем развитии наземных способов передачи данных о ШВ от эталонных стандартов частоты и времени к ведущим сетевым часам или часам инфраструктурного объекта [28-34]. Альтернативой спутникам системам в качестве основного или резервного канала приёма сигналов ЕТВ от эталонных источников могут служить современные волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) и, в частности, технологии, разрабатываемые в перспективных когерентных сетях связи общего пользования (КССОП) [19, 20].

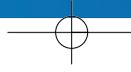
С точки зрения исследуемой области представляет интерес вопросы:

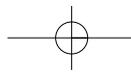
- перехода от тактовой синхронизации к частотно-временному обеспечению;
- интеграции телекоммуникационного комплекса региональной сети или сети сложного инфраструктурного объекта с КССОП;
- оценки приобретаемых объектовой (региональной) сетью и КССОП дополнительных свойств.

Перспектива развития систем связи и синхронизации региональных сетей и сложных инфраструктурных объектов

Архитектура, подробное описание принципов работы КССОП и достижимость требований МСЭ-Т, в части точностей передачи частотно-временной информации, рассмотрены в работах [21-27], а также описаны в рекомендациях ИТУ-Т G.8275 (01/2024). Структура КССОП представляет собой набор пространственно-разнесённых когерентных первичных эталонов времени и частоты (кГПЭВЧ), соединённых разветвлённой сетью волоконно-оптических линий связи и образующих полносвязную, полнодоступную сеть связи.

Своим названием когерентная сеть обязана тому факту, что, помимо выполнения основной функции по передаче данных, в ней выполняется задача приведения всех кГПЭВЧ в





СВЯЗЬ

гармоническое, когерентное состояние с эталонной ШВ ГСВЧ с погрешностью, не превышающей единиц наносекунд. Для сравнения, точность сличения с эталонной ШВ посредством ГНСС для гражданского использования составляет 100 нс.

В основе КССОП лежат принципы формирования группового стандарта на основе выходных сигналов от пространственно-разнесённых источников частотно-временной информации (ЧВИ). Для вычисления весовых коэффициентов при формировании групповой ШВ каждый кгПЭВЧ использует в качестве опорных сигналы от внешних источников, доступных в конкретном сегменте КССОП, в том числе сигналы от встроенных в кгПЭВЧ стандартов частоты, ГНСС, ведущих РТР-серверов Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) и ближайших кгПЭВЧ. Приём и обработка опорных сигналов от нескольких источников позволяет обнаруживать и исключать ошибки при приёме сигналов ГНСС.

Структурная схема КССОП с подключённой к ней сетью связи инфраструктурного объекта (или региона) показана на рисунке 3.

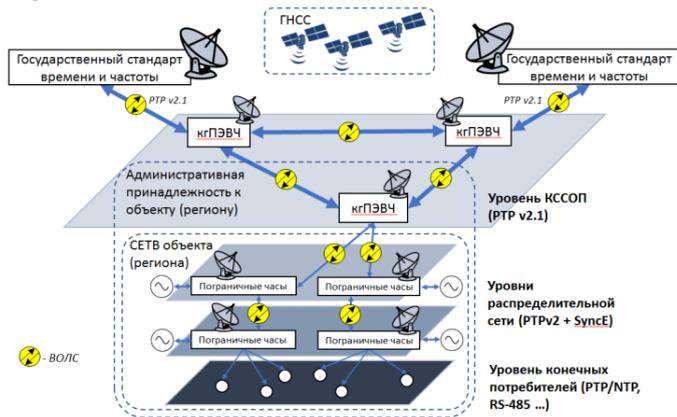


Рис. 3. Структурная схема включения инфраструктурного объекта в когерентную сеть связи общего пользования

Основным требованием к оборудованию транспортной сети, предназначенному для объединения кгПЭВЧ в сеть КССОП (верхний уровень на схеме), является аппаратная поддержка протокола RTRv.2.1 (стандарт IEEE 1588v2.1-2019). Только в этом случае возможно объединение узлов верхнего уровня КССОП в группу с привязкой к эталонному источнику и взаимная синхронизация этих узлов с точностью не хуже единиц наносекунд.

Функционально каждый кгПЭВЧ представляет собой устройство со встроенным высокоточным хранителем частоты и сложным алгоритмом обработки сигналов и взаимодействия с соседними кгПЭВЧ. В состав кгПЭВЧ входят:

- атомный стандарт частоты, соответствующий требованиям рекомендации МСЭ-Т G.811.1;
- приемник сигналов ГНСС со встроенным сервером РТР;
- РТР-приемник частотно-временной информации от соседних кгПЭВЧ и эталона ГСВЧ;
- ормирователь групповой ШВ;
- формирователь выходных сигналов (1PPS, NTP, РТР, код времени, сигналы ТСС 2,048 МГц).

По отношению к узлам, находящимся на нижних уровнях сети распределения ЧВИ, кгПЭВЧ выполняет функцию

мастер-часов (Telecom Grandmaster, T-GM). Количество уровней распределительной сети и входящих в них узлов зависит исключительно от масштаба подключаемой к КССОП сети. Основным требованиям к пограничным часам является длительное хранение ШВ благодаря системе тактовой сетевой синхронизации и наличие нескольких входов для приема внешних опорных сигналов.

Для построения уровней распределения требуется аппаратура пакетной сети передачи уровня L2 или L3 с аппаратной поддержкой протокола RTRv.2 и SyncE. Структурная схема такого элемента транспортной сети приведена на рисунке 4 (Рекомендации ITU-T G.8273.2/Y.1368.2 (06/2023)). Его характерным отличием от обычного Ethernet-коммутатора или маршрутизатора, применяемого в асинхронных системах связи с пакетной коммутацией, является наличие в его структуре тактового генератора (Ethernet Equipment Clock, EEC) и пограничных часов РТР протокола (Telecom Boundary clock, T-BC).

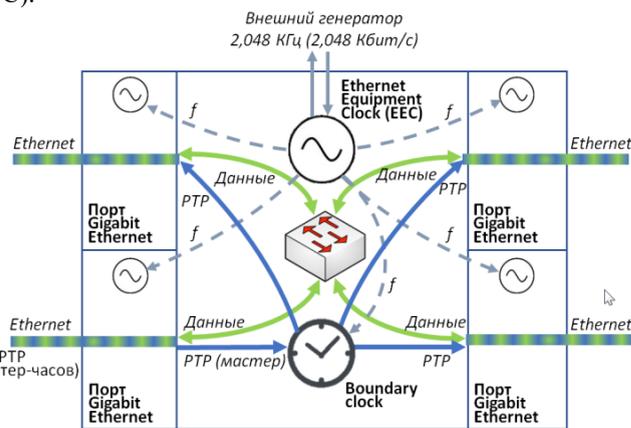


Рис. 4. Структурная схема элемента транспортной сети с аппаратной поддержкой протокола RTRv.2

В рассматриваемом устройстве все порты Gigabit Ethernet (GE) синхронизируются единой частотой (f), вырабатываемой генератором системы синхронного Ethernet (ЕЕС). В свою очередь ЕЕС должен быть подключен к внешнему прецизионному источнику частоты. Синхронизация ЕЕС может осуществляться путём непосредственного подключения к Первичному эталонному генератору (ПЭГ), соответствующего рекомендации G.811/G.811.1.

Пограничные часы получают пакеты РТР от вышестоящих ведущих часов непосредственно из порта GE, в обход асинхронного ядра коммутации. Пакеты РТР, для нижестоящих ведомых часов, также передаются от пограничных часов непосредственно в выходной порт GE, минуя ядро коммутации. Это позволяет исключить зависимость процесса временной синхронизации от неопределённости значений разброса задержек в асинхронном ядре коммутации. Такой механизм работы пограничных часов обеспечивается специальными аппаратными средствами оборудования и называется функцией поддержки РТР протокола. Кроме того, для обеспечения необходимой точности работы пограничных часов они обязательно должны получать эталонную частоту от генератора системы синхронного Ethernet (ЕЕС). При нарушении в работе системы SyncE точность временной синхронизации пограничных часов может ухудшаться от десятков нс до десятков мкс (на три порядка).



СВЯЗЬ

Здесь необходимо отметить, что в настоящий момент имеются образцы оборудования, предназначенного для верхнего уровня КССОП. Например, аппаратура передачи сигналов времени и частоты (АПСВЧ) отечественного производства с шагом коррекции (разрешением) $\pm 0,6$ нс [17], WRS-3/18 производства Creotech или WR-Z16 производства Safran. Однако ощущается нехватка оборудования отечественного производства с аппаратной поддержкой протокола RTP v.2 для построения транспортной сети уровня распределения, необходимого для создания перспективных объектов сетей, работающих совместно с КССОП.

В целом в когерентных сетях применяются принципы передачи частоты и времени, реализуемые в СЦИ, классических пакетных сетях передачи с использованием протоколов NTP/RTP и в сетях с поддержкой SyncE, а концепция формирования и поддержки групповой ШВ в КССОП напоминает формирование всемирного атомного времени UTC. Технологии построения КССОП предполагают значительное масштабирование сети без значительного влияния на бюджет ошибки синхронизации – до нескольких тысяч базовых узлов и расстоянием между узлами до сотен километров. Поэтому топология телекоммуникационной сети инфраструктурного объекта может быть реализована с применением технологии когерентных сетей.

Когерентные сети могут быть развернуты на базе уже существующих волоконно-оптических систем передачи. В приложении VII к рекомендации ITU-T G.8275/Y.1369 предлагается сценарий развертывания КССОП путем постепенного замещения существующего оборудования на оборудование с поддержкой RTP на локальных участках сети связи и расширения функционала.

Очевидно, что подключение сети связи объекта или региона к КССОП не должно нарушать структуру когерентной сети. В случае включения СЕТВ объекта в КССОП в вершине топологии СЕТВ должен быть расположен опорный узел формирования шкалы времени на основе кгПЭВЧ, выполняющий, с одной стороны, функции ведущих сетевых часов объекта (а также осуществляющий мониторинг ШВ и общего технического состояния компонентов системы), а с другой – являющийся частью ядра КССОП и выполняющий функции кгПЭВЧ. СЕТВ объекта при этом сохраняет иерархическую, древовидную структуру, а планирование развития и эксплуатации сети связи объекта неразрывно связаны с входящей в ее состав системой частотно-временного обеспечения (кгПЭВЧ).

Выводы

Применение когерентных технологий для построения сетей связи государственного и регионального значения является перспективным направлением. В первую очередь потому, что передача данных о шкале времени посредством ГНСС не является абсолютно достаточным решением. Благодаря построению КССОП в перспективе появляется возможность организовать дополнительный (резервный) канал передачи сигналов частотно-временной синхронизации параллельно с ГНСС значительно снизив зависимость от спутниковых систем и повысив в целом показатели надежности функции синхронизации конечных пользователей.

Построение когерентных сетей позволит технологически и организационно объединить в единый комплекс системы связи инфраструктурных объектов и системы синхронизации, добиться большей унификации оборудования внутри телекоммуникационных комплексов, а также будет способствовать развитию и внедрению искусственного интеллекта в инфраструктурные объекты различной сложности.

Вклад в создание КССОП могут внести проекты по строительству или модернизации региональных и объектовых сетей связи. Для этого в вершине топологии СЕТВ должен быть расположен опорный узел формирования шкалы времени на основе кгПЭВЧ, одновременно выполняющий функции ведущих сетевых часов СЕТВ и элемента КССОП.

Литература

1. Panfilo G., Arias F. The coordinated universal time (UTC) // *Metrologia*. 2019. Vol. 56, no 4. P. 042001.
2. Вексельман М.И. Безопасность систем синхронизации на основе ГНСС. Мониторинг качества навигационных систем // *Радионавигация и время: труды СЗРЦ Концерна ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ»*. 2022. № 10 (18). С. 21-28.
3. Буренин А.Н., Легков К.Е., Левко И.В. О моделях информационных структур комплексов обеспечения единым временем системы управления сложным организационно-техническим объектом // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2019. Том 13. №3. С. 44-51.
4. Рагузин А.С., Губанов Н.Г. Моделирование системы синхронизации времени информационных систем региональной электросетевой компании // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2015. № 1(45). С. 21-28.
5. Канаев А.К., Опарин Е.В. Предложения по построению интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению сетью тактовой сетевой синхронизации // *Труды учебных заведений связи*. 2017. Том 3. № 4. С. 43-53.
6. Канаев А.К., Опарин Е.В., Опарина Е.В. Функциональная модель объединенного источника комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной и распределенной системы технологического назначения // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 282-289. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-282-289
7. Лоховин В.А. Развитие частотно-временного обеспечения объектов наземной космической инфраструктуры на примере разработки системы единого времени космодрома «Восточный» // "Орбита молодежи" и перспективы развития российской космонавтики : сборник докладов Всероссийской молодежной научно-практической конференции, г. Томск, 18-22 сентября 2017. Томск : Изд-во ТПУ, 2017. С. 75-76.
8. Лоховин В.А. Новый подход к расчёту структуры системы единого времени наземных комплексов космодромов // "Орбита молодежи" и перспективы развития российской космонавтики : материалы VI Всерос. молодежной науч.-практ. конф., г. Пермь, 28-30 сентября 2020. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. С. 110-111.
9. Буренин А.Н., Легков К.Е., Оркин В.В. Алгоритм адаптивного управления информационными системами в условиях массовых возмущений // *Научные технологии в космических исследованиях Земли*. 2017. Т. 9. № 6. С. 90-95.
10. Буренин А.Н., Легков К.Е. Вопросы безопасности инфокоммуникационных систем и сетей специального назначения: основные угрозы, способы и средства обеспечения комплексной безопасности сетей // *Научные технологии в космических исследованиях Земли*. 2015. Т. 7. № 3. С. 46-61.

11. Козлов С.В., Кубанков А.Н. Процессные основы интеграции и комплексного развития информационных, управляющих, роботизированных, телекоммуникационных систем // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 1. С. 23-31.
12. Pavlov S.V., Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V., Mytenkov S.S. Features of supporting decision making in modern enterprise infocommunication systems // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. С. 71-74.
13. Скакун И.О. Всемирное координированное время и методы сличения шкал времени // Космонавтика и ракетостроение. № 4(69). 2012. С. 60-69.
14. Липатников Л.А. О методике точного дифференциального позиционирования (Precise point positioning) и перспективах её совершенствования // Интерэкспо Гео-Сибирь. Новосибирск: изд. СГГА, 2012. Т. 7. С. 48-53.
15. Митрикас В.В., Печерица Д.С., Скакун И.О., Федотов В.Н. Сравнение шкал времени методом PPP по измерениям навигационной аппаратуры потребителей системы ГЛОНАСС // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 4. С. 32-44. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-32-44
16. Скакун И.О. Сличение шкал времени с использованием сигналов ГНСС // Труды МАИ. 2014b. № 73. С. 26.
17. Wu Z., Zhang Y., Yang Y., Liang C., Liu R. Spoofing and Anti-Spoofing Technologies of Global Navigation Satellite System: A Survey // IEEE Access. 2020. Vol. 8, pp. 165444-165496.
18. Рыжков А.В., Шварц М.Л., Аладин В.М., Исупов А.В. Опыт внедрения систем частотно-временного обеспечения сетей связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 7. С. 21-28.
19. Балаев Р.И. Современные требования к обеспечению сетей связи нового поколения эталонными сигналами времени и частоты // Альманах современной метрологии. 2021. № 4(28). С. 109-114.
20. Arai Kaoru, Murakami Makoto. High-accuracy Time-synchronization Technology for Low-latency, High-capacity Communications in the 5G and Beyond 5G eras // NTT Technical Review. 2021. 19, pp. 85-92. DOI:10.59112/nttr202112gls
21. Рыжков А.В., Шварц М.Л. Современные тенденции развития систем сетевой синхронизации в сетях электросвязи. От плезихронных до когерентных сетей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. №7. С. 14-22.
22. Рыжков А.В., Шварц М.Л. Пути формирования прецизионной шкалы времени национальной сети связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №2. С. 17-24.
23. Рыжков А.В., Шварц М.Л. Предпосылки создания когерентной сети связи общего пользования – основы сквозных цифровых технологий // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. №7. С. 14-22.
24. Шварц М.Л., Рыжков А.В., Аладин В.М. Перспективный первичный эталон времени и частоты для систем частотно-временного обеспечения сетей связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №8. С. 12-20.
25. Медведев С.Ю., Мишагин К.Г., Рыжков А.В., Сахаров Б.А., Шварц М.Л. Формирование шкалы времени в когерентной сети связи общего пользования // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №12. С. 29-35.
26. Cosart L., Imlau H., Zampetti G. cnPRTC-Coherent Network Primary Reference Time Clock: A Geographically Distributed Resilient Timescale for Telecommunications // IEEE Communications Magazine. 2022. Vol. 61, no. 4, pp. 28-32.
27. Петров С.Д., Чекунов И.В., Усачев В.А., Топорков А.Г. Формирование шкал времени устройств частотно-временного обеспечения методом структурного анализа // Инженерный журнал: наука и инновации, Москва. 2019. № 8. С. 1-11.
28. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В., Скворцова Ю.И. Численное моделирование распространения пространственно-временных частотно-модулированных радиоволн в анизотропной среде // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 9. С. 40-47.
29. Chirov D.S., Lobova E.O. Wideband HF signals dispersion distortion compensator based on digital filter banks. Theory and approximation // T-Comm. 2020. Т. 14. № 4. С. 57-65.
30. Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V., Statev V.Yu. Classification of personal data security threats in information systems // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 1. С. 56-60.
31. Lerner I.M. Influence of the shape of the amplitude-frequency response on the capacity of communication channel with memory using APSK-N signals, which implements the theory of resolution time // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 10. С. 45-59.
32. Рыжков А.В., Шварц М.Л. Современные тенденции развития систем сетевой синхронизации в сетях электросвязи. От плезихронных до когерентных сетей // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2021. Т. 12. № 4. С. 27-38.
33. Колтунов М.Н., Шварц М.Л. Актуальные вопросы применения оборудования частотно-временного обеспечения на ЕСЭ России // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9. № 2. С. 113-120.
34. Ченакин А.В., Кочемасов В.Н., Пестряков А.В. Состояние и перспективы развития синтезаторов частот СВЧ-диапазона // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9. № 4. С. 132-139.

DEVELOPMENT TRENDS REGARDING COMMUNICATION AND SYNCHRONIZATION SYSTEMS OF COMPLEX INFRASTRUCTURE FACILITIES

Vladimir A. Lokhovin, JSC "Centre for operation of space ground-based infrastructure, Moscow, Russia, v.lohovin@russian.space
Mikhail L. Schwartz, Moscow Technical University of communications and Informatics, Moscow, Russia, mschwartz@smsync.ru
Anatoliy V. Ryzhkov, Moscow Technical University of communications and Informatics, Moscow, Russia, ryzkov.anatoly@yandex.ru

Abstract

The article explores the broader aspects of constructing synchronization systems of modern industrial, transport, and energy infrastructure facilities built with extensive use of telecommunications and information technologies. The authors emphasize the excessive dependence on Global Navigation Satellite Systems (GNSS) as the integral component of the link between the master clock of a remote site and the UTC laboratory. The suggestion is to employ the technology of coherent synchronization systems based on fiber-optic transmission systems as an alternative to GNSS. This will lead to a significant improvement in the stability of synchronization systems and the quality of telecommunication services provided, as a result.

Keywords: coherent network, GNSS, time scale, time and frequency synchronization, PTP2.1, SyncE.

References

- [1] G. Panfilo, F. Arias, "The coordinated universal time (UTC)", *Metrologia*. 2019. Vol. 56, no 4, pp. 042001. DOI: 10.1088/1681-7575/ab1e68
- [2] M. I. Vekselman, "Security of GNSS-based synchronization systems. Monitoring the quality of navigation systems," *Radio navigation and time: Proceedings of the JSC Concern VKO "Almaz-Antey"*. 2022. No. 10 (18), pp. 21-28.
- [3] A. N. Burenin, K. E. Legkov, I. V. Levko, "Robust methods of building and improving multidimensional linear and nonlinear regressions," *T-Comm*, 2019, vol. 13, no.3, pp. 44-51. (in Russian)
- [4] A. S. Raguzin, N. G. Gubanov, "Modeling of system time synchronization of information systems of electric grid company," *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2015. no 1(45), pp. 21-28.
- [5] A. K. Kanaev, E. V. Oparin, "Predlozheniia po postroeniiu intellektual'noi si-stemy podderzhki priniatiia reshenii po upravleniiu set'iu takovoi setevoi sinkhronizatsii," *Trudy uchebnykh zavedenii sviazi*. 2017. Vol. 3, no 4, pp. 43-53.
- [6] A. K. Kanaev, E. V. Oparin, E. V. Oparina, "The functional model of the united source of the integrated system of synchronization and delivery of the time scale for a large and distributed technological purpose system," *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 282-289. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-282-289
- [7] V. A. Lokhovin, "Development of time-frequency support for groundbased space infrastructure objects," *Collection of reports of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference "Orbit of youth"*, Tomsk, 2017. TPU Publishing House, 2017, pp. 75-76.
- [8] V. A. Lokhovin, "A new approach to calculating the structure of the unified time system of ground-based spaceport complexes," *Collection of reports of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference "Orbit of youth"*, Perm, 2020. Perm national research polytechnic university Publishing House, 2020. pp. 110-111.
- [9] A. N. Burenin, K. E. Legkov, V. V. Orkin, "Algorithm for adaptive control of information systems under conditions of mass disturbances," *High-tech in space exploration of the Earth*. 2017. Vol. 9. No. 6, pp. 90-95.
- [10] A. N. Burenin, K. E. Legkov, "Security issues of infocommunication systems and special-purpose networks: main threats, methods and means of ensuring comprehensive network security," *H&ES Research*. 2015. Vol. 7. No. 3, pp. 46-61.
- [11] S. V. Kozlov, A. N. Kubankov, "Process foundations of integration and comprehensive development of information, control, robotic, telecommunication systems," *H&ES Research*. 2020. Vol. 12. No. 1. P. 23-31.
- [12] S. V. Pavlov, V. A. Dokuchaev, V. V. Maklachkova, S. S. Mytenkov, "Features of supporting decision making in modern enterprise infocommunication systems," *T-Comm*. 2019. Vol. 13. No. 3, pp. 71-74.
- [13] I. O. Skakun, "Coordinated Universal Time and methods for comparing time scales," *Cosmonautics and rocket science*. 2012. No.4 (69), pp. 60-69.
- [14] L. A. Lipatnikov, "About the method of precise differential positioning (Precise point positioning) and the prospects for its improvement," *Interexpo Geo-Siberia*, Novosibirsk, 2012. Siberian state university of geosystems and technologies Publishing House. 2012. Vol. 7, pp. 48-53.
- [15] V. V. Mitrikas, D. S. Pecherica, I. O. Skakun, V. V. Fedotov, "Comparison of time scales using the PPP method based on measurements of GLONASS system navigation consumers equipment," *Bulletin of Bauman MSTU, Ser. Instrumentation*. 2018. No. 4. pp. 32-44. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-32-44

- [16] I. O. Skakun, "Comparison of time scales using GNSS signals," *Proceedings of MAI*. 2014. No. 73, pp. 26.
- [17] Z. Wu, Y. Zhang, Y. Yang, C. Liang and R. Liu, "Spoofing and Anti-Spoofing Technologies of Global Navigation Satellite System: A Survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 165444-165496, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3022294.
- [18] A. V. Ryzhkov, V. M. Aladin, M. L. Schwartz and A. V. Isupov, "Experience in the Development and Implementation of Time-Frequency Synchronization Systems on Telecommunications", *2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Arkhangelsk, Russia, 2022, pp. 1-7, DOI: 10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840924.
- [19] R. I. Balaev, "Sovremennye trebovaniia k obespecheniiu setei sviazi novogo pokoleniia etalonnymi signalami vremeni i chastoty," *Al'manakh sovremennoi metrologii*. 2021. no 4(28), pp. 109-114.
- [20] Arai Kaoru, Murakami Makoto, "High-accuracy Time-synchronization Technology for Low-latency, High-capacity Communications in the 5G and Beyond 5G eras," *NTT Technical Review*. 2021. 19. 85-92. DOI:10.53829/ntr202112gls
- [21] A. V. Ryzhkov, and M. L. Schwartz, "Modern Trends in the Development of Network Synchronization Systems. From Plesiochronous to Coherent Networks", *T-Comm*. 2021. Vol. 15. No.7, pp. 14-22.
- [22] A. V. Ryzkov, M. L. Schwartz, "Ways of forming a precision time scale of the national communication network," *T-Comm*. 2020. Vol. 14. No 2. pp. 17-24. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-2-17-24.
- [23] A. V. Ryzkov, M. L. Schwartz, "Prerequisites for the creation of a coherent public communication network – the basis of end-to-end digital technologies," *T-Comm*. 2021. vol. 15, no. 7, pp. 14-22. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-7-14-22
- [24] M. L. Schwartz, V. M. Aladin, and A. V. Ryzhkov, "Perspective Equipment of Primary Reference Time and Clock for Synchronization Systems," *2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Arkhangelsk, Russian Federation, 2022, pp. 1-6, DOI: 10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840945.
- [25] S. Yu. Medvedev, K. G. Mishagin, A. V. Ryzhkov, B. A. Sakharov, M. L. Schwartz. "Time scale formation in a coherent public communication network," *T-Comm*. 2023. vol. 17, no. 12, pp. 29-35. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-12-29-35
- [26] L. Cosart, H. Imlau, G. Zampetti, "cnPRTC – Coherent Network Primary Reference Time Clock: A Geographically Distributed Resilient Timescale for Telecommunications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 4, pp. 28-32, April 2023, DOI: 10.1109/MCOM.001.2200397.
- [27] S. D. Petrov, I. V. Chekunov, V. A. Usachev, A. G. Toporkov, "Formation of the scale of time of devices of frequency-time supporting by a method of structural analysis," *Engineering Journal: Science and Innovation*. Moscow. 2019. No. 8, pp. 1-11. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-8-1901
- [28] A. S. Kryukovsky, D. S. Lukin, D. V. Rastyagaev, Yu. I. Skvortsova, "The numerical modeling of propagation of space-time frequency-modulated radiowaves in ionospheric to medium." *T-Comm*. 2015. Vol. 9. No. 9, pp. 40-47.
- [29] D. S. Chirov, E. O. Lobova, "Wideband HF signals dispersion distortion compensator based on digital filter banks. Theory and approbation," *T-Comm*. 2020. Vol. 14. No. 4, pp. 57-65.
- [30] V. A. Dokuchaev, V. V. Maklachkova, V. Yu. Statev, "Classification of personal data security threats in information systems," *T-Comm*. 2020. Vol. 14. No. 1, pp. 56-60.
- [31] I. M. Lerner, "Influence of the shape of the amplitude-frequency response on the capacity of communication channel with memory using APSK-N signals, which implements the theory of resolution time," *T-Comm*. 2019. Vol. 13. No. 10, pp. 45-59.
- [32] A. V. Ryzhkov, and M. L. Schwartz, "Modern Trends in the Development of Network Synchronization Systems. From Plesiochronous to Coherent Networks," *Systems of signal synchronization, generation and processing*. 2021. Vol. 12. No. 4, pp. 27-38.
- [33] M. N. Koltunov, M. L. Schwartz, "Current issues of using time-frequency control equipment on the Unified State Network of Russia," *Systems of signal synchronization, generation and processing*. 2018. Vol. 9. No. 2, pp. 113-120.
- [34] A. V. Chtyfkin, V. N. Kochemasov, A. V. Pestryakov, "Status and development prospects of microwave frequency synthesizers," *Systems of signal synchronization, generation and processing*. 2018. Vol. 9. No. 4, pp. 132-139.