

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ СИНХРОНИЗАЦИИ В СЕТЯХ СВЯЗИ И ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТАХ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

С.Б. Смагулов

Томский политехнический университет, Томск, Россия

РГП «Казахстанский институт стандартизации и метрологии», Астана, Казахстан

Аннотация

Современные телекоммуникационные сети и инфраструктурные объекты Республики Казахстан предъявляют всё более высокие требования к точности синхронизации времени и частоты в условиях цифровизации, внедрения сетей 5G/6G, интеллектуальных энергетических систем, транспорта и промышленного интернета вещей. Цель исследования – определить перспективы развития систем синхронизации в Казахстане, выявить направления модернизации и оценить их влияние на устойчивость критической инфраструктуры.

Методология базируется на анализе международных стандартов ITU-T и IEEE (включая G.827x, IEEE 1588 PTP, SyncE), научных публикаций, практик ведущих стран, а также сравнительном анализе текущего состояния телекоммуникационного сектора Казахстана. Рассматривались традиционные источники синхронизации (GNSS), волоконно-оптическая передача эталонных сигналов, атомные стандарты частоты, беспроводные методы (Over-the-Air) и перспективные технологии квантовой нелинейной синхронизации.

Результаты показывают, что переход к когерентным системам синхронизации, использующим многоуровневую архитектуру (PRTC/cnPRTC, оптические резервные каналы, PTP, SyncE, OTA), позволит существенно повысить отказоустойчивость и снизить зависимость от GNSS. Это особенно важно для энергетики, транспорта, финансового сектора и промышленных систем, где микросекундная точность критична для безопасности и стабильности работы.

Ценность исследования заключается в адаптации международного опыта к условиям Казахстана, формировании предложений по созданию национальной системы частотно-временного обеспечения и рекомендаций по нормативной базе. Практическое значение – возможность использования результатов при проектировании и модернизации телекоммуникационных и инфраструктурных систем страны.

Ключевые слова: синхронизация времени и частоты, GNSS, PTP, SyncE, White Rabbit, когерентная сеть, квантовая синхронизация, UTC(KZ).

Введение

В условиях цифровой трансформации экономики и стремительного внедрения передовых телекоммуникационных технологий синхронизация времени и частоты выступает одним из базовых факторов устойчивости информационной инфраструктуры [1, 2]. Развитие сетей связи нового поколения (5G/6G), интеллектуальных энергетических комплексов, транспорта и промышленного интернета вещей (IIoT) предъявляет к системам синхронизации беспрецедентно высокие требования – вплоть до

микросекундной и субмикросекундной точности.

Для Республики Казахстан данное направление приобретает особую актуальность. Это связано с необходимостью обеспечения бесперебойного функционирования критически важных инфраструктур, повышения уровня киберустойчивости экономики, а также интеграции в международные телекоммуникационные и метрологические системы [6, 7].

Несмотря на широкое использование глобальных навигационных спутниковых систем

(GNSS) в качестве источников эталонного времени, практика эксплуатации показывает уязвимость подобных решений к радиопомехам, влиянию космической погоды и преднамеренному вмешательству. В связи с этим в мировой практике развивается переход к когерентным системам синхронизации, которые опираются на многоуровневую архитектуру и включают атомные стандарты, волоконно-оптическую передачу эталонных сигналов и защищённые сетевые протоколы.

Целью данного исследования является анализ перспектив развития систем синхронизации в телекоммуникационных сетях и инфраструктурных объектах Республики Казахстан, выявление мировых тенденций и разработка предложений по их адаптации к национальным условиям.

Материалы и методы

Методологическая основа исследования включает анализ международных стандартов IEEE и ITU-T, определяющих параметры точности и стабильности синхронизации в современных телекоммуникационных системах [2, 8]. В качестве базы использованы научные публикации ведущих зарубежных и отечественных исследователей, а также нормативные документы Республики Казахстан, регламентирующие информационную безопасность и метрологическое обеспечение [7, 9, 19, 20].

Применённый подход основан на:

сравнительном анализе международных и национальных стандартов, применимых к сетям связи и объектам критической инфраструктуры; обзоре мировой практики внедрения когерентных сетей синхронизации и резервирования GNSS;

экспертной оценке применимости современных решений (PTP, SyncE, White Rabbit, Over-the-Air, атомные стандарты) в условиях Казахстана;

анализе рисков киберугроз и оценке протоколов защиты времени (NTP, PTP, NTS).

В качестве гипотезы была выдвинута необходимость перехода от традиционных методов синхронизации, основанных исключительно на глобальных навигационных спутниковых системах (GNSS), к когерентным сетям, использующим волоконно-оптические каналы передачи эталонных сигналов, протоколы точного времени и локальные атомные стандарты частоты.

Обзор литературы

Задача синхронизации времени и частоты является одним из центральных направлений развития телекоммуникаций. Переход от плездохронных систем (PDH) к когерентным архитектурам сопровождался внедрением протоколов точного времени и новых стандартов, обеспечивающих субмикросекундную точность [11, 17].

Одним из ключевых направлений современных исследований является изучение процедур синхронизации в сетях нового поколения. Tuninato и соавт. (2023) проанализировали сигналы синхронизации 5G NR (PSS, SSS, PBCH), выявив ограничения, связанные с фазовыми смещениями и задержками в канале [11]. Для технологий URLLC и Time-Sensitive Networking (TSN) критична микросекундная и даже наносекундная точность [13-15].

В области беспроводной синхронизации значимый вклад внесли исследования Shi и соавт. (2021), экспериментально подтвердившие возможность реализации Over-the-Air синхронизации с точностью порядка 1 мкс, что соответствует требованиям промышленного интернета вещей (IIoT) [13]. Аналогично, Mahmood и коллеги (2018, 2019) показали потенциал беспроводной синхронизации в периферийных сегментах сетей 5G [14, 15].

В качестве резервных решений активно развивается направление передачи эталонных частотно-временных сигналов по оптоволоконным каналам. Wang и соавт. (2023) продемонстрировали, что такие методы обеспечивают стабильность даже при недоступности GNSS, что делает их перспективными для критической инфраструктуры [12].

Отдельное направление связано с интеграцией синхронизации и позиционирования. Koivisto и соавт. (2016) предложили метод объединённой оценки времени и координат на основе расширенного фильтра Калмана (EKF), обеспечивший субметровую точность и согласование сетевых часов в условиях ультраплотных сетей [4, 16].

Базовые характеристики систем синхронизации закреплены в рекомендациях ITU-T и IEEE. Так, Arai и Murakami (2016) систематизировали подходы к фазовой и временной синхронизации (PTP, SyncE), подчеркнув значимость серии G.827x [17]. Последние обновления, включая ITU-T G.8272.2 (2024), фиксируют требования к когерентным эталонным часам сnPRTC [8].

Особое внимание привлекают перспективные методы квантовой нелинейной синхронизации (QNS). Публикации в Nature Physics (2025) показывают, что данные технологии способны обеспечить фемтосекундную точность, формируя основу для сетей 6G и квантового интернета [18].

Исторически развитие синхронизации прошло путь от внедрения SONET/SDH и протокола IEEE 1588 (PTP), которые по-прежнему широко применяются в телекоммуникационных и финансовых системах [19]. Результаты и обсуждение

Анализ современного состояния показал, что операторы связи в Республике Казахстан преимущественно используют глобальные навигационные спутниковые системы GNSS (GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo) в качестве основных источников эталонного времени и частоты [3]. Данный подход соответствует

мировой практике, однако он уязвим к радиопомехам, солнечной активности и преднамеренным атакам (спуфинг, джамминг). Это предопределяет необходимость внедрения резервных и когерентных систем синхронизации.

1. Сравнение протоколов синхронизации

Современные телекоммуникационные сети используют широкий спектр технологий для распределения эталонного времени и частоты. Наиболее распространёнными являются протоколы NTP (Network Time Protocol), PTP (Precision Time Protocol, IEEE 1588), а также перспективная технология White Rabbit (WR) – расширение PTP, обеспечивающее субнаносекундную точность.

На рисунке 1 показаны области применения различных технологий синхронизации, а сравнительные характеристики представленных технологий приведены в таблице 1

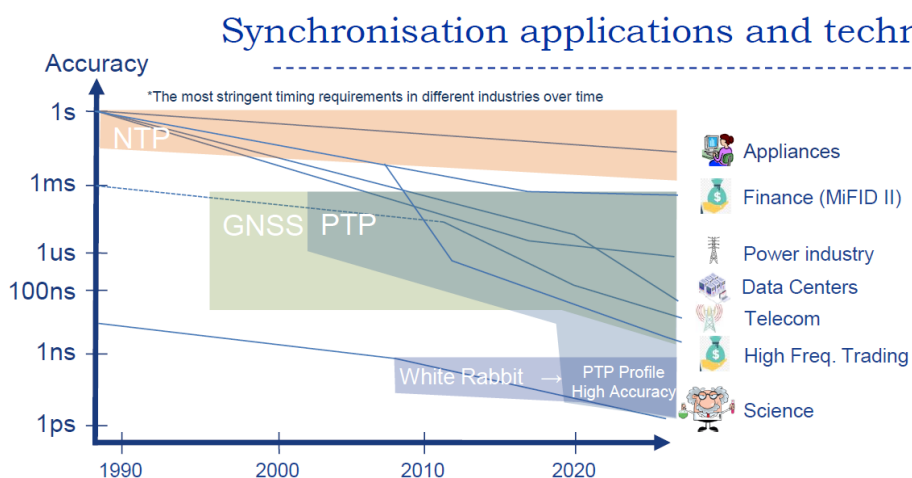


Рисунок 1 – Приложения и технологии для синхронизации

Таблица 1 – Сравнительные характеристики NTP, PTP и White Rabbit (WR)

Технология	Поддержка сети	Особенности	Надёжность и безопасность	Производительность
NTP (Network Time Protocol)	Не требует поддержки сети	Лёгкий в использовании, надёжный, фактически бесплатный	Ограниченные механизмы защиты; уязвим к задержкам в сети	Миллисекундный уровень
PTP (Precision Time Protocol)	Может работать без поддержки сети, но оптимален при полной поддержке	Поддержка множества отраслевых профилей; высокая гибкость	Резервирование и защита ограничены, реализация сложнее	От микросекунд до суб-микросекунд
WR (White Rabbit, расширение PTP)	Требует полной поддержки сети	Необходим канал 1 Gbps по двунаправленному оптоволокну; совместим с профилем PTP	Разрабатываются механизмы резервирования; повышенные требования к инфраструктуре	Субнаносекундный уровень

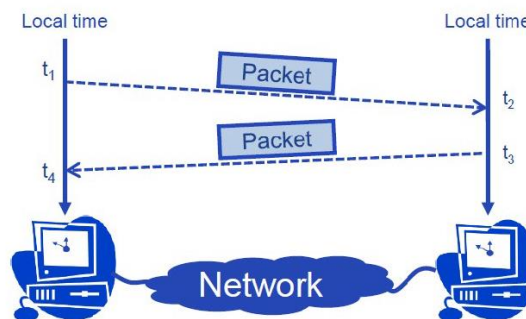
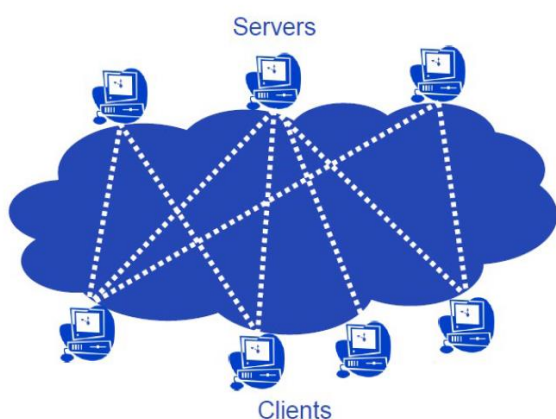
NTP является простым и широко применяемым решением для синхронизации серверов и инфраструктуры информационно-коммуникационных технологий (ИКТ-инфраструктуры). Его ключевым преимуществом является низкая стоимость и отсутствие необходимости в специализированном оборудовании. Однако производительность NTP ограничивается миллисекундным уровнем точности, что делает его непригодным для задач 5G/6G и критических инфраструктур [21].

Протокол PTP (IEEE 1588-2019) обеспечивает

существенно более высокую точность (от микросекунд до субмикросекунд).

Он активно используется в энергетике (Smart Grid), транспортных системах, финансовых транзакциях и телекоммуникациях. Его эффективность во многом зависит от качества сетевой инфраструктуры, наличия аппаратной поддержки и реализации механизмов защиты [22].

На рисунках 2 и 3 представлены базовые схемы работы протоколов NTP и PTP соответственно.



$$\text{delay} = [(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)] / 2$$

$$\text{offset} = t_2 - (t_1 + \text{delay})$$

Рисунок 2 – Схема работы протокола NTP

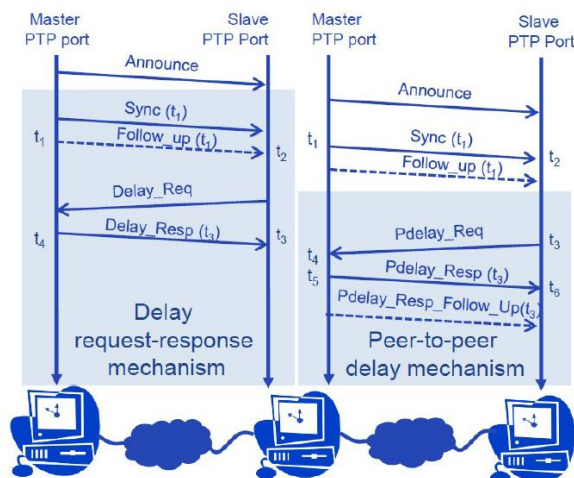
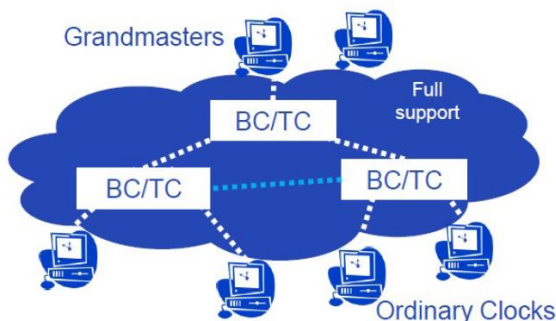


Рисунок 3 – Схема работы протокола PTP

Наиболее передовой технологией синхронизации является White Rabbit (WR), обеспечивающая точность на уровне единиц наносекунд. Достижение такой точности становится возможным благодаря использованию двунаправленного оптоволоконного канала со скоростью передачи данных 1 Gbps. Ограничением выступает

необходимость специализированной инфраструктуры, что снижает применимость WR в массовых телекоммуникационных сетях. Тем не менее, технология успешно используется в наукоёмких проектах (например, CERN) и в перспективе может стать оптимальным решением для создания когерентных телекоммуникационных сетей национального уровня, включая Казахстан

[17].

Для систем нового поколения также применяются профили синхронизации ITU-T (SyncE и telecom PTP), а перспективные

исследования касаются технологии White Rabbit (WR), обеспечивающей субнаносекундную точность (рисунки 4-5).

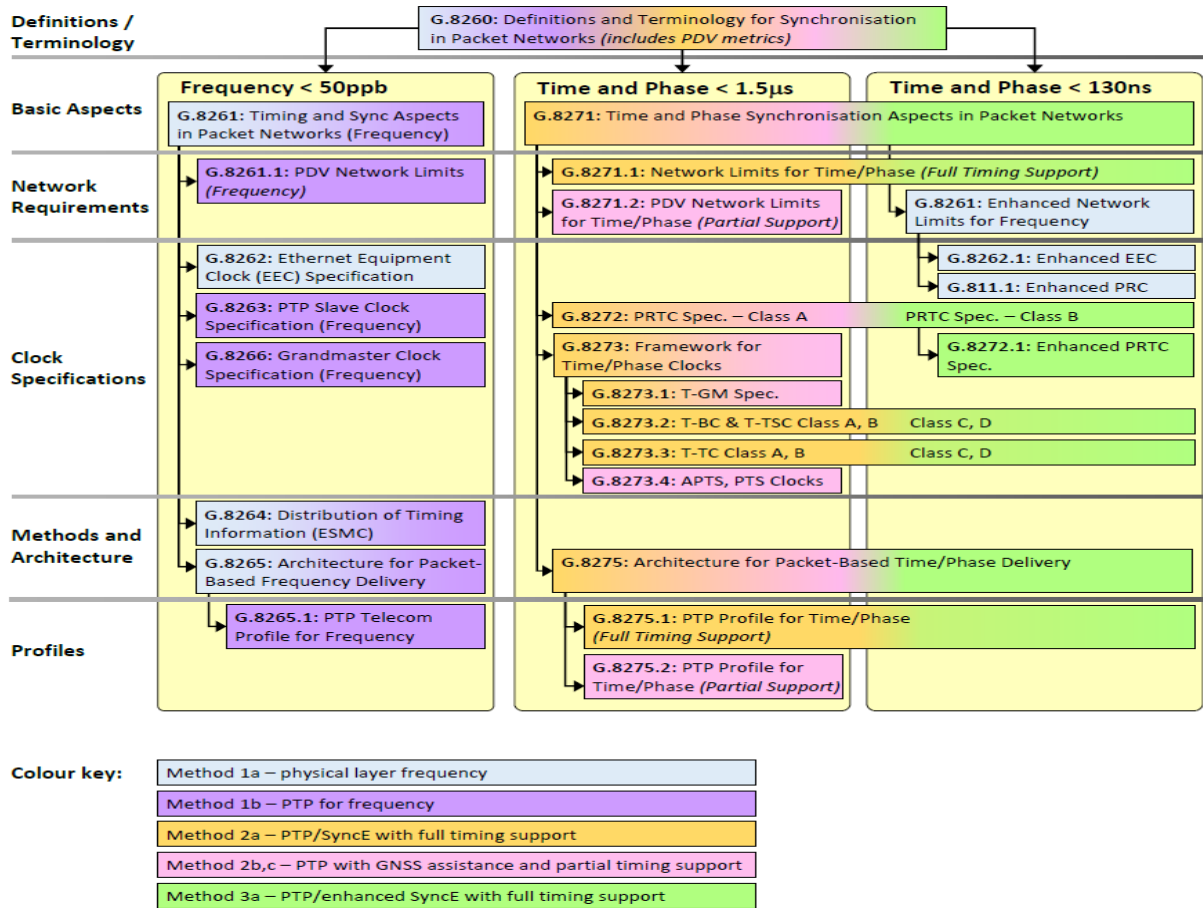


Рисунок 4 – Профили SyncE и ITU-T telecom PTP

White Rabbit = PTP + L1 syntonisation + phase detection + asymmetry correction

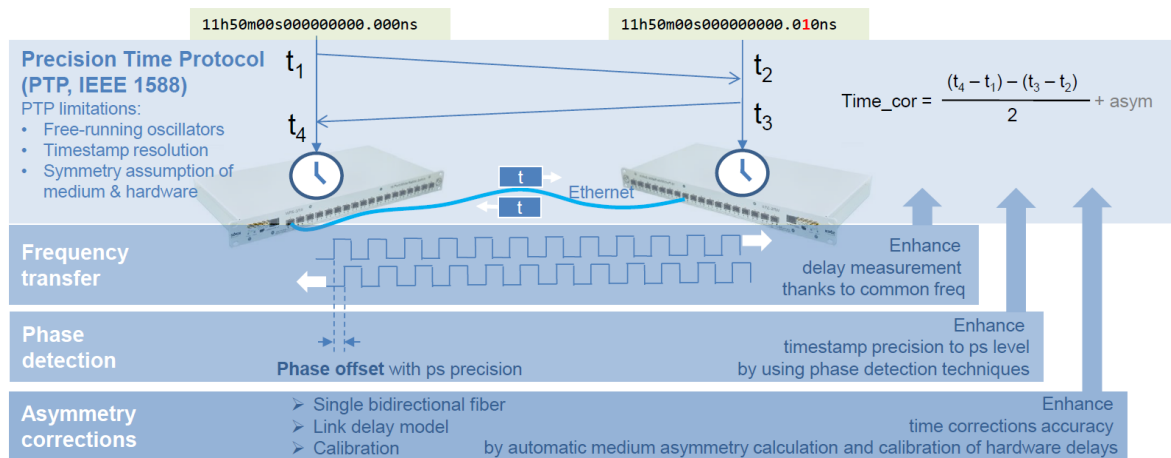


Рисунок 5 – Принципиальная схема White Rabbit

Производительность технологии White Rabbit в длинных цепочках показана на рисунке 6, а на рисунке 7 приведено сравнение синхронизации и синтонизации PTP L1.

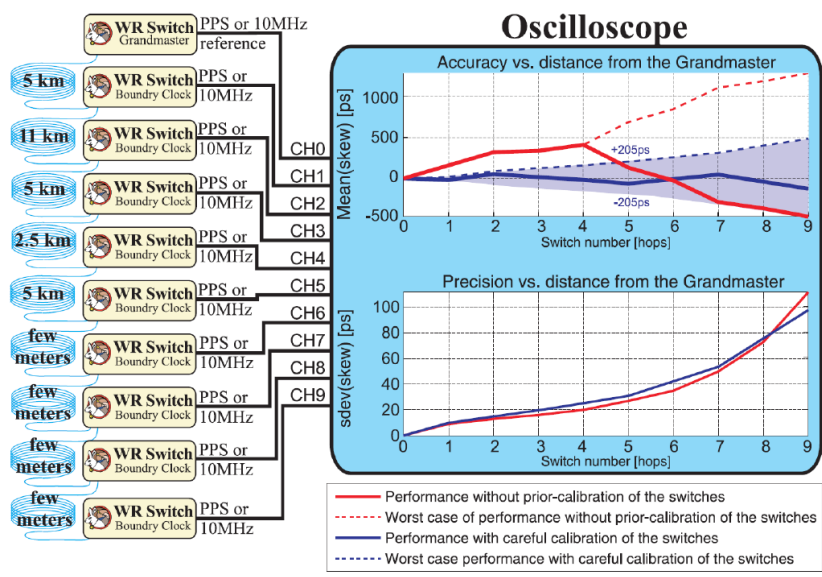


Рисунок 6 – Производительность технологии White Rabbit (WR) в длинной цепочке

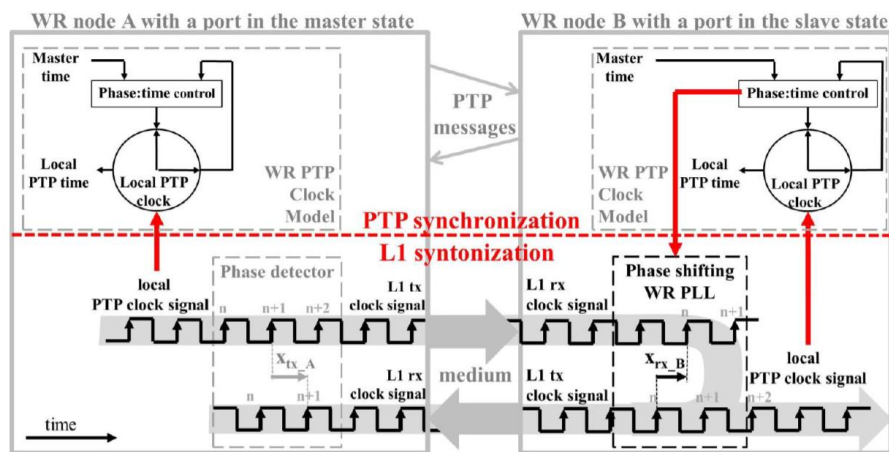


Рисунок 7 – Сравнение PTP синхронизации и синтонизации L1

2. Надежность и концепция альтернативных систем позиционирования, навигации и времени

Традиционно системы синхронизации строились на предположении, что сигналы GNSS являются достоверными и непрерывно доступными. Ведущие сетевые часы синхронизировались с

опорными сигналами GNSS и использовались для формирования шкалы времени сетевых часов (рисунок 8). Однако опыт эксплуатации показывает уязвимость такого подхода: GNSS-сигналы подвержены воздействию радиопомех, солнечной активности, а также преднамеренным атакам – спуфингу и джаммингу [25, 26].

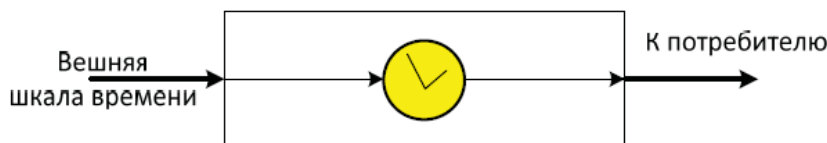


Рисунок 8 – Традиционная система формирования шкалы времени ведущих сетевых часов

Для решения этой проблемы в мировой практике активно развивается концепция APNT (**Assured Positioning, Navigation and Timing**), которая предполагает использование многоуровневых резервных источников времени. Ключевым элементом APNT является применение **высокостабильных хранителей времени** (цезиевых и водородных стандартов), способных поддерживать заданную точность синхронизации в условиях длительного отсутствия GNSS.

Общая архитектура APNT-систем включает (рисунок 9):

- приём сигналов от нескольких навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou) с контролем согласованности;
 - локальные атомные стандарты (водородные и цезиевые), обеспечивающие автономное хранение времени;
 - резервные каналы передачи эталонных сигналов (оптоволоконные линии, наземные радиосистемы);
- протоколы защиты и мониторинга целостности временных меток

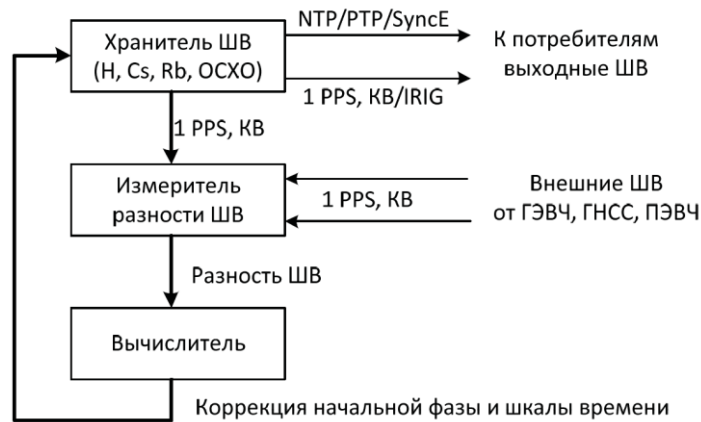


Рисунок 9 – Структура ведущих сетевых часов, основанных на технологии APNT

Применение концепции APNT позволяет повысить отказоустойчивость телекоммуникационных и инфраструктурных систем, а также обеспечивает выполнение международных требований к надёжности критических сетей.

3. Инфраструктурные объекты и телекоммуникационные комплексы

Для объектов критической инфраструктуры (энергосистемы, транспортные узлы, промышленные предприятия, банковский сектор) задачи синхронизации времени и частоты имеют особое значение. Точность временных меток

определяет безопасность технологических процессов, устойчивость распределённых вычислительных систем и корректность финансовых транзакций.

Системы единого и точного времени (СЕТВ), внедряемые на таких объектах, обеспечивают формирование, хранение и распределение эталонных сигналов. Традиционно основным источником СЕТВ выступают GNSS-сигналы (рисунок 10). Однако их уязвимость к внешним факторам – от атмосферных возмущений до намеренных атак – ограничивает надёжность подобных решений в условиях эксплуатации.

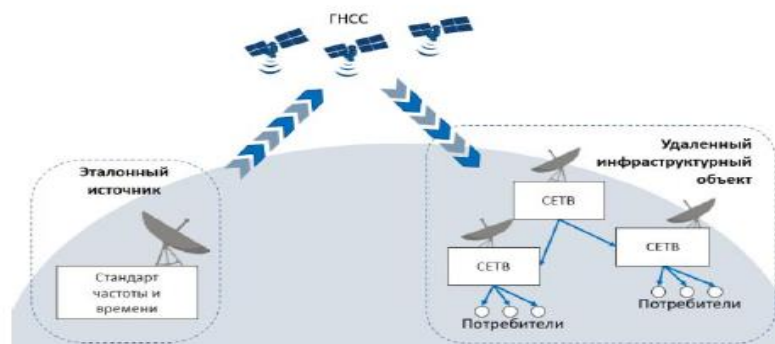


Рисунок 10 – Схема привязки местной ШВ к ШВ ГЭВЧ по сигналам ГНСС (прямой метод)

Современные инфраструктурные комплексы переходят к комбинированной архитектуре, включающей:

- GNSS как основной источник высокоточной синхронизации;
- локальные атомные стандарты частоты (цезиевые и водородные), обеспечивающие автономное хранение времени;

- оптоволоконные каналы передачи эталонных сигналов, выступающие резервом на случай потери спутниковой синхронизации;
- сетевые протоколы точного времени (PTP, SyncE) для распределения временной информации внутри корпоративных и отраслевых систем.

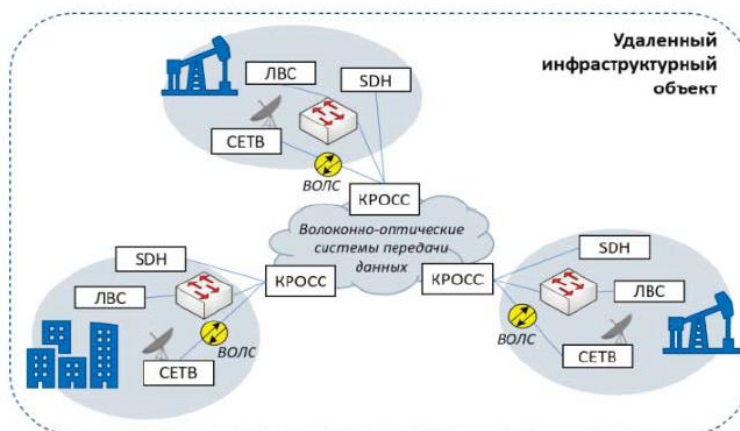


Рисунок 11 – Упрощенная схема сложного телекоммуникационного комплекса

На уровне региональных телекоммуникационных комплексов (рисунок 11) целесообразно строить многоуровневые системы, где магистральные узлы оснащаются когерентными первичными эталонными часами (cpPRTC), а ведомственные сегменты получают синхронизацию через доверенные профили PTP и NTS.

Таким образом, для Казахстана приоритетным направлением является интеграция СЕТВ в энергетике, транспорте и цифровой инфраструктуре, где микросекундная точность критична для обеспечения безопасности и киберустойчивости.

4. Перспективы когерентных сетей

Одним из ключевых направлений развития современных телекоммуникационных систем является внедрение когерентных сетей синхронизации, использующих волоконно-оптические каналы передачи эталонных сигналов. В отличие от традиционной архитектуры, полностью зависящей от GNSS, когерентные сети обеспечивают:

- повышенную устойчивость к внешним воздействиям и радиопомехам;
- возможность резервирования источников времени;
- масштабируемость и интеграцию в национальную систему частотно-временного обеспечения.

Сравнительный анализ показывает, что

волоконно-оптическая передача эталонных сигналов (FOT) и когерентные эталонные часы (cpPRTC) способны гарантировать допустимые уровни фазовой синхронизации даже при длительном отсутствии GNSS [8]. Это делает их стратегически важным элементом для энергетики, финансовых центров и транспортных узлов.

Перспективные исследования в данной области включают:

- развитие технологии White Rabbit (WR), позволяющей достичь субнаносекундной точности и уже применяемой в научных проектах мирового уровня (например, CERN);
- интеграцию когерентных систем в сетевые инфраструктуры 5G/6G, где требуются минимальные задержки и высокая устойчивость синхронизации;
- разработку архитектур распределённых когерентных сетей, включающих пространственно разнесённые эталонные часы, соединённые оптоволоконными каналами.

В условиях Казахстана развитие когерентных сетей может стать основой для построения Национальной системы частотно-временного обеспечения, объединяющей государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭВЧ), ведомственные сети и региональные телекоммуникационные комплексы.

Таким образом, переход к когерентной

архитектуре позволит:

- снизить зависимость от GNSS;
- повысить отказоустойчивость критической инфраструктуры;

- создать условия для интеграции будущих технологий – квантовой синхронизации и сетей 6G.
- Сравнительная характеристика различных источников синхронизации представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика источников синхронизации

Источник синхронизации	Обозначение	Преимущества	Ограничения / риски	Применимость в РК
Глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS)	GNSS	Высокая точность, глобальная доступность	Уязвимость к помехам и спуфингу, зависимость от внешних систем	Используется большинством операторов связи
Волоконно-оптическая передача эталонного сигнала	FOT	Высокая стабильность, защита от помех, резерв GNSS	Требует развитой инфраструктуры	Перспективна для магистральных сетей
Атомные стандарты частоты	AF	Автономность, высокая надёжность	Высокая стоимость, обслуживание	Ключевые опорные узлы
Протокол точного времени (IEEE 1588 PTP)	PTP	Субмикросекундная точность	Требует качественной сетевой инфраструктуры	Рекомендуется для операторов связи
Синхронный Ethernet	SyncE	Стабильная передача частоты	Нужна поддержка оборудования	Перспективен для сетей 5G
Over-the-Air синхронизация	OTA	Синхронизация без кабельных каналов	Ограниченная точность	Перспективна в мобильных сетях

Информационная безопасность и киберустойчивость систем синхронизации

Зависимость современных телекоммуникационных и инфраструктурных систем от сигналов GNSS создаёт серьёзные риски киберугроз. Наиболее опасными факторами являются:

- джамминг – преднамеренное создание радиопомех, блокирующих приём сигналов GNSS;
- спуфинг – подмена навигационных сообщений с целью искажения временных меток;
- задержки и манипуляции в протоколах времени (NTP, PTP).

Эти угрозы уже неоднократно фиксировались в международной практике, включая инциденты, влияющие на авиацию, морскую навигацию и энергетические системы [25, 26].

Для повышения устойчивости систем синхронизации в Казахстане необходимо внедрение многоуровневой архитектуры

безопасности, включающей:

1. Протокольную защиту

- NTP: переход к стандарту NTS (Network Time Security, RFC 8915), обеспечивающему аутентификацию и защиту от подмены сообщений на базе TLS [22].
- PTP: использование профиля IEEE 1588-2019, в котором предусмотрены механизмы криптографической защиты (Security TLVs), аутентификация и контроль целостности сообщений [23].

• Когерентные сети: выполнение требований ITU-T G.8272.2 (2024), где cnPRTC гарантируют допустимые уровни фазовой синхронизации даже при длительной потере GNSS [8].

2. Многоуровневое резервирование

- приём сигналов от нескольких спутниковых систем (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou) с контролем согласованности;
- использование Galileo OSNMA, предоставляющего аутентифицированные навигационные сообщения (введено в эксплуатацию в 2023 г.) [21];

- внедрение локальных атомных стандартов частоты на ключевых узлах;
- передача эталонных сигналов по оптоволоконным каналам связи;
- системы мониторинга целостности времени (time integrity monitoring) с автоматическим переключением на резервные источники.

3. Архитектурный принцип «Trusted Time»

Согласно нормативным документам Республики Казахстан, государственные ИКТ-ресурсы должны синхронизироваться с ГЭВЧ, воспроизводящим национальную шкалу времени UTC(KZ) [19, 20]. Это означает, что все опорные источники времени должны иметь прямую привязку к ГЭВЧ и независимые каналы резервирования.

Таким образом, обеспечение киберустойчивости систем синхронизации требует комплексного подхода: от модернизации протоколов и внедрения аутентифицированных сообщений до создания резервных каналов передачи эталонного времени.

Дорожная карта для Казахстана

Анализ международного опыта и особенностей телекоммуникационного сектора Республики Казахстан показывает необходимость перехода от фрагментарных решений к национальной стратегии развития систем синхронизации. Предлагаемая дорожная карта включает несколько уровней:

1. Магистральный уровень

- внедрение когерентных эталонных часов (спPRTC) в узлах верхнего уровня;
- организация оптоволоконных резервных каналов для передачи эталонных сигналов, параллельно с использованием GNSS;
- распределение эталонного времени и частоты по протоколам SyncE и PTP.

2. Ведомственный уровень

- переход от традиционного NTP к его защищённой версии NTS;
- использование профилей PTP (IEEE 1588-2019) с криптографической защитой и сегментацией доменов времени;
- формирование «доверенных границ» для исключения влияния неконтролируемых источников синхронизации.

3. Периферийные сети (URLLC, TSN, PoT)

- внедрение аппаратных меток времени и синхронизации в рамках IEEE 1588-2019;

- применение политик быстрого failover при потере сигналов GNSS;
- использование локальных эталонных генераторов на базе цезиевых или рубидиевых стандартов частоты.

4. Мониторинг и управление

- внедрение систем сквозного контроля состояния эталонных часов (monitoring dashboard);
- анализ метрик PDV и асимметрии задержек (PDV-asymmetry);
- журналирование и аудит корректности временных меток в прикладных подсистемах (финансы, энергетика, транспорт).

Таким образом, дорожная карта предполагает многоуровневое резервирование с интеграцией магистральных, ведомственных и периферийных сегментов в единую архитектуру.

Для Республики Казахстан это позволит:

- повысить устойчивость цифровой инфраструктуры к внешним воздействиям;
- снизить зависимость от зарубежных спутниковых систем;
- обеспечить точность и надёжность времени в критически важных отраслях – энергетике, транспорте, оборонном секторе и финансах.

Практическая ситуация в Казахстане

По состоянию на август 2025 года к услуге сетевой синхронизации, предоставляемой РГП «КазСтандарт» (доступ к NTP-серверам через Интернет), подключено 14 организаций. Однако для критически важной инфраструктуры этого объёма недостаточно: подобная архитектура обеспечивает лишь базовый уровень синхронизации и не учитывает требования к киберустойчивости, фазовой синхронизации и резервированию источников времени.

Основные проблемы текущей ситуации:

- доминирование GNSS как единственного источника синхронизации, что повышает уязвимость к внешним воздействиям (спуфинг, джамминг, атмосферные помехи);
- ограниченное внедрение протоколов точного времени (PTP) и защищённых решений на базе NTS;
- отсутствие масштабируемой системы мониторинга и анализа временных меток;
- фрагментарное применение локальных эталонных генераторов и отсутствие единой политики по резервированию.

Для решения этих проблем необходимо:

1. расширить использование ведомственных каналов синхронизации, основанных на NTS и

PTP, с привязкой к национальной шкале времени UTC(KZ);

2. внедрить оптоволоконные резервные каналы передачи эталонных сигналов между основными телекоммуникационными узлами;

3. оснастить ключевые узлы локальными атомными стандартами частоты (водородные и цезиевые);

4. организовать централизованный мониторинг состояния эталонных часов и синхронизации на базе КазСтандарта.

В долгосрочной перспективе Республика Казахстан должна перейти к созданию Национальной когерентной сети синхронизации, объединяющей ГЭВЧ, отраслевые и региональные сети. Это позволит обеспечить устойчивую и защищённую работу цифровой инфраструктуры страны, снизить зависимость от GNSS и подготовить основу для внедрения технологий будущего – сетей 6G и квантового интернета.

Перспективы развития систем связи и синхронизации региональных сетей и инфраструктурных объектов

1. Архитектура когерентных сетей

Архитектура когерентных сетей связи общего пользования (КССОП) рассматривается как одно из стратегических направлений развития национальной инфраструктуры синхронизации. В отличие от традиционных систем, опирающихся исключительно на GNSS,

КССОП формируется на базе распределённых когерентных первичных эталонных часов (кгПЭВЧ), объединённых сетью волоконно-оптических линий.

Ключевая особенность КССОП заключается в многоисточниковой структуре, где временная шкала формируется на основе сигналов от:

- локальных атомных стандартов (цезиевых и водородных);
- сигналов GNSS с механизмами аутентификации (например, Galileo OSNMA);
- эталонных серверов времени (PTP, NTP/NTS);
- соседних когерентных узлов (кгПЭВЧ).

Такой подход обеспечивает:

- устойчивость к сбоям и помехам благодаря многоканальной обработке сигналов;
- отказоустойчивость за счёт автоматического исключения некорректных источников;
- масштабируемость и интеграцию в национальную систему частотно-временного обеспечения;
- возможность формирования единой шкалы времени на территории страны.

На рисунках 12 и 13 представлены упрощённая схема подключения инфраструктурного объекта к КССОП и структурная схема элемента транспортной сети с аппаратной поддержкой протокола PTP.

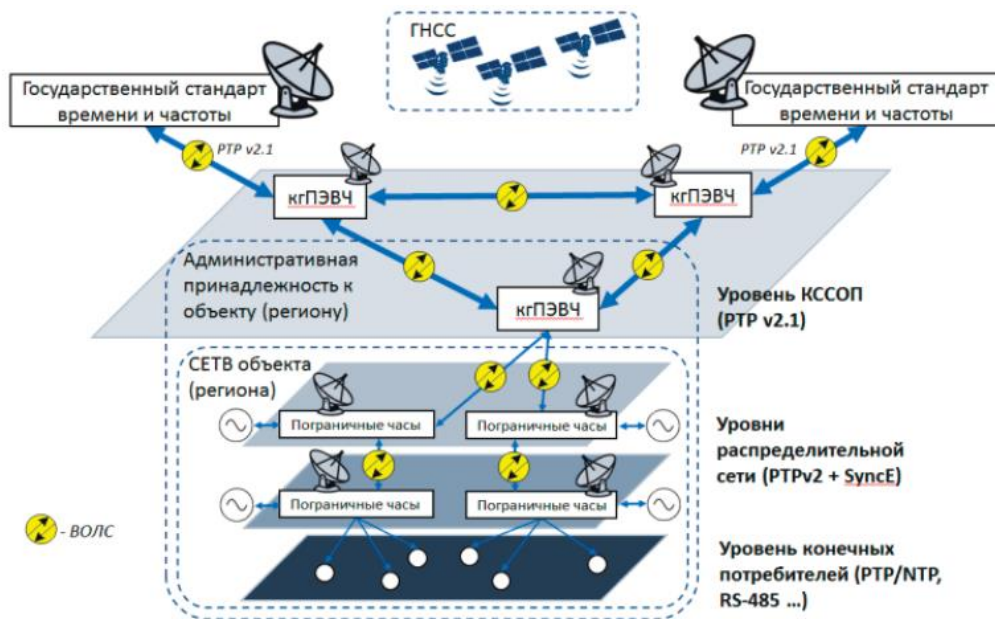


Рисунок 12 – Структурная схема включения инфраструктурного объекта в когерентную сеть связи общего пользования

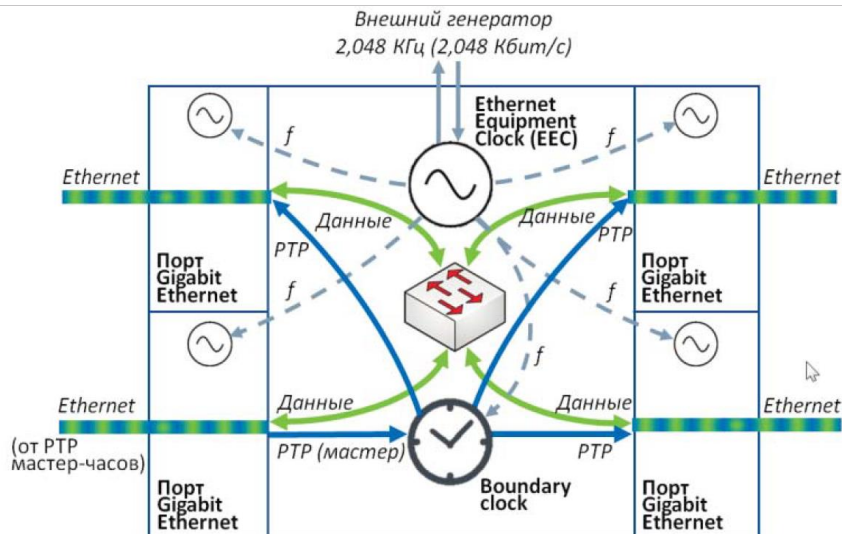


Рисунок 13 – Структурная схема элемента транспортной сети с аппаратной поддержкой протокола PTPv.2

В условиях Казахстана внедрение КССОП позволит интегрировать региональные и отраслевые сети в единую архитектуру, обеспечив привязку к национальной шкале времени UTC(KZ). Это создаст основу для:

- развития защищённой цифровой инфраструктуры;
- повышения устойчивости телекоммуникационных систем;
- подготовки к переходу на новые технологические уклады (5G/6G, квантовые сети).

2. Технические требования

Для эффективного функционирования когерентных сетей верхнего уровня (КСВУ) требуется реализация строгих технических требований, обеспечивающих как высокую точность синхронизации, так и её киберустойчивость.

Ключевые положения:

1. Аппаратная поддержка PTPv2.1 (IEEE 1588-2019)

Только при аппаратной обработке временных меток на уровне сетевого оборудования возможна синхронизация с точностью до единиц наносекунд.

2. Характеристики когерентных эталонных часов (кГПЭВЧ)

Каждый узел верхнего уровня должен включать:

- атомный стандарт частоты, соответствующий ITU-T G.811.1;
- приёмник GNSS-сигналов с возможностью аутентификации и встроенным сервером PTP;

- интерфейсы приёма эталонных сигналов от соседних когерентных узлов и Государственной службы времени и частоты (ГСВЧ);
- формирователь групповой шкалы времени (ensemble time scale);
- выходные интерфейсы: 1PPS, PTP, NTP/NTS, коды времени, эталонные частотные сигналы (например, ТСС 2,048 МГц).

3. Резервирование и отказоустойчивость

- обязательное наличие двух и более независимых источников GNSS;
- использование волоконно-оптических каналов для резервной передачи эталонного времени;
- локальное хранение времени на основе водородных или цезиевых стандартов с длительным удержанием точности.

Таким образом, когерентные эталонные часы (кГПЭВЧ) выполняют роль Telecom Grandmaster (T-GM) для нижестоящих сегментов сети, обеспечивая непрерывность, достоверность и высокую точность временной информации.

3. Перспективы для Казахстана

Применение когерентных технологий в национальных и региональных сетях Республики Казахстан открывает новые возможности для обеспечения устойчивости и безопасности критической инфраструктуры.

Ключевые направления развития включают:

1. Снижение зависимости от GNSS

Введение когерентных эталонных часов и оптоволоконных каналов позволит существенно снизить уязвимость телекоммуникационных систем к спуфингу, джаммингу и другим факторам.

2. Повышение надёжности инфраструктуры

Интеграция когерентных сетей в энергетику, транспорт, финансы и оборонный сектор создаст основу для отказоустойчивой синхронизации, обеспечивающей корректность операций и безопасность технологических процессов.

3. Интеграция с национальной системой частотно-временного обеспечения

Создание сети когерентных эталонных узлов (кгПЭВЧ) на базе существующих центров синхронизации позволит обеспечить единый стандарт времени UTC(KZ) во всех секторах экономики.

4. Подготовка к будущим технологическим укладам

КССОП станет базой для внедрения систем связи 6G, промышленного интернета следующего поколения и квантовых технологий, включая методы квантовой нелинейной синхронизации.

Развитие когерентной архитектуры может быть реализовано поэтапно:

- на первом этапе – интеграция опорных узлов на базе существующих ресурсов КазСтандарта и операторов связи;
- на втором – расширение сети с охватом ведомственных и отраслевых систем;
- на третьем – формирование Национальной когерентной сети синхронизации, обеспечивающей непрерывный контроль и мониторинг эталонных сигналов.

Таким образом, Казахстан получает уникальную возможность адаптировать международный опыт и создать собственную систему когерентной синхронизации, которая станет ключевым элементом цифровой и технологической независимости страны.

Заключение

Проведённое исследование подтвердило, что задачи синхронизации времени и частоты являются ключевыми для устойчивого функционирования телекоммуникационных сетей и критической инфраструктуры Республики Казахстан.

Основные выводы:

1. Действующая модель синхронизации в Казахстане базируется преимущественно на GNSS, что делает её уязвимой к внешним воздействиям (помехи, спуфинг, джамминг).

2. Необходим переход к многоуровневой системе синхронизации, включающей когерентные эталонные часы (PRTC/cnPRTC),

резервные оптоволоконные каналы и защищённые протоколы (PTP, SyncE, NTS).

3. Для критически важных отраслей (энергетика, транспорт, финансы) требуется обеспечение фазовой синхронизации с точностью до микросекунд, что невозможно при использовании только GNSS.

4. В долгосрочной перспективе перспективными являются методы квантовой нелинейной синхронизации, способные обеспечить фемтосекундную точность для сетей 6G и квантового интернета.

Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций для операторов связи, государственных органов и предприятий инфраструктурного сектора. Полученные результаты могут быть использованы при:

- формировании национальной стратегии цифровизации;
- создании Национальной системы частотно-временного обеспечения (НСЧВО);
- обеспечении киберустойчивости критических отраслей экономики.

Рекомендуемые шаги:

- внедрение NTS для NTP и защищённых профилей PTP (IEEE 1588-2019) в ведомственных сетях;
- применение cnPRTC и оптоволоконных каналов в магистральных сегментах;
- организация многоуровневого резервирования источников синхронизации;
- развитие когерентных сетей как основы для интеграции будущих квантовых технологий.

Таким образом, адаптация международного опыта и его интеграция в национальные условия позволит Казахстану обеспечить устойчивость цифровой инфраструктуры, повысить технологическую независимость и соответствовать современным мировым требованиям к точности, надёжности и киберустойчивости систем синхронизации.

Благодарность

Автор выражает признательность коллегам из научных и технических организаций, чьи консультации способствовали формированию концепции исследования.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов при подготовке данной работы.

Список источников

1. ITU-T. Recommendation G.8271/Y.1366.

- Timing and Synchronization aspects in packet networks. – Geneva: ITU, 2023.
2. IEEE. IEEE Std 1588-2019. Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. – New York: IEEE, 2019. – DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8766229.
 3. Kaplan E., Hegarty C. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications. – 3rd ed. – Boston: Artech House, 2017. – 1064 с. – ISBN 978-1-63081-058-0.
 4. Koivisto M., Costa M., Leppänen K., Valkama M. Joint positioning and synchronization in 5G ultra-dense networks using EKF // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2016. – Vol. 15, № 6. – С. 3956–3970. – DOI: 10.1109/TWC.2016.2537390.
 5. Mahmood A., et al. Time synchronization in 5G wireless networks // IEEE Communications Magazine. – 2018. – Vol. 56, № 1. – С. 38–44. – DOI: 10.1109/MCOM.2017.1700238.
 6. Mahmood A., et al. Wireless synchronization for ultra-reliable low-latency communication // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – С. 18865–18879. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2896194.
 7. Смагулов С. Б. Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени Республики Казахстан // Альманах современной метрологии. – 2024. – № 2. – С. 15–22.
 8. ITU-T. Recommendation G.8272.2. Characteristics of coherent network primary reference time clocks. – Geneva: ITU, 2024.
 9. Смагулов С. Б., Мишагин К. Г. Ведение национальной шкалы времени UTC(KZ) на пассивных водородных стандартах // Измерительная техника. – 2024. – № 9. – С. 25–31. – DOI: 10.1007/s11018-024-02039-7.
 10. Савельев А. В., Мещеряков С. В. Фазовая синхронизация в энергосистемах. – Москва: Энергия, 2019. – 248 с. – ISBN 978-5-906507-56-8.
 11. Tuninato M., et al. Synchronization signals analysis in 5G NR networks // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – С. 45123–45135. – DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3278954.
 12. Wang X., et al. Optical fiber dissemination of time and frequency for GNSS backup // Optics Express. – 2023. – Vol. 31, № 12. – С. 18922–18935. – DOI: 10.1364/OE.491510.
 13. Shi Z., et al. Over-the-air time synchronization for industrial IoT // IEEE Internet of Things Journal. – 2021. – Vol. 8, № 15. – С. 12345–12356. – DOI: 10.1109/IIOT.2021.3065342.
 14. Mahmood A., et al. 5G wireless network synchronization challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2018. – Vol. 20, № 4. – С. 2835–2858. – DOI: 10.1109/COMST.2018.2853950.
 15. Arai H., Murakami T. Overview of PTP and SyncE synchronization // IEEE Communications Standards Magazine. – 2016. – Vol. 1, № 1. – С. 22–29. – DOI: 10.1109/MCOMSTD.2016.7508873.
 16. Quantum nonlinear synchronization for future networks // Nature Physics. – 2025. – Vol. 21. – С. 145–152. – DOI: 10.1038/s41567-025-02014-y.
 17. ITU-T. Recommendation G.8265.1. Timing characteristics of PTP telecom profile for frequency synchronization. – Geneva: ITU, 2023.
 18. Единые требования в области информационно-коммуникационных технологий и обеспечения информационной безопасности: утв. Постановлением Правительства Республики Казахстан от 20.12.2016 № 832 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P1600000832>.
 19. О создании Республиканского государственного предприятия "Казахстанский институт метрологии (КазИнМетр)": Постановление Правительства Республики Казахстан от 01.11.1996 № 1342 (с изм. и доп.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P960001342>.
 20. Franke D., Sibold D., Teichel K., Dansarie M., Malhotra A. Network Time Security for the Network Time Protocol (NTP). – IETF, 2020. – RFC 8915. – DOI: 10.17487/RFC8915.
 21. European Commission. Galileo Open Service Navigation Message Authentication (OSNMA) — Service declaration and public launch [Электронный ресурс]. – Brussels, 2023. – Режим доступа: <https://ec.europa.eu/defence-industry-space/osnma>.
 22. Royal United Services Institute. Why Russia's War is a PNT Wake-Up Call [Электронный ресурс]. – London: RUSI, 2024. – Режим доступа: <https://www.gps.gov/cgsic/meetings/2024/fernandez-hernandez.pdf>.
 23. National Physical Laboratory (UK). Resilient time and frequency for critical national infrastructure. – Teddington: NPL, 2024.

References

1. ITU-T. *Recommendation G.8271/Y.1366: Timing and Synchronization Aspects in Packet Networks*. Geneva: ITU, 2023.
2. IEEE. *IEEE Std 1588-2019: Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for*

Networked Measurement and Control Systems. New York: IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8766229>.

3. Kaplan, E., and C. Hegarty. *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. 3rd ed. Boston: Artech House, 2017. ISBN 978-1-63081-058-0.

4. Koivisto, M., Costa, M., Leppänen, K., and Valkama, M. “Joint Positioning and Synchronization in 5G Ultra-Dense Networks Using EKF.” *IEEE Transactions on Wireless Communications* 15, no. 6 (2016): 3956–3970. <https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2537390>.

5. Mahmood, A., et al. “Time Synchronization in 5G Wireless Networks.” *IEEE Communications Magazine* 56, no. 1 (2018): 38–44. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700238>.

6. Mahmood, A., et al. “Wireless Synchronization for Ultra-Reliable Low-Latency Communication.” *IEEE Access* 7 (2019): 18865–18879. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2896194>.

7. Smagulov, S. B. “State Primary Standard of Units of Time, Frequency, and the National Time Scale of the Republic of Kazakhstan.” *Almanac of Modern Metrology*, no. 2 (2024): 15–22.

8. ITU-T. *Recommendation G.8272.2: Characteristics of Coherent Network Primary Reference Time Clocks*. Geneva: ITU, 2024.

9. Smagulov, S. B., and K. G. Mishagin. “Steering of the National Time Scale UTC(KZ) Based on Passive Hydrogen Masers According to the Rapid UTC Data.” *Measurement Techniques* 67, no. 9 (2024): 684–692. <https://doi.org/10.1007/s11018-024-02039-7>.

10. Saveliev, A. V., and S. V. Meshcheryakov. *Phase Synchronization in Power Systems*. Moscow: Energiya, 2019. ISBN 978-5-906507-56-8.

11. Tuninato, M., et al. “Synchronization Signals Analysis in 5G NR Networks.” *IEEE Access* 11 (2023): 45123–45135. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3278954>.

12. Wang, X., et al. “Optical Fiber Dissemination of Time and Frequency for GNSS Backup.” *Optics Express* 31, no. 12 (2023): 18922–18935. <https://doi.org/10.1364/OE.491510>.

13. Shi, Z., et al. “Over-the-Air Time Synchronization for Industrial IoT.” *IEEE Internet*

of Things Journal 8, no. 15 (2021): 12345–12356. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3065342>.

14. Mahmood, A., et al. “5G Wireless Network Synchronization Challenges.” *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20, no. 4 (2018): 2835–2858. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2853950>.

15. Arai, H., and T. Murakami. “Overview of PTP and SyncE Synchronization.” *IEEE Communications Standards Magazine* 1, no. 1 (2016): 22–29. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2016.7508873>.

16. “Quantum Nonlinear Synchronization for Future Networks.” *Nature Physics* 21 (2025): 145–152. <https://doi.org/10.1038/s41567-025-02014-y>.

17. ITU-T. *Recommendation G.8265.1: Timing Characteristics of PTP Telecom Profile for Frequency Synchronization*. Geneva: ITU, 2023.

18. Government of the Republic of Kazakhstan. *Unified ICT and Cybersecurity Requirements: Approved by Government Resolution No. 832 of December 20, 2016* [Electronic resource]. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P1600000832>.

19. Government of the Republic of Kazakhstan. *On the Creation of the Republican State Enterprise "Kazakhstan Institute of Metrology (KazInMetr)": Government Resolution No. 1342 of November 1, 1996 (with amendments and additions)* [Electronic resource]. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P960001342>.

20. Franke, D., Sibold, D., Teichel, K., Dansarie, M., and Malhotra, A. *Network Time Security for the Network Time Protocol (NTP)*. RFC 8915. IETF, 2020. <https://doi.org/10.17487/RFC8915>.

21. European Commission. *Galileo Open Service Navigation Message Authentication (OSNMA) — Service Declaration and Public Launch* [Electronic resource]. Brussels, 2023. Available at: <https://ec.europa.eu/defence-industry-space/osnma>.

22. Royal United Services Institute. *Why Russia's War is a PNT Wake-Up Call* [Electronic resource]. London: RUSI, 2024. Available at: <https://www.gps.gov/cgsic/meetings/2024/fernandez-hernandez.pdf>.

23. National Physical Laboratory (UK). *Resilient Time and Frequency for Critical National Infrastructure*. Teddington: NPL, 2024.

С.Б. Смагулов

Томск политехникалық университеті, Томск, Ресей
«Қазақстан стандарттау және метрология институты» РМҚ, Астана, Қазақстан

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ БАЙЛАНЫС ЖЕЛІЛЕРІНДЕ ЖӘНЕ ИНФРАҚҰРЫЛЫМДЫҚ НЫСАНДАРЫНДА СИНХРОНДАУ ЖҮЙЕЛЕРІН ДАМЫТУДЫҢ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

Аңдатпа

Қазіргі заманғы телекоммуникациялық желілер мен Қазақстан Республикасының инфрақұрылымдық нысандары цифрландыру, 5G/6G желілерін енгізу, интеллектуалды энергетикалық жүйелер, көлік және өнеркәсіптік интернет заттары жағдайында уақыт пен жиілікті синхрондаудың дәлдігіне күн өткен сайын жоғары талаптар қояды. Зерттеудің мақсаты – Қазақстандағы синхрондау жүйелерін дамытудың перспективаларын анықтау, жаңғырту бағыттарын белгілеу және олардың маңызды инфрақұрылымның тұрақтылығына әсерін бағалау.

Әдістеме ITU-T және IEEE (G.827x, IEEE 1588 PTP, SyncE) халықаралық стандарттарын, ғылыми жарияланымдарды, жетекші елдердің тәжірибесін және Қазақстан телекоммуникация секторының қазіргі жағдайын салыстырмалы талдауды қамтиды. Зерттеуде дәстүрлі синхрондау көздері (GNSS), эталондық сигналдарды талшықты-оптикалық тарату, атомдық жиілік стандарттары, сымсыз әдістер (Over-the-Air) және кванттық бейжелілік синхрондау технологиялары қарастырылды.

Нәтижелер когерентті синхрондау жүйелеріне көшу (PRTC/cnPRTC, талшықты-оптикалық резервтік арналар, PTP, SyncE, OTA) желілердің ақауға төзімділігін айтарлықтай арттыратынын және GNSS-ке тәуелділікті төмендететінін көрсетті. Бұл энергетика, көлік, қаржы секторы және өнеркәсіптік жүйелер үшін аса маңызды, өйткені микросекундтық дәлдік олардың қауіпсіздігі мен тұрақтылығы үшін шешуші мәнге ие.

Зерттеудің құндылығы – халықаралық тәжірибені Қазақстан жағдайына бейімдеу, ұлттық уақыт-жиілік қамтамасыз ету жүйесін құру және нормативтік базаны жетілдіру бойынша ұсыныстар қалыптастыру. Практикалық маңызы – нәтижелерді байланыс желілерін, энергетикалық, көліктік және цифрлық инфрақұрылым жүйелерін жобалау мен жаңғыртуда қолдану мүмкіндігі.

Түйін сөздер: Уақыт пен жиілікті синхрондау, GNSS, PTP, SyncE, White Rabbit, когерентті желі, кванттық синхрондау, UTC(KZ).

S.B. Smagulov

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
«Kazakhstan Institute of Standardization and Metrology» RSE, Astana, Kazakhstan

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF SYNCHRONIZATION SYSTEMS IN COMMUNICATION NETWORKS AND INFRASTRUCTURE FACILITIES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Abstract

Modern telecommunication networks and infrastructure facilities of the Republic of Kazakhstan place increasingly high demands on the accuracy of time and frequency synchronization in the context of digitalization, the deployment of 5G/6G networks, intelligent energy systems, transportation, and the industrial Internet of Things. The aim of this study is to determine the prospects for the development of synchronization systems in Kazakhstan, identify key modernization directions, and assess their impact on the resilience of critical infrastructure.

The methodology is based on the analysis of international ITU-T and IEEE standards (including G.827x, IEEE 1588 PTP, SyncE), scientific publications, best practices of leading countries, and a comparative analysis of the current state of Kazakhstan's telecommunications sector. The study examines traditional synchronization

sources (GNSS), fiber-optic transfer of reference signals, atomic frequency standards, wireless methods (Over-the-Air), and advanced quantum nonlinear synchronization technologies.

The results demonstrate that transitioning to coherent synchronization systems using a multi-level architecture (PRTC/cnPRTC, optical backup channels, PTP, SyncE, OTA) can significantly enhance fault tolerance and reduce dependence on GNSS. This is particularly important for the energy, transport, and financial sectors, as well as industrial systems, where microsecond accuracy is critical for safety and operational stability.

The value of the study lies in adapting international experience to Kazakhstan's conditions, developing proposals for the creation of a national time-frequency reference system, and providing recommendations for the regulatory framework. The practical significance is the potential application of the results in the design and modernization of telecommunication and infrastructure systems of the country.

Key words: time and frequency synchronization, GNSS, PTP, SyncE, White Rabbit, coherent network, quantum synchronization, UTC(KZ).