

УДК 621.391.1

Моделирование процесса привязки локальной шкалы времени через узлы оптической транспортной сети

Ф. А. Прошин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Прошин Ф. А. Моделирование процесса привязки локальной шкалы времени через узлы оптической транспортной сети. Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 981–992. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-981-992

Аннотация

Цель: разработать имитационную модель процесса привязки локальной шкалы времени на узле телекоммуникационной сети с использованием протокола точного времени (Precision Time Protocol, PTP) при передаче пакетов через узлы оптической транспортной сети (Optical Transport Network, OTN). Сформировать последовательность этапов периодической подстройки локального источника времени с учетом дрейфа локальных часов. Получить вероятностно-временные характеристики процесса привязки и оценить достигаемую точность привязки. Сформулировать предложения по повышению точности с учетом выявленных характеристик и путем использования более эффективных механизмов передачи сигналов синхронизации. **Методы:** сравнение действующих и перспективных механизмов передачи сигналов синхронизации на уровне OTN на основании нормативной документации, анализ технической документации и экспериментальных данных с целью формирования исходных данных для моделирования, имитационное моделирование с использованием мультиагентного подхода. **Результаты:** разработана имитационная модель процесса привязки локальной шкалы времени с периодической подстройкой локальных часов при наличии дрейфа. Получены вероятностно-временные характеристики процесса передачи сообщений синхронизации и определены составляющие, влияющие на достигаемую точность привязки локальной шкалы времени. Сформулированы рекомендации по повышению точности привязки. **Практическая значимость:** результаты моделирования могут быть использованы при проектировании транспортных сетей на базе OTN, а также на этапе перевода действующих транспортных сетей на оборудование технологии OTN с целью обеспечения сетевой синхронизации на присоединяемых участках и совместного их функционирования. Также полученные вероятностно-временные характеристики могут быть использованы при моделировании сети сложной топологии, состоящей из множества узлов OTN.

Ключевые слова: сетевая синхронизация, частотно-временное обеспечение, OTN, привязка локальной шкалы времени, PTP, дрейф часов

Введение

Современные сети представляют собой сложные гетерогенные структуры, объединяющие различные технологии передачи, которым необходима синхронизация. Надежное функционирование телекоммуникационной сети может быть обеспечено при наличии стабильной и качественной синхронизации. Значительная

часть транспортных сетей функционирует на основе синхронной цифровой иерархии (СЦИ) и технологий пакетной передачи, которые заметно расширяют свои возможности, начиная вытеснять системы СЦИ с транспортного уровня, требуя применять методы синхронизации (точнее — привязки) шкалы времени.

Совместное функционирование данных технологий и внедрение технологии OTN как наиболее перспективной транспортной основы требуют анализа условий их совместного использования в отношении применяемых механизмов синхронизации. Выступая связующим элементом на уровне транспорта, OTN должна участвовать в процессах передачи и обработки сигналов синхронизации, а функциональность оборудования в отношении синхронизации при этом определяется условиями и составом сети.

Подходы в отношении синхронизации OTN

Одним из основных достоинств технологии OTN можно назвать возможность интеграции с существующими сетями, использующими протоколы обмена пакетными данными или принципы коммутации каналов. Перечень стандартизованных механизмов работы с нагрузкой различных типов можно найти в [1]. Взаимодействие OTN и присоединяемого участка сети требует согласованной передачи информации о синхронизации, которая используется с каждой стороны.

Передача сигналов тактовой сетевой синхронизации для традиционных сетей СЦИ обеспечивается благодаря прозрачности размещения нагрузки с допустимым уровнем джиттера [2], который может вноситься оборудованием OTN. При взаимодействии с пакетными сетями, которые строятся на основе IP-маршрутизаторов и Ethernet-коммутаторов, синхронизация выполняется на логическом уровне в зависимости от требований конечного потребителя, который может требовать частотной или фазовой (временной) синхронизации [3].

Реализация тактовой синхронизации на базе пакетных сетей возможна благодаря технологии «синхронного Ethernet» (Synchronous

Ethernet, SyncE), использование которой предполагает обязательную аппаратную поддержку каждым из узлов сети. Но наличие синхронизации по частоте не обеспечивает условий работы большинства современных сервисов, требующих привязки событий к временной шкале. Наиболее оптимальным решением можно считать применение данной технологии в сочетании с механизмами временной синхронизации [3].

Технология OTN, с одной стороны, служит «транспортом» для связи территориально распределенных участков сети, использующих одинаковую технологию передачи, и обеспечивает прозрачную доставку сигналов физического уровня, а с другой — оборудование OTN следует считать элементом системы частотно-временного обеспечения (ЧВО), участвующим в процессе передачи сообщений о времени.

Рассмотрим сценарий начального этапа включения уровня OTN в систему ЧВО в качестве транспортной технологии для предварительного анализа достигаемой точности при передаче сигналов единого времени (СЕВ). На рис. 1 приводится схема совместного функционирования устройств ЧВО и элементов OTN при топологии «точка — точка». Как видно из схемы, оборудование ЧВО использует уровень OTN в качестве транспорта, выступая для него нагрузкой, прозрачно передающейся в цифровой многоуровневой структуре согласно стандартизованным механизмам обработки пользовательских данных [1].

Несмотря на «прозрачность» OTN, ее элементы необходимо рассматривать как значимую составляющую при формировании цепей передачи сигналов единого времени. Последовательное преобразование служебной информации показано на рис. 2. При такой конфигурации (рис. 1) мультиплексор OTN не участвует в непосредственной обработке

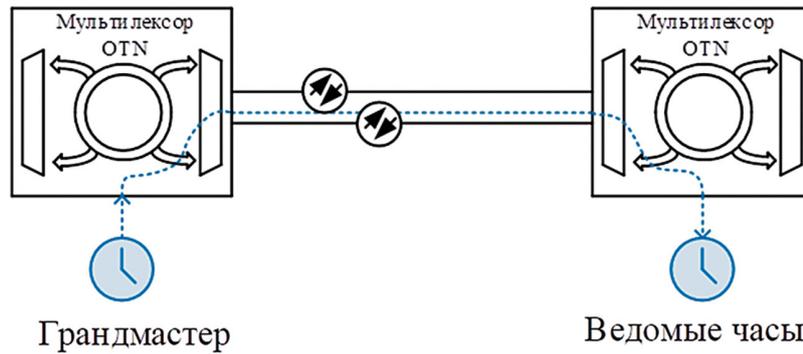


Рис. 1. Рассматриваемая схема взаимодействия устройств СЕВ

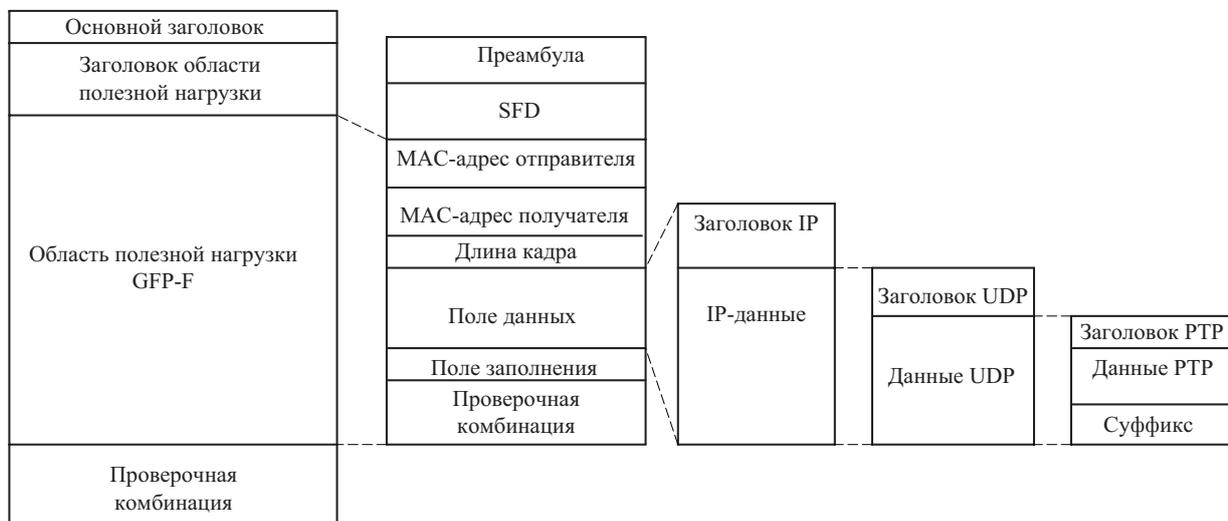


Рис. 2. Последовательное размещение сообщения RTP

информации о синхронизации, так как ему не предоставляется доступ к кадру Ethernet и, соответственно, сообщению RTP.

Постановка задачи

Предположим, что на ведущей стороне расположены обычные часы (Ordinary Clock, OC), выполняющие функцию грандмастера сети (домена), синхронизирующиеся от первичного источника шкалы и времени (Precision Reference Time Clock, PRTC) или от внешнего входа приемника сигналов ГНСС.

Рассмотрим использование стандартного профиля RTP [4] с использованием UDP. Сформированное ведущими часами сообщение RTP

размещается в структуре дейтаграммы UDP, которая далее последовательно размещается в пакете IP, выступающем нагрузкой для кадра Ethernet. На выходном интерфейсе часов сформированное сообщение, содержащее метку времени, представляет собой кадр Ethernet, на физическом уровне реализованный в соответствии с 1000BASE-T.

Мультиплексор OTN получает поток данных, содержащих метки времени, на пользовательский интерфейс 1 GbE. Далее в соответствии с [1] трафик Ethernet может быть передан по OTN путем размещения кадров Ethernet в структуре пакетов согласно общей процедуре формирования кадров в режиме их

отображения (Frame-Mapped Generic Framing Procedure, GFP-F), как указано в [5]. Для оптического блока уровня нагрузки (Optical Payload Unit, OPU) данный поток непрерывен, что достигается путем вставки заполняющих кадров GFP-F длиной 4 байта, и, следовательно, дополнительного выравнивания на уровне OTN не требуется. Далее OPU дополняется заголовками уровня оптического блока данных (Optical Data Unit, ODU) и оптического транспортного блока (Optical Transport Unit, OTU) и передается по сети до узла назначения, где производятся обратные описанному выше процессы для выделения на выходной интерфейс мультиплексора.

Потребитель синхронизации (ведомые часы), подсоединенный к порту мультиплексора, получает поток Ethernet-кадров и по-

следовательно выделяет сообщение RTP, содержащее метку времени. Процесс привязки локальной шкалы времени в соответствии с RTP приводится на рис. 3.

При реализации стандартного профиля IEEE 1588 используется двухшаговый механизм обмена, при котором используются вспомогательные сообщения «Follow_Up». Таким образом, ведомые часы после получения значений t_1, t_2, t_3, t_4 могут определить среднюю задержку передачи T_{cp} по формуле (1) и сдвиг локальной шкалы относительно ведущих часов $T_{сдв}$ по формуле (2):

$$T_{cp} = \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2}; \quad (1)$$

$$T_{сдв} = T_s - T_m - T_{cp} = \frac{(t_2 - t_1) - (t_3 - t_4)}{2}. \quad (2)$$

Ведущие часы (Master)

Ведомые часы (Slave)

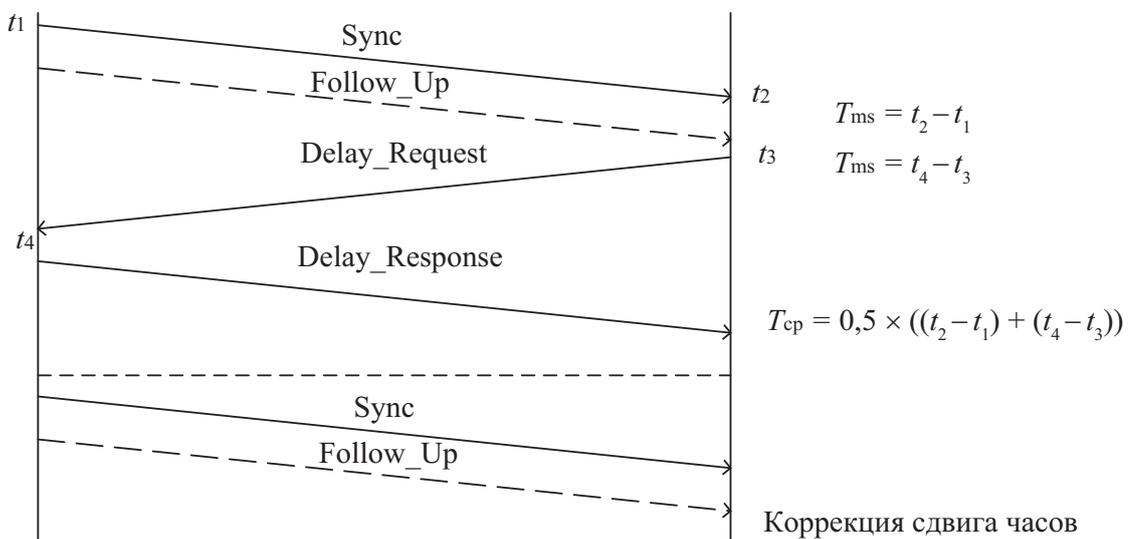


Рис. 3. Процесс привязки локальной шкалы времени ведомого устройства:

t_1 — время отправки сообщения «Sync» ведущими часами;

t_2 — время приема сообщения «Sync» ведомыми часами;

t_3 — время отправки сообщения «Delay_Request» ведомыми часами;

t_4 — время приема сообщения «Delay_Request» ведущими часами;

T_{ms} — задержка передачи от ведущих к ведомым часам;

T_{sm} — задержка передачи от ведомых к ведущим часам

Качество функционирования локальных часов определяется различными параметрами [6], относящимися к шкале времени и генератору. Наиболее простой для описания работы локальных часов принято считать модель, рассмотренную в [7, 8], согласно которой шкала времени смещена на постоянную величину ϕ относительно эталонной:

$$c_{\text{лок}}(t) = t + \phi, \quad (3)$$

где $c_{\text{лок}}(t)$ представляет вектор времени на локальных часах;

t — вектор времени на ведущих часах,

ϕ — сдвиг, начальная фаза локальных часов.

Но данная модель может применяться с учетом того, что в сети уже обеспечена синхронизация рассматриваемых узлов по частоте [9], то есть при одинаковой длительности временных интервалов время их начала смещено на одинаковую величину фазы ϕ . Если в сети не обеспечена частотная синхронизация, работа с моделью (3) может некорректно описывать ход локальных часов. Модель поведения часов с учетом дрейфа может быть записана в соответствии с формулой (4):

$$c_{\text{лок}}(t) = \alpha t + \phi, \quad (4)$$

где α — смещение частоты ведомых часов относительно ведущих, определяемое как отношение частот ведомых и ведущих часов.

Таким образом, функционирование локальных часов, учитывая наличие частотной синхронизации, описывается моделями, изображенными на рис. 4а, где сплошная линия показывает условие наличия предварительной подстройки, а пунктирная — характеризует дрейф из-за нестабильности частоты.

Описываемое плавное смещение локальной шкалы — не единственный фактор, определяющий точность синхронизации. Процесс подстройки шкалы времени должен выполняться непрерывно, без значительных скачков, иначе при сравнении меток времени может возникнуть ошибка, связанная со смещением шкалы на величину, большую, чем интервал времени между пакетами, содержащими метки времени (рис. 4б). При наличии постоянного дрейфа алгоритм подстройки с интервалом T подстраивает часы в соответствии с ведущими.

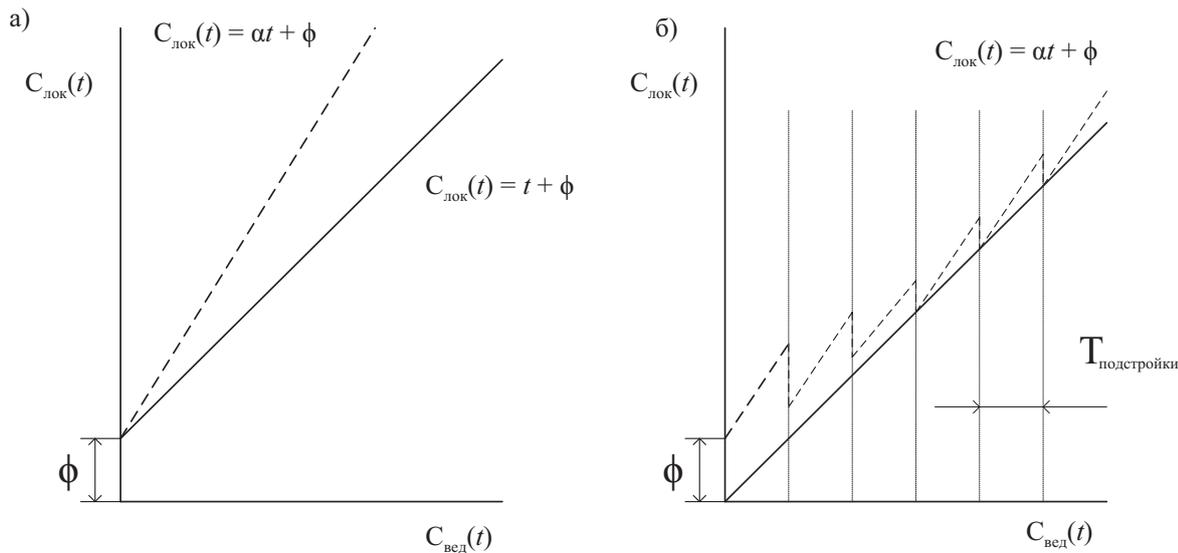


Рис. 4. Характер поведения локальных часов: а) при автономном режиме согласно формулам (3) и (4); б) при периодической подстройке с периодом $T_{\text{подстройки}}$

Описание исходных данных

Для моделирования выбран агентный подход, реализовать который позволяет среда имитационного моделирования AnyLogic. Агент в предлагаемой модели соответствует сообщению протокола точного времени, которое передает временную метку между ведущими часами и потребителем сигналов точного времени.

На рис. 5 приводится разработанная имитационная модель процесса привязки локальной шкалы времени на ведомом устройстве. Учитывая процессный подход, использована библиотека моделирования процессов AnyLogic. Под процессом в предлагаемой модели понимается этап обработки информационной единицы (сообщения RTP или другого протокола) в соответствии с описанным ранее алгоритмом.

Описание процессов и их вероятностно-временные характеристики приводятся в табл. 3. Значение задержки выбрано на ос-

новании анализа технической документации и опыта практической эксплуатации оборудования телекоммуникационных сетей [10–13], более подробное описание характеристик, связанных с работой мультиплексора, можно найти в [14].

При запуске модели предполагается, что роли ведущего и ведомого устройств заранее определены, при этом на локальных часах отсутствует привязка шкалы по времени и синхронизация по частоте, следовательно, поведение локальных часов описывается в соответствии с формулой (4). Величина начального сдвига ϕ генерируется в диапазоне от 50 до 150 мкс. Рассматриваются сценарии с использованием различных алгоритмов FEC:

- а) использование кода Рида-Соломона (Reed-Solomon, RS) с параметрами (1023, 1007);
- б) использование кода RS (255, 239).

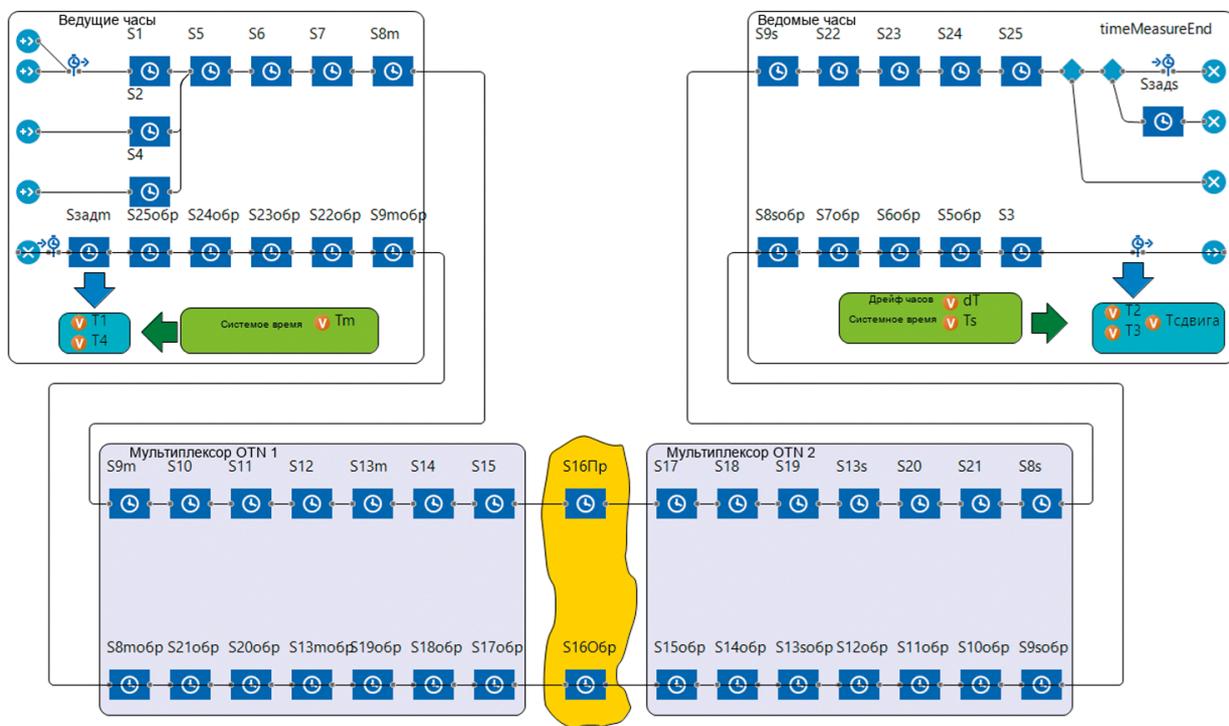


Рис. 5. Имитационная модель процесса привязки локальной шкалы времени

ТАБЛИЦА 3. Вероятностно-временные характеристики модели

Процесс	Обозначение на схеме	Значение, мкс
Формирование сообщения «Sync»	S1	0,12
Формирование сообщения «Follow_Up»	S2	0,12
Формирование сообщения «Delay_Request»	S3	0,12
Формирование сообщения «Delay_Response»	S4	0,12
Размещение сообщения в пакете UDP	S5	exponential (0; 1)
Размещение UDP в пакете IP	S6	1
Размещение IP в кадре Ethernet	S7	0,2
Преобразование Ethernet на выходном интерфейсе 1 GbE PHY	S8	uniform (0,12; 0,132)
Преобразование сигнала на входном интерфейсе 1 GbE PHY	S9	uniform (0,26; 0,292)
Размещение пакета Ethernet в GFP-F	S10	exponential (10; 0,1)
Размещение GFP-F в OPU	S11	5
Генерирование (мультиплексирование) ODU	S12	5
Коммутация ODU	S13	exponential (0,5; 2)
Генерирование OTU	S14	а) exponential (0,5; 1, 1) RS (255, 239) б) exponential (6, 7, 1) RS (1007, 1023)
Преобразование OTU в оптический сигнал на линейном выходе	S15	0,003
Задержка в оптическом волокне, 1 км	S16	5
Преобразование оптического сигнала в OTU на входном интерфейсе	S17	0,003
Обработка заголовка OTU с выделением ODU	S18	а) exponential (0,5, 1, 1) RS (255, 239); б) exponential (6, 7, 1) RS (1007, 1023)
Обработка заголовка ODU, демультимплексирование	S19	5
Обработка заголовка OPU, выделение GFP-F	S20	5
Выделение пакета Ethernet из GFP-F	S21	exponential (1; 0,1)
Выделение пакета IP из кадра Ethernet	S22	0,2
Выделение пакета UDP из пакета IP	S23	1
Выделение сообщения RTP из UDP	S24	exponential (10; 0,1)
Получение метки времени	S25	0,02
Задержка формирования ответного сообщения RTP	Sзад	0,01

Примечания: 1) *exponential* (λ, min) — экспоненциальный закон с параметром λ и минимальным значением min ; 2) *uniform* (a, b) — равномерный закон с параметрами $min = a, max = b$; 3) *exponential* (min, max, λ) — экспоненциальный закон с параметром λ , усеченный на отрезке $[min; max]$.

Различия во временных характеристиках данных кодов приводятся в табл. 3 и получены на основании анализа технических данных и практического опыта [12].

Результаты моделирования

Особенность реализации синхронизации на основе РТР заключается в чувствительности к асимметрии задержки, что сказывается на расчете среднего времени передачи и, соответственно, вносит погрешность в определение сдвига шкалы времени. На рис. 6а и 6б показаны гистограммы распределения задержек в прямом (T_{ms} , зеленый цвет) и обратном (T_{sm} , синий цвет) направлениях при использовании, соответственно, кодов RS (255, 239) и (1023, 1007).

На основании данных гистограмм в общем можно сделать вывод, что OTN характеризуется минимальной асимметрией. Для кода RS (255, 239) математическое ожидание составляет 87 мкс со среднеквадратическим отклонением порядка 3,3 мкс. По гистограмме видно, что распределение задержки носит одномодальный характер, но его форма не позволяет однозначно сделать вывод о законе, которым его можно задать.

Использование кода RS (1023, 1007) в отношении задержек позволяет получить схожие

результаты, но он дает большее математическое ожидание — 98 мкс со среднеквадратическим отклонением 3,9 мкс в прямом и 2,9 мкс в обратном направлении. Здесь также наблюдается явно выраженный одномодальный характер, при этом наблюдаются отдельные выбросы (110 мкс для T_{ms}), но частота их появления практически минимальна. При моделировании с использованием первого типа кода также присутствуют одиночные выбросы за пределами 100 мкс.

На рис. 7а и 7б приводятся графики, показывающие расхождение часов в процессе моделирования.

На начальном этапе часы находятся в состоянии рассогласования. Первый цикл обмена сообщениями позволяет скорректировать это расхождение, после чего процесс подстройки выполняется периодически. По результатам моделирования можно сказать, что точность привязки локальной шкалы времени достигается на уровне 10 мкс в течение всего периода наблюдения. Данные результаты согласуются с полученными характеристиками асимметрии, величина которой менее 1 мкс. Кроме того, на точность влияет дрейф локальных часов, дающий смещение при проставлении меток. Также реализация стандартного профиля РТР, рассматриваемого в данной

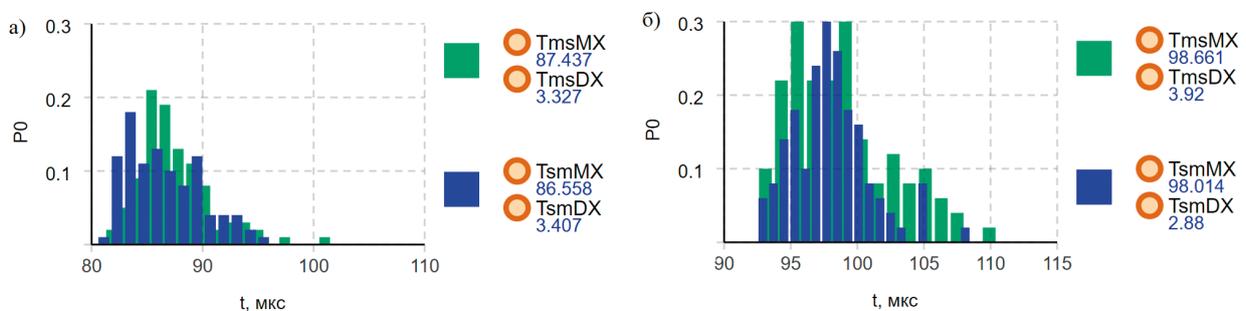


Рис. 6. Гистограммы распределения задержки при передаче с использованием кода:
а) FEC RS (255, 239); б) FEC RS (1023, 1007)

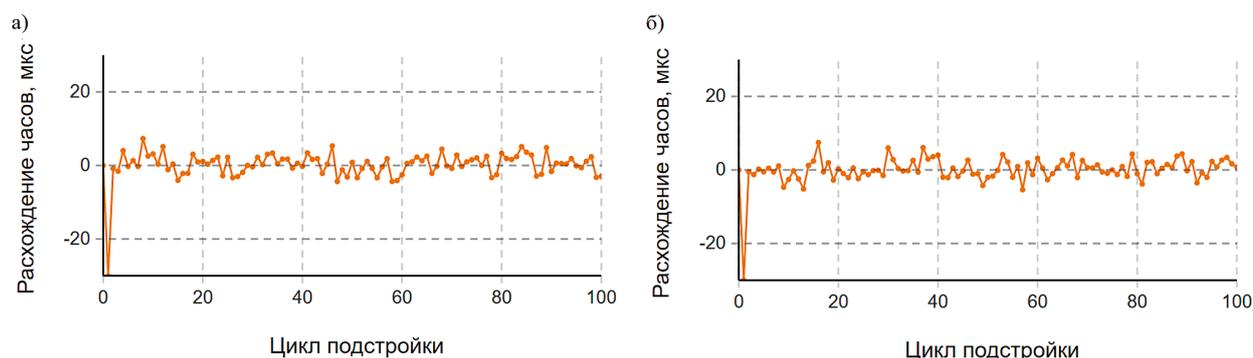


Рис. 7. Расхождение часов при использовании: а) RS (255, 239); б) RS (1023, 1007)

модели, предполагает использование протокола транспортного уровня UDP и последующую многоступенчатую обработку сообщений синхронизации. Так как часть протоколов реализуется на уровне программного обеспечения, вносятся задержки, связанные с возможностями операционной системы.

Заключение

На основании предложенной имитационной модели реализована возможность анализа отдельных процессов обработки сообщений синхронизации в процессе привязки локальной шкалы времени. По результатам моделирования показано, что OTN на начальном этапе включения в систему ЧВО позволяет без дополнительных аппаратных изменений достигать точности привязки локальной шкалы времени до единиц микросекунд, причем функциональность оборудования OTN не оказывает значительного влияния на точность привязки, в частности, при использовании различных алгоритмов упреждающего кодирования.

Предложенная модель позволяет анализировать точность реализации RTP при любых наборах исходных данных, учитывая периодичность подстройки, линейные скорости передачи, типы механизмов коррекции ошибок и другие параметры, влияющие на процесс в целом. Данный подход позволяет получить

оценку вероятностно-временных характеристик элементов устройств, что в дальнейшем позволяет перейти к моделированию взаимодействия устройств в составе сети.

Тем не менее полученная точность привязки отвечает далеко не всем современным сервисам, которые могут требовать точности до десятков наносекунд, но данные результаты позволяют определить комплекс мер, направленных на ее повышение. Прежде всего, необходимо включить узлы OTN в состав системы ЧВО. Это потребует конструктивных изменений оборудования с целью обеспечения доступа к сигналам синхронизации. Минимизация количества этапов обработки сообщений RTP позволит снизить возможные задержки, связанные с программной реализацией алгоритмов. На основании полученных результатов планируется дальнейшая работа, направленная на разработку и анализ более эффективных механизмов привязки локальной шкалы времени, а также влияния топологии сети на достигаемую точность подстройки.

Библиографический список

1. Interfaces for the optical transport network, Rec. ITU-T G.709/Y.1331 Amd. 3. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.
2. The control of jitter and wander within the optical transport network (OTN), Rec. ITU-T G.8251.

International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, Nov. 2022.

3. Рыжков А. В. Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи: учеб. пособие для вузов. М.: Горячая линия — Телеком, 2018. 270 с.

4. IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems amendment 1: Precision time protocol (PTP) mapping for transport over the optical transport network (OTN). IEEE standard 1588b-2022, 2022.

5. Generic framing procedure, Rec. ITU-T G.7041/Y.1303 Amd. 1. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.

6. An enhanced time synchronization method for a network based on Kalman filtering / Q. Li [et al.] // Sci Rep. 2024. № 14. Art no. 21271. DOI: 10.1038/s41598-024-71929-8

7. Minimax optimum estimators for phase synchronization in IEEE 1588 / A. Guruswamy [et al.]. IEEE Transactions on Communications. Vol. 63. № 9. P. 3350–3362. DOI: 10.1561/2000000108

8. Karthik A. K., Blum R. S. Recent advances in Clock synchronization for packet-switched networks // Foundations and trends in signal processing. 2020. Vol. 13, No. 4. P. 360–443. DOI: 10.1561/2000000108

9. White paper: Timestamping and clock Synchronization in P4-Programmable Platforms / T. Martinek [et al.] // GEANT. 2022. URL: <https://resources.geant.org/wp-content/uploads/2022/09/>

GN4-3_White-Paper_Timestamping-and-Clock-Synchronisation-in-P4-Programmable-Platforms.pdf

10. Салифов И. И. Методика оценки сквозной задержки на оптической магистральной сети со сложной архитектурой: дисс. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2012. 253 с.

11. Богданова Е. Г. Оптическая маршрутизация в транспортной сети IMT-2020/5G // Первая миля. 2020. № 1. С. 62–70.

12. Хмелев К. Ф. Основы фотонного транспорта. Киев: Техника, 2008. 680 с.

13. WDM/OTN Latency, Shenzhen, China, Huawei. URL: https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/en/43_latency.html

14. Моделирование процесса обработки меток времени на устройствах транспортной сети / А. К. Канаев [и др.] // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 2. С. 34–47. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-2-34-47

15. Huang Y., Mehrotra S., Li J. A hybrid FEC-ARQ protocol for low-delay lossless sequential data streaming // Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo ICME 2009. P. 718–725.

Дата поступления: 25.09.2024

Решение о публикации: 25.11.2024

Контактная информация:

ПРОШИН Федор Алексеевич — ассистент кафедры «Электрическая связь»; fedorproshin@gmail.com

Modeling of local time scale synchronization through optical transport network nodes

F. A. Proshin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint-Petersburg, 190031, Russia

For citation: Proshin F. A. Modeling of local time scale synchronization through optical transport network nodes. Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 981–992. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-981-992

Abstract

Purpose: to develop a simulation model of local time scale synchronization at telecommunication network node by using precision time protocol (PTP) assuming that packets are transmitting through optical transport network (OTN). To form a sequence of stages for periodical local clock correction taking into account the local clock drift. To get probabilistic-temporal parameters of this process for evaluating the achievable accuracy. To formulate suggestions for improving the accuracy in view of received parameters and by using more effective mechanisms of synchronization signal transmitting. **Methods:** comparison of current and perspective mechanisms of synchronization signal transmitting through OTN layer that can be founded in standards, analyzing of technical documentation and experimental data for generating initial data using in model, simulation modeling with the point of view multi-agent method. **Results:** the simulation model of local time scale synchronization with the periodical drift correction is developed. The probabilistic-temporal parameters of synchronization message transmitting are received and elements that influence achievable accuracy are obtained. A number of recommendations for its improving is formulated. **Practical importance:** the simulation results can be implemented for designing transport networks based on OTN and for upgrading current transport networks in a way of implementing OTN with the point of view to provide network synchronization for each attached network and to work correctly with the synchronization information. Also received probabilistic-temporal parameters can be used for modeling at network layer taking into account more complex OTN topologies.

Keywords: network synchronization, frequency-time provision, OTN, local time scale synchronization, PTP, clock drift

References

1. Interfaces for the optical transport network, Rec. ITU-T G.709/Y.1331 Amd. 3. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.
2. The control of jitter and wander within the optical transport network (OTN), Rec. ITU-T G.8251. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, Nov. 2022.
3. Ryzhkov A.V. Chastotno-vremennoe obespechenie v setyah elektrosvyazi: ucheb. posobie dlya vuzov. M.: Goryachaya liniya — Telekom, 2018. 270 s. (In Russian)
4. IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems amendment 1: Precision time protocol (PTP) mapping for transport over the optical transport network (OTN). IEEE Standard 1588b-2022, 2022.
5. Generic framing procedure, Rec. ITU-T G.7041/Y.1303 Amd. 1. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.
6. An enhanced time synchronization method for a network based on Kalman filtering / Q. Li [et al] // Sci Rep. 2024. № 14. Art no. 21271. DOI: 10.1038/s41598-024-71929-8
7. Minimax optimum estimators for phase synchronization in IEEE 1588 / A. Guruswamy [et al]. IEEE Transactions on Communications. Vol. 63. № 9. P. 3350–3362. DOI: 10.1561/2000000108

8. Karthik A. K., Blum R. S. Recent advances in clock synchronization for packet-switched networks // Foundations and trends in signal processing. 2020. Vol. 13, No. 4. P. 360–443. DOI: 10.1561/2000000108
9. White paper: Timestamping and clock Synchronization in P4-Programmable Platforms / T. Martinek [et al.] // GEANT. 2022. URL: https://resources.geant.org/wp-content/uploads/2022/09/GN4-3_White-Paper_Timestamping-and-Clock-Synchronisation-in-P4-Programmable-Platforms.pdf
10. Salifov I.I. Metodika ocenki skvoznoj zaderzhki na opticheskoj magistral'noj seti so slozhnoj arhitekturoj: diss. ... kand. tekhn. nauk. Ekaterinburg, 2012. 253 s. (In Russian)
11. Bogdanova E. G. Opticheskaya marshrutizaciya v transportnoj seti IMT-2020/5G // Pervaya milya. 2020. No. 1. S. 62–70. (In Russian)
12. Hmelev K. F. Osnovy fotonogo transporta. Kiev: Tekhnika, 2008. 680 s. (In Russian)
13. WDM/OTN Latency, Shenzhen, China, Huawei. URL: https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/en/43_latency.html
14. Modelirovanie processa obrabotki me-tok vremeni na ustrojstvah transportnoj seti / A.K. Kanaev [i dr.] // Trudy uchebnyh zavedenij svyazi. 2024. T. 10. No. 2. S. 34–47. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-2-34-47 (In Russian)
15. Huang Y., Mehrotra S., Li J. A hybrid FEC-ARQ protocol for low-delay lossless sequential data streaming // Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo ICME 2009. P. 718–725.

Received: 25.09.2024

Accepted: 25.11.2024

Author's information:

Fedor A. PROSHIN — Assistant Professor
at the department of «Electrical communication»;
fedorproshin@gmail.com