

Сети, чувствительные ко времени, и их использование на железнодорожном транспорте

А. И. Алексеев¹, А. К. Канаев²

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
alekseevartem.ig@gmail.com¹, kanaevak@mail.ru²

Аннотация. Доклад посвящён технологии построения сетей с пакетной коммутацией, чувствительных ко времени (TSN – Time-Sensitive Networking). Данная технология является расширением классического Ethernet и описывается рядом стандартов IEEE серии 802.1. В этих стандартах изложены технические решения, позволяющие увеличить эффективность работы сети Ethernet при совместной передаче трафика разного рода, в различной степени критичного к временным задержкам. В такой сети за счёт приоритизации источников задержка трафика реального времени может быть сделана минимальной, а скорость передачи – равномерной во времени. Это, в свою очередь, даёт возможность обеспечить требуемое качество обслуживания для всех категорий клиентов. Кроме сокращения задержек, технология также обеспечивает повышенную надёжность передачи, что делает её полезной для применения в сетях промышленного интернета. Сети TSN могут быть интегрированы в классические сети Ethernet, что позволяет внедрять их путём постепенной замены и модернизации имеющего оборудования. Данная технология может быть особенно актуальной для организации связи на железнодорожном транспорте, которая отличается повышенными требованиями к надёжности передачи и наличием больших объёмов трафика реального времени.

Ключевые слова: сети, чувствительные ко времени; сети Ethernet; сети TSN; связь на железнодорожном транспорте

I. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Технология построения сетей, чувствительных ко времени (Time-Sensitive Networking – TSN), является расширением классического Ethernet, призванным обеспечить более высокое качество передачи трафика, для которого задержки в сети могут быть недопустимы.

Технические решения, направленные на достижение этой цели, излагаются в стандартах Института инженеров электротехники и электроники (IEEE). Большинство из них базируются на стандарте 802.1Q, который определяет порядок тегирования кадров для организации виртуальных локальных сетей (VLAN). В редакции 2018 года – [1] – данный стандарт включает в себя большинство утверждённых ранее дополнений, регламентирующих реализацию функций TSN.

С учётом большого объёма стандарта, более удобными для изучения темы могут быть другие источники на русском и английском языках, хорошо резюмирующие материал, такие, как [2], [3].

Так как целью работы является обзор главных технических решений в области TSN в контексте возможности и целесообразности их реализации конкретно в сетях связи железнодорожного транспорта, в ходе подготовки доклада использовался также материал, содержащий сведения о текущем состоянии телекоммуникационных сетей на железных дорогах, применяемых в них технологиях [4], [5], а также новых и перспективных проектах [6].

II. ОСОБЕННОСТИ СЕТЕЙ TSN

A. Стандартизация технологии TSN

Стандарт IEEE 802.1Q [1] предусматривает добавление в структуру кадра Ethernet дополнительного поля для тега общим размером 4 байта для целей тегирования в виртуальных локальных сетях. Среди прочей информации о принадлежности к той или иной VLAN, в данном поле зарезервированы 3 бита для размещения кода приоритета (Priority Code Point – PCP). Формат кадра Ethernet 802.1Q иллюстрирует рис. 1.



Рис. 1. Формат кадра Ethernet 802.1Q

Именно на эту информацию о приоритете опираются алгоритмы TSN, предлагаемые в расширениях данного стандарта. Кроме того, для обеспечения нормальной работы технологии используется метод синхронизации устройств сети, закреплённый в стандартах IEEE 802.1AS и IEEE 1588.

Набор технических решений, реализуемых в конкретных случаях, достаточно вариативен. Список расширений IEEE 802.1Q, относимых непосредственно к TSN, также несколько различен в разных источниках. Например, CISCO [2] приводит следующий перечень стандартов для сетей, чувствительных ко времени (табл. 1):

ТАБЛИЦА I. СТАНДАРТЫ TSN

Стандарт	Область определения	Название стандарта
IEEE 802.1ASrev, IEEE 1588	Точное время и синхронизация	Улучшения и повышение производительности
IEEE 802.1Qbu и IEEE 802.3br	Передача и формирование очередей	Прерывание кадра
IEEE 802.1Qbv	Передача и формирование очередей	Улучшения планирования трафика
IEEE 802.1Qca	Контроль маршрутов и резервирование	Контроль маршрутов и резервирование
IEEE 802.1Qcc	Метод централизованного конфигурирования	Улучшения и повышение производительности
IEEE 802.1Qci	Входной контроль с учётом времени	Фильтрация и контроль по потокам
IEEE 802.1CB	Бесплатное резервирование с избыточностью	Повторение и отбрасывание кадров для надёжности

B. Основные технические решения в сетях TSN

Можно выделить ряд ключевых технических особенностей, за счёт которых в сетях TSN возможно достижение минимальных задержек критичного ко времени трафика [3]:

- присвоение приоритетов пакетам трафика различных видов;
- формирование выходного потока с учётом времени;
- формирование выходного потока на основе кредита;
- прерывания кадров;
- строгая синхронизация сети;
- дублирование кадров с передачей по разным маршрутам.

C. Присвоение приоритетов в зависимости от типа трафика

В соответствии со стандартом IEEE 802.1Q, как уже было сказано, в заголовке кадра Ethernet выделяется 3-битное поле PCP для указания приоритета. Соответственно, всего может быть присвоено 8 различных кодов приоритета, изначально предложенных в IEEE 802.1p (включен в 802.1Q в редакции 2014г.).

Поступающий в узел трафик ставится в очередь на передачу. В лучшем случае возможна организация 8 очередей, по одной для каждого типа трафика. Если очередей будет меньше, в некоторые из них будут добавляться пакеты нескольких классов. Распределение входящих пакетов между буферами очередей осуществляется с помощью блока выбора очередей (Queue Selection Unit – QSU).

В табл. 2 перечислены типы трафика и присваиваемые им приоритеты.

ТАБЛИЦА II. СТАНДАРТЫ TSN

PCP	Приоритет	Обозначение	Тип трафика
1	0 (низший)	BK	Фоновый (Background)
0	1 (по умолчанию)	BE	Передаваемый с лучшими усилиями (Best Effort)
2	2	EE	Передаваемый с наивысшими усилиями (Excellent Effort)
3	3	CA	Критические приложения (Critical Applications)
4	4	VI	Видео (Video)
5	5	VO	Голос (Voice)
6	6	IC	Межсетевое управление (Internetwork Control)
7	7 (высший)	NC	Сетевое управление (Network Control)

D. Формирование выходного потока с учётом времени

Основным механизмом, который позволяет обеспечить малые задержки для чувствительного к ним трафика, является формирователь с учётом времени (Time Aware Shaper – TAS), описанный в IEEE 802.1Qbv. С его помощью в соответствии с расписанием организуются циклы передачи, в рамках которых доступ к выходному порту коммутатора предоставляется разным очередям в разные моменты времени. Фактически, формирователь позволяет образовывать каналы для передачи пакетов, поэтому можно сказать, что технология канальной коммутации как бы интегрируется в технологию пакетной коммутации.

Каждой из очередей соответствует шлюз порта коммутатора, передача из данной очереди осуществляется только в том случае, если шлюз открыт. График открытия и закрытия задаётся с помощью списка управления шлюзами (Gateway Control List – GCL). Он задаётся вручную и может быть представлен массивом двоичных чисел, разряды которых соответствуют открытому («1») или закрытому («0») состоянию шлюзов. Несколько шлюзов могут быть открыты одновременно, при этом в первую очередь будет пересылаться информация из очереди с более высоким приоритетом PCP. Комбинации открываемых одновременно шлюзов могут быть различными, что позволяет гибко настраивать общее время доступа к выходному порту трафика различной степени важности. По окончании выполнения список GCL начнёт новый цикл передачи. Работа GCL синхронизируется с сетевым временем. В рамках отдельной очереди порядок отправки пакетов определяется алгоритмом выбора передачи (Transmission Selection Algorithm – TSA).

E. Формирование выходного потока на основе кредита

Для выбора пакетов в очередях могут использоваться различные алгоритмы TSA, среди них – дисциплина обслуживания FIFO («первый вошёл – первый вышел»), а также алгоритм с использованием формирователя на основе кредита (Credit-Based Shaper – CBS), который стандартизирован IEEE 802.1Qav.

Формирователь CBS используется главным образом для выравнивания трафика потокового видео и аудио. Задержка передачи для данного типа трафика не столь

критична, более важна его равномерность во времени. Чтобы её достичь, каждой очереди с данным формирователем начисляется кредит времени на передачу. Пакеты могут передаваться на выходной порт коммутатора только в том случае, если их кредит не меньше нуля. Величина кредита увеличивается с некоторой скоростью, если пакет ожидает пересылку, либо если порт свободен, но кредит очереди отрицателен. Соответственно, при передаче пакетов из данной очереди её кредит уменьшается также с определённой скоростью.

Данный механизм позволяет сделать нагрузку на узел сети, создаваемую потоковой видео- и аудиоинформацией, более равномерной, справедливо распределить пропускную способность и выделить временные промежутки для пересылки менее приоритетных пакетов без ухудшения качества обслуживания для кого-либо из пользователей.

Ф. Прерывания кадров

Критически важный трафик, в частности, сетевые управляющие воздействия, необходимо передавать с минимальной задержкой. При функционировании сети пакет такого типа может быть принят коммутатором в момент, когда тот уже осуществляет передачу. Тогда, несмотря на высокий или даже высший приоритет поступившего пакета, выходной порт оказывается недоступен для него до окончания пересылки.

Для обеспечения гарантий минимальной задержки критичного трафика стандартом IEEE 802.1Qbv и 802.1Qbv вводится процедура прерывания передачи менее приоритетных некритичных кадров. В случае поступления критичного кадра в процессе передачи некритичного кадра обработка последнего прекращается и возобновляется вновь после отправки полученного критичного кадра. Передача может останавливаться и возобновляться несколько раз. Чтобы прерванный кадр был корректно принят по частям и обработан в следующем узле сети, используются специальные служебные вставки HOLD (удержание) и RETRIEVAL (возобновление). Чтобы избежать чрезмерно долгой отправки некритичного кадра, в стандарте также ограничивается количество допустимых его прерываний критичными кадрами.

Г. Строгая синхронизация сети

Чтобы достаточно разветвлённая сеть с большим количеством узлов и устройств могла эффективно функционировать, в том числе при обработке трафика, чувствительного к задержкам, необходимо обеспечить строгую временную синхронизацию этой сети.

Для этих целей в сетях TSN используется метод синхронизации, основанный на стандартах IEEE 802.1ASrev, IEEE 1588. В соответствии с ними в сети используется протокол точного времени (Precision Time Protocol – PTP). Информация, необходимая для синхронизации, передаётся от центрального источника – главных ведущих часов – ко всем локальным ведомым часам коммутаторов и далее по цепочке к всё более удалённым узлам. В каждом узле коммутатор вычисляет

задержку в канале связи и время поступления кадра (необходимое для его обработки и передачи на выходной порт), синхронизирует собственные локальные часы по главным.

Данный метод обеспечивает высокую точность синхронизации всех локальных часов, что позволяет при анализе кадров в узлах сети адекватно оценивать текущую задержку, накопленную при прохождении по маршруту, и принимать оптимальные решения по установке приоритетов передачи кадров.

Н. Дублирование кадров

В стандарте IEEE 802.1CB описан механизм бесшовного резервирования сетей TSN. Он основан на передаче кадров Ethernet по двум независимым маршрутам. При этом принимающий узел обрабатывает первый из полученных кадров, второй кадр отбрасывается.

Данная технология резервирования обеспечивает надёжную передачу наиболее важной информации и не требует перестройки топологии и приостановки функционирования сети на время восстановления в случае возникновения аварии.

III. ОБОСНОВАННОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ TSN НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Сети связи на железнодорожном транспорте имеют свою специфику в части их организации и предъявляемых к ним требований, которые обусловлены их назначением и условиями эксплуатации. Можно выделить ряд особенностей данных сетей, которые хорошо согласуются с возможностями технологии TSN:

- наличие большого количества источников трафика, различных по степени важности;
- основной трафик – речевая информация абонентов сетей оперативно-технологической (ОТС) и общетехнологической (ОбТС) связи;
- высокие требования к надёжности сетей оперативно-технологической связи.

Эти отличительные черты железнодорожной электросвязи вполне соответствуют задачам, на решение которых направлены разработки в сфере TSN: обеспечение ранжирования трафика и справедливое распределение пропускной способности с учётом потребностей различных клиентов сети, а также повышение надёжности доставки данных по сети Ethernet.

В настоящее время сети связи ОАО «РЖД» построены главным образом на базе цифровых систем передачи с коммутацией каналов (ПЦИ и СЦИ) [5]. Применяются некоторые технические решения по интеграции в существующие сети оборудования пакетной передачи данных, в частности, реализация обмена информацией между узлами СПД с помощью технологии NGN SDH, а также разработка системы интегрированной цифровой технологической связи (ИЦТС) [6]. В этом контексте включение технологии TSN в проекты по модернизации сети связи будет

полезным дополнением, позволит обеспечить более эффективное использование существующей инфраструктуры, унифицировать аппаратную базу сетей, сократить количество разнородного оборудования, применяемого в настоящее время, подготовить условия для дальнейшего наращивания пропускной способности сети.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были рассмотрены основные особенности сетей, чувствительных ко времени. Результаты, которые в перспективе даёт применение технологии TSN, были сопоставлены с отличительными чертами сетей связи на железнодорожном транспорте и требованиями, предъявляемыми к ним.

Результаты этого сравнения позволяют заключить, что применение технологии Ethernet с внедрением различных решений TSN во многом соответствует нуждам сетей железнодорожной электросвязи, характеру передаваемого в них трафика и может стать основой для построения в будущем единой универсальной телекоммуникационной сети, способной одинаково эффективно передавать информацию различного рода.

Дальнейшие разработки и исследования в данной области могут быть посвящены более подробному рассмотрению какой-либо технической стороны вопроса, например, построению адекватной модели передачи пакетов в сети TSN, или разработке концепции сети железнодорожной электросвязи, базирующейся на данной технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] IEEE Std. 802.1Q-2018: IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Bridges and Bridged Networks.
- [2] Time-Sensitive Networking: A Technical Introduction / White Paper, Cisco Public, 2017.
- [3] Росляков А.В., Герасимов В.В., Мамошина Ю.С., Сударева М.Е. TSN – сети Ethernet, чувствительные ко времени – «Инфокоммуникационные технологии» Том 19, № 2, 2021, с. 187–201, УДК 004.724.4/004.728.3.057.4
- [4] Павловский Е.А. Основы сетей TCP/IP. Редакция 1.1 / Учебное пособие – ПГУПС, 2014. 95 с.
- [5] Многоканальная связь на железнодорожном транспорте/ В.В. Шмытинский, В.П. Глушко, Н.А. Казанский: Учеб. для вузов ж.-д. транспорта /Под ред. Шмытинского В.В. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. 464 с.
- [6] Изучение системы интегрированной цифровой технологической связи ОАО «РЖД»: Практикум по дисциплине «Оперативно-технологическая связь на ж. д. транспорте» – ПГУПС, 2020.